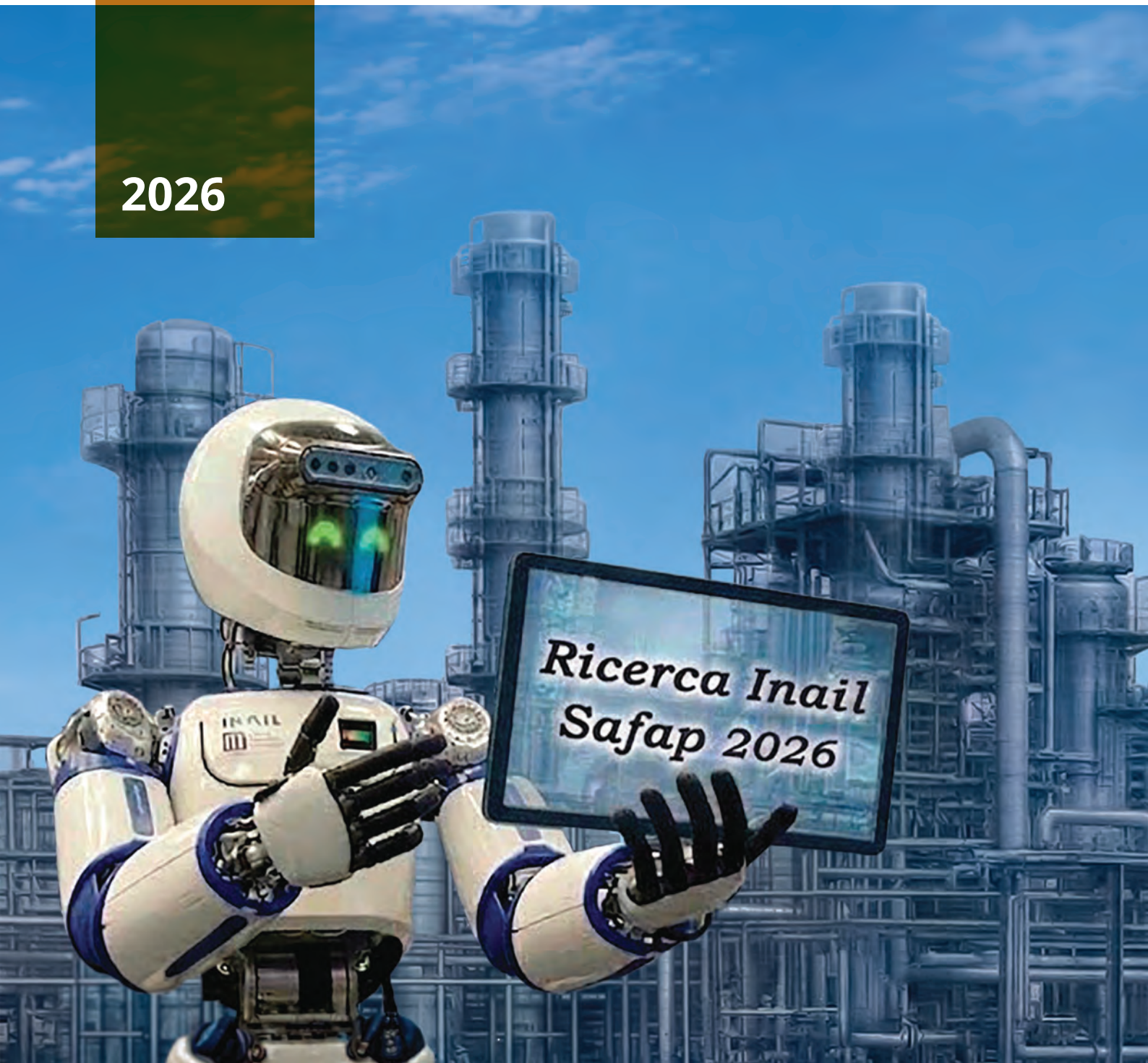
ATTI SAFAP 2026

INAIL

Sicurezza e affidabilità delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo

2026



ATTI SAFAP 2026

INAIL

2026

Pubblicazione realizzata da

INAIL
Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti,
prodotti e insediamenti antropici (Dit)

Editing e grafica
Viviana Rinaldi
Daniela Gaetana Cogliani
Magdalena Gorska
Francesco Di Palo

per informazioni
INAIL - Dipartimento innovazioni tecnologiche
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici
via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma
dit@inail.it
www.inail.it

© 2026 INAIL
ISBN 978-88-7484-994-9

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.
Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

INDICE

Sessione Plenaria Tecnica

D. Bogomolov, C. Q. G. Muñoz, S. Zolfagharysaravi, A. Marzani
Localizzazione di sorgenti di emissione acustica in serbatoi compositi mediante reti neurali profonde ..... *pag. 1*

N. Bravi, E. Franchi, A. Cappelli, M. Logli, L. Pratolini,
Dispositivi di sicurezza a protezione degli impianti di refrigerazione: valutazione delle portate dimensionanti e corretto dimensionamento dei dispositivi secondo gli standard UNI EN ISO 24664 ed UNI EN ISO 4126..... *pag. 11*

D. Di Fonzo, G. Augugliaro, F. Delli Quadri, R. Marrazzo, F. Vazzana, V. Bartolozzi
Integrità strutturale di un reattore non pressurizzato in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) aspetti principali e analisi del caso studio..... *pag. 25*

Sessione TECNOLOGIE DI SICUREZZA 1

A. Morettini, R. Vasile, E. Izzo, F. R. Filograsso, F. Vitucci
Rischi connessi all'utilizzo di impianti criogenici in stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante..... *pag. 36*

M. Diano, F. Badolato, A. Cosentini, R. Longo, M. Quattromani
Manutenzione predittiva nell'industria 4.0 e 5.0: le tecnologie emergenti e il ruolo attivo dell'operatore nel monitoraggio predittivo delle attrezzature a pressione ..... *pag. 47*

R. Acerboni, E. Artenio, F. Di Rocco, F. Panin
Dispositivi di protezione dalla temperatura minima negli Impianti Criogenici ..... *pag. 57*

Sessione ANALISI DEI RISCHI

G. L. Amicucci, M.T. Settino
La manutenzione in-house e out-source: modalità, criticità e requisiti per la gestione con AI..... *pag. 67*

R. Patriarca, G. Di Gravio, M. Fargnoli, L. Fedele, A.J. Nakhal A., F. Simone, E. Stefana, M.F. Milazzo, E. Piperopoulos, E. Proverbio, P. Agnello, A. Alvino, S.M. Ansaldi, A. Antonini, M.R. Vallerotonda
Il progetto RE-SET per la gestione della resilienza in impianti industriali soggetti alla transizione energetica..... *pag. 78*

R. Lauri, E. Di Ponzio, V. Galasso

Analisi della variazione dell'area di emissione sulla classificazione delle zone Atex: un caso studio focalizzato sull'idrogeno..... *pag. 88*

G. Romano, A. Mormile
Ricostruzione delle dinamiche di un evento incidentale reale mediante modello agli elementi finiti (FEM): innesco di un getto di gas in pressione..... *pag. 98*

M. Di Nardo, L. Ricciardi, A. Tonti, D. Ingegneri
Analisi del rischio e resilienza della Supply Chain dell'Idrogeno: un approccio integrato per la sicurezza dei sistemi energetici complessi..... *pag. 109*

L. Casiraghi
Life assessment di valvole del vapore surriscaldato soggette ad interazione creep-fatica attraverso analisi teoriche ed indagini metallurgiche..... *pag. 120*

D. Camplese, A. Schiaroli, G.E. Scarponi, A. Tugnoli, V. Cozzani
Valutazione della sicurezza di sistemi di isolamento multistrato (MLI) per serbatoi criogenici di idrogeno liquido (LH2) esposti a incendio..... *pag. 133*

D. Franchi, O. Borgia, S. Bonvicini
Sviluppo di un modello semplificato per la valutazione del rischio delle attrezzature in pressione..... *pag. 143*

A. Muratore, G. Grillone, A. Tonti, G. Giannelli, V. Nastasi
Le opportunità di sviluppo e il rischio pressione per le stazioni di rifornimento a idrogeno..... *pag. 158*

R. Iovene, A. Carro, G. Vaccaro, E. Bemporad
Realizzazione di un impianto di recupero e compressione di Syngas da pirolisi di pneumatici fuori uso: studio delle problematiche legate all'interazione del fluido con i materiali utilizzati per i componenti dell'impianto..... *pag. 168*

M. Del Gaudio, C. Piccolo, P. Infortuna, S. Spinoso, G. Conta
Rischi lavorativi nei lavori di revamping delle centrali idroelettriche..... *pag. 176*

C. Grazioli, P. Sergi, G. Donato
Ispezione periodica di recipienti per trasporto di gas: analisi dei rischi riferita a un caso studio..... *pag. 185*

Sessione PERICOLO DI INCIDENTI RILEVANTI

S. Campana, R. Iovene, R. Vasile, A. Morettini
Jet fire di gas naturale in uno stabilimento di soglia superiore: approfondimenti post incidentali, revisione dell'analisi del rischio, misure correttive tecniche e gestionali ..... *pag. 196*

E. Bemporad, F. Pera, F. Vazzana

La presenza di sostanze infiammabili in stabilimenti a rischio di incidente rilevante: analisi del rischio e sistema di gestione della sicurezza quali strumenti di prevenzione coordinata..... *pag. 206*

R. Marrazzo, D. Barone
Aspetti di safety e security nella considerazione dell'interfaccia uomo-macchina per la gestione dei siti Seveso..... *pag. 221*

P.A. Bragatto, M.F. Milazzo
Invecchiamento degli impianti Seveso: da un vecchio problema a una nuova emergenza..... *pag. 230*

M.R. Vallerotonda, A. Pirone, C. Delle Site
L'analisi del controllo operativo nelle ispezioni "Seveso": risultati dai rapporti finale di ispezione nei primi anni di applicazione del D.lgs. 105/2015..... *pag. 240*

A. Pirone, P. Agnello, M.R. Vallerotonda, S.M. Ansaldi
I quasi incidenti negli stabilimenti italiani con pericolo di incidente rilevante: risultati dell'analisi delle schede dell'esperienza operativa raccolte nel repository EsOpIA ..... *pag. 252*

D. Sallustio, M.G. De Santis, M. Dell'Olio, N. De Santis
Il RENTRI, dalla gestione alla quantificazione dei rifiuti pericolosi in ambito Seveso..... *pag. 264*

B. Conestabile della Staffa, A. Lambertini, M. Brunetto, G. A. Zuccarello, L. Magnani
Analisi dell'esperienza operativa nei siti RIR di soglia superiore delle province di Bologna, Ferrara e Modena: criticità, azioni di miglioramento e casi studio..... *pag. 273*

F. Furia, C. Delle Site, A. Pirone
L'analisi dell'esperienza operativa negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante: focus sui quasi incidenti negli stabilimenti siciliani..... *pag. 283*

F. Pasquale, F. Manuguerra, B. Basso
L'esperienza operativa nelle ispezioni sul Sistema di Gestione della Sicurezza di cui al D.lgs. 105/2015: analisi di un caso studio in ambito GPL..... *pag. 294*

V. Colucci, R. Marrazzo, A. Sibilano, M. C. Tarantini
Elementi di integrazione tra cyber Security e Safety per la gestione del rischio negli stabilimenti Seveso..... *pag. 303*

V. Prete, G. Gorrino, I. Oliaro, E. Portigliatti, M. Zorzi
Sistemi di rilevamento gas tossici e funzioni strumentate di sicurezza in impianti a rischio di incidente rilevante..... *pag.313*

A. Leva, R. Vallerotonda, M.R. Vallerotonda
Gli infortuni e le malattie professionali nell'industria di processo Seveso..... *pag. 324*

R. Barberis, R. Santero, S. Brezza, V. Prete, G. Conta
L'importanza della circolazione interna in un'azienda a rischio di incidente rilevante: innovazione e strategie..... *pag. 337*

Sessione MECCANISMI DI DANNO E INTERVENTI DI RIPARAZIONE

A. Mura, A. Rubinato

Integrity Operating Windows intelligenti: dalla sorveglianza statica alla gestione predittiva e in tempo reale dell'integrità degli asset..... *pag. 346*

L. Scano
Utilizzo di metodi avanzati di meccanica della frattura per il calcolo delle curve di avviamento (MPT) di apparecchi a pressione in materiale basso-legato e in servizio idrogeno..... *pag. 356*

L. Scano, F. Piccini, S. Palomba
Analisi del danno da creep di componenti in pressione soggetti a concomitante perdita di metallo localizzata..... *pag. 369*

A. Russo, R. Acerboni, A. De Palma, N. Altamura, G. Saputi
Controlli non distruttivi e analisi di vita utile su apparecchiature in PRFV o GRP..... *pag. 381*

G. Augugliaro, F. Brini, L. Bruzzo, C. Mennuti, P. Quaresima, A. Demma
Controllo mediante ultrasuoni di tubazioni HDPE – valutazione della Probability Of Detection (POD)..... *pag. 390*

A. Casillo, G. Giavarini
Uso sicuro, rischi, manutenzione e defettologia dei recipienti di trasporto (bombole di gas disciolti e liquefatti, compressi) ..... *pag. 398*

G. De Gennaro, D. Sallustio, M. Vincitorio, L. Rosati
Caso studio sulla valutazione dell'integrità di un'autoclave per il trattamento di manufatti industriali..... *pag. 408*

R. Ciancio, M. Agnello, G. Iacino, A. Nappo, D. Chinellato
Riparazione di reattore smaltato: applicazione di piastre in tantalio e valutazione FEM su effetto intaglio localizzato a fatica oligociclica in corrispondenza dei punti di intervento..... *pag. 420*

A. Alvino, A. Antonini, G. De Domenico, F. Giacobbe, C. Grazioli, E. Pichini, S. Guarnaccia
Valutazioni meccaniche e metallurgiche post esercizio su materiali in acciaio inossidabile austenitico HP grade..... *pag. 429*

L. Casiraghi, A. Staffolani, G. Merckling
Prove di indentazione strumentata a supporto delle valutazioni di vita residua e integrità di attrezzature a pressione..... *pag. 442*

A. Andolina, M. Bartesaghi, R. Molica Nardo, A. Palumbo
La verifica di integrità di un recipiente gas con la tecnica Phased Array e la gestione dell'esercizio in condizioni di Fitness for Service – un'analisi della sorveglianza del danneggiamento..... *pag. 455*

F. Rossetti, N. Palumbo, A. Serra, D. Airoldi
Verifica di funzionamento a seguito di riparazione di un generatore di vapore a tubi d'acqua al servizio della linea 1 del Termoutilizzatore A2A di Brescia..... *pag. 467*

Sessione SISTEMI PER LA SICUREZZA

G. Vaccaro, I. Mollone, C. Piccolo, E. Milano

Esperienze operative di un impianto di generatore di azoto in un pozzo di estrazione..... *pag. 477*

A. Romanelli, A. Serra
Ciclo di cattura della CO_2 da post-combustione in un impianto a ciclo combinato a gas naturale..... *pag. 588*

R. Ciancio, E. Ferrari, V. Zanni, M. Palombo, G. L. Cosso
Analisi del danneggiamento per scorrimento viscoso del collettore di uscita di un impianto di "steam reforming" ..... *pag. 501*

F. Carmignani, G. Sgargetta, N. Jand, R. Iovene, R. Vasile, M. Toma, T. Guidi
Affidabilità e sicurezza di un impianto di produzione TetraConaZolo con impiego di TetraFluoroEtilene ad alta pressione: fattibilità delle nuove tecnologie..... *pag. 515*

D. Nicotra, A. Carro, G. Vaccaro
Fenomeni di instabilità dell'efflusso nelle valvole di sicurezza: Analisi e Mitigazione..... *pag. 526*

De Cillis, M. Armenise, R. Modestino, A. Nebbioso, D. Sallustio
L'innovazione digitale nella conservazione degli archivi tecnici di un ente di ricerca: sfide e opportunità..... *pag. 536*

D. Cadel, A. Carro, M. Zattini, G. Vaccaro, A. Carnaccini
Revamping del sistema di flame detecon nei bruciatori a Tail Gas - Analisi dei rischi e miglioramento dei sistemi di sicurezza..... *pag. 545*

S. Carra, C. Di Girolamo, L. Monica, A. Cagnoni, A. Colautto
La norma API 527 per la sicurezza nei processi a idrogeno: una metodologia per la prova di tenuta delle valvole di sicurezza..... *pag. 553*

P. Agnello, S. Ansaldi, P. Bragatto, R. Setola
Evoluzione di tecnologie informatiche IT e tecnologie operative OT nella transizione digitale e pericolo di incidente rilevante..... *pag. 562*

A. Alvino, A. Antonini, S. Budano, D. Lega, A. Di Gianfrancesco, F. Troiani
Valutazione dell'efficienza di sistemi di prova Small Punch Creep Test (SPCT)..... *pag. 573*

R. Gigante, F. Torriani, C. Sozzi
Evoluzione dei sistemi di tenuta per air fin cooler con plug headers: un'esperienza applicativa di successo..... *pag. 587*

S. Guarino, S. Perone, R.F.S. Buttiglione, E. del Prete, R. Setola
Industrial Cyber Shield: Protezione delle Reti Industriali nell'Era dell'Industria 4.0..... *pag. 597*

F. Ceruti, D.G. Cogliani, A. Nebbioso, G. Saputi
La web content analysis per un'efficace diffusione delle informazioni relative alle attrezzature a pressione, agli impianti di processo e agli impianti Seveso..... *pag. 607*

R. Modestino, M.P. Gatto, G. Aversa, M. Pagliuca, G. Lanzetta
Produzione di acido ialuronico mediante processi biotecnologici innovativi..... *pag. 619*

Sessione PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE

L. Bruzzo

Problematiche nella fabbricazione di attrezzature destinate allo stoccaggio di idrogeno liquido..... *pag. 630*

E. Bemporad, R. Balistreri, F. Giacobbe, N. Palumbo, M. Formica
Le nuove sfide della direttiva 2014/68/UE ad oltre 10 anni dalla sua emanazione, con particolare riferimento al processo di verifica della conformità di attrezzature ed insiemi a pressione..... *pag. 638*

A.F. Magrì, D. Gadenz
Applicazione del metodo di calcolo di EN13445-3 Annex J a piastre tubiere sottili per scambiatori di calore-generatori di vapore a recupero e confronto con metodologie di Design by Analysis..... *pag. 652*

E. Pichini Maini, I. Mazzarelli, A. Alvino, A. Antonini, A. Meleddu, J. Ferino
Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – Teorie di calcolo ai fini della progettazione..... *pag. 662*

E. Pichini Maini, I. Mazzarelli, A. Alvino, A. Antonini, A. Meleddu, J. Ferino

Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – Considerazioni pratiche ai fini delle verifiche..... *pag. 673*

I. Mazzarelli, I. Ferrara, N. Visalli
Sistemi iperbarici itineranti: rischi da atmosfere iperbariche, soluzioni tecniche e certificazione di prodotto..... *pag. 683*

G. Giannelli, N. Altamura, A. Muratore, E. Zaccagnini, G. Grillone
L'ispezione periodica dei recipienti trasportabili per GPL in correlazione con i principali danni riscontrati su recipienti oggetto di incidente..... *pag. 685*

L. Polotti, R. Iovene, R. Vasile, A. Lanciotti, R. Tucceri
Ispezione periodica di recipienti trasportabili a pressione (TPED) mediante controllo ad ultrasuoni in accordo alla norma UNI EN ISO 18119:2024..... *pag. 703*

R. Stringhetti, S. Verzeri, L.G. Villa, D. Corso, E. Di Ponzio
Progettazione, realizzazione e test di un sistema di rifornimento per treni a idrogeno senza compressore e stoccaggi fissi, alimentato da carro bombolaio a 500bar..... *pag. 712*

F. Giacobbe, E. M. Carducci, R. Martini, F. Buti, L. Pugliese
Analisi degli scostamenti dai requisiti essenziali di sicurezza più frequentemente rilevati in fase di riesame della documentazione presentata da fabbricanti PED..... *pag. 721*

M. Rigamonti, A. Andolina
Il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza a protezione di un reattore soggetto a scarico bifasico. Un'analisi comparata API 520 e UNI EN ISO 4126 -10 2024..... *pag. 731*

M. Berruto, D. Calcagno, C. Casu, S. Priani, P. Infortuna, S. Spinoso, A. Urso, G. Gorrino
La mandrinatura di forza nella costruzione di fasci tubieri: stato dell'arte, riferimenti normativi e analisi di un caso studio (fascio tubiero in acciaio austeno-ferritico UNS S32750 "SUPERDUPLEX")..... *pag. 742*

Sessione RISCHIO NaTech

V. Nastasi, G. Grillone, G. Argento, D. Di Fonzo, A. Muratore

Impatto da ondate di calore negli stabilimenti industriali con pericolo di incidenti rilevanti..... *pag. 755*

G. Grillone, A. Muratore, M. Bellissimo, E. Genco, R. Sunseri, V. Nastasi
Gestione del Rischio Natech indotto da fulmini..... *pag. 765*

P. Alfano, V. Bartolozzi, F. Caruso, S. Colombo, G. Romano
Analisi "NaTech" per impianti a rischio di incidente rilevante con il supporto di metodologie avanzate: esperienze operative e proposte di sviluppi futuri..... *pag. 775*

C. Miglietta, D. Perrone, G. Gabbianelli, F. Micelli, M. Ciucci
Rischio NaTech in stabilimenti industriali con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR): Studio della vulnerabilità sismica di connessioni Serbatoi – Tubazioni..... *pag. 786*

A. Marino, M. Ciucci
Sistemi a pilotaggio remoto per il miglioramento delle condizioni di sicurezza e la gestione dell'emergenza NaTech negli impianti PIR..... *pag. 796*

A. Marino, G. Berardo
Approccio multidisciplinare per la gestione degli eventi NaTech: interazione tra analisi della risposta sismica locale e serbatoi di stoccaggio in acciaio..... *pag. 804*

L. Bitraj, V. Cozzani, C. Puccini, M. Pacileo, V. Galasso, A. Sibilano
Analisi del rischio Natech: sviluppo di un metodo di screening semplificato..... *pag. 814*

A. Bonelli, G. Quinci, M. Ciucci, D. Corritore, F. Paolacci
Valutazione della vulnerabilità sismica di serbatoi atmosferici metallici non ancorati in termini di perdita di contenimento..... *pag. 825*

C. Mazzini

Rischio idrogeologico in Emilia Romagna: gestione dell'emergenza con riferimento a casi studio occorsi in area industriale colpita dai recenti scenari alluvionali..... *pag. 835*

D. Corritore, S. Caprinozzi, F. Paolacci
Comportamento sismico delle colonne di processo..... *pag. 845*

D. Corritore, S. Caprinozzi, F. Paolacci
Potenzialità dello Structural Health Monitoring e dell'Early Warning negli impianti industriali..... *pag. 858*

P. Addonizio, M. Di Nardo, M. Madonna, E. Milano
Depositi di gpl e direttiva Seveso III: applicazione del metodo ad indici e verifica di compatibilità territoriale..... *pag. 872*

M. A. Zanini, L. Hofer, E.J. Ude, A. Sidhu, M. Ciucci, A. Marino, A. Lumini, A. Franco, M. Miglietta, E. Avolio, E. Pons, P. Colella, L.C. Da Rugna, M. Ziron
Il rischio vento ed il progetto REDUCE METEO HAZARDS..... *pag. 881*

Sessione TECNOLOGIE DI SICUREZZA 2

F. Manuguerra, M. Vitale, B. Basso,

Studio dei fenomeni di incendio in ambiente confinato tramite software di simulazione..... *pag. 891*

R. Rolle, W. Laiolo
Intossicazione da monossido di carbonio causata da un impianto di riscaldamento in un'attività produttiva..... *pag. 901*

F. Petrosino, F. Losco, G. Marino, I. Campitelli, F. Viola
Procedura per il revamping di un serbatoio con accesso in ambiente confinato e controlli non distruttivi: il caso del Centro Italiano di Ricerche Aerospaziali..... *pag. 909*

Di Donato, L. Ricciardi, M. Pirozzi, M. Spagnuolo, P. Aricò, S. Papa, G. Di Gironimo, F. Massa
Addestramento ibrido per operatori in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento: un caso studio in ambito aeroportuale..... *pag. 917*

M. P. Gatto, N. L'Episcopo, A. De Cristofaro, F. Rossetti
Sicurezza dei processi nei siti di digestione anaerobica degli impianti di trattamento delle acque reflue..... *pag. 928*

M. P. Gatto, N. L'Episcopo, E. Spagnuolo, M.M. La Veglia
Strategie innovative di prevenzione e mitigazione dei rischi derivanti dalle polveri combustibili nell'industria alimentare..... *pag. 939*

M. Del Gaudio, R. Modestino
Sicurezza degli impianti elettrici nella produzione di biogas in aziende agricole..... *pag. 948*

Sessione ATTREZZATURE E INSIEMI A PRESSIONE

A. Romanelli, A. Serra, G. Baccarin

La gestione del rischio nei generatori di vapore: dal D.M. 94/2020 alle nuove tecnologie di monitoraggio predittivo..... *pag. 956*

M. Calabria, F. Pascucci, G. Gorrino, S. Manna, A. Urso
Esperienza di esercizio di una caldaia elettrica ad elettrodi immersi in supporto a una centrale a ciclo combinato..... *pag. 966*

A. Tonti, I. Mazzarelli, I. Mazzarelli
La conduzione da remoto dei generatori di vapore..... *pag. 977*

G. Giannelli, N. Altamura, R. Acerboni, A. Mele, M.F.S. De Musso,
Tubazioni interrate in pressione: confronto tra norme tecniche e applicazione del DM 329/04..... *pag. 991*

F. Boella, A. De Palma, R. Acerboni, V. Prete, G. Zuccarello
Conduzione dei generatori di vapore mediante sistemi informatici mobili di controllo a distanza: implicazioni per la sicurezza degli operatori e rischi informatici e di processo..... *pag. 1004*

L. Cuccaro, M. Marengo
Efficienza energetica e sicurezza sul lavoro nella produzione di vapore a scopi industriali..... *pag. 1013*

F. Negri, A. Galeazzi, F. Gallo, F. Manenti, I. Mazzarelli E. Pichini
Studio di un algoritmo per la manutenzione predittiva di attrezzature in pressione basato su principi di Machine Learning..... *pag. 1026*

T. Scalici, N. Palumbo, N. Rizzo, F. Rossetti
La Sicurezza delle Attrezzatura ad Aria Compressa in relazione ai Rischi derivanti dalla Pressione e dalla Temperatura..... *pag. 1039*

M.M. La Veglia, F. Donato, M. Del Gaudio, C. Piccolo
Sicurezza ad alta pressione: gestione degli ambienti iperbarici in cantiere e il ruolo del soccorso tecnico urgente..... *pag. 1051*

A. Rotondaro, R. Longo, A. Cosentini, F. Badolato, M. Diano
Le prove di scoppio come alternativa al trattamento termico dei fondi formati a freddo nei serbatoi di GPL fino a 13 m3..... *pag. 1061*

C. De Toro, G. Battista, R. Luciano, M. De Mattia, A. Viviano
Rischi di sovra pressurizzazione nelle autoclavi di sterilizzazione..... *pag. 1072*

E. Albarelli, G. Vaccaro, A. Carnaccini, A. Carro
Qualifica del procedimento di giunzione e del personale nelle tubazioni in PEAD..... *pag. 1080*

F. Taurasi, M. Di Pietro, G. Ianziti, A. Corsi
Utilizzo e valutazione dello stato di integrità nel tempo di reattori smaltati..... *pag. 1094*

Sessione VERIFICHE E CONTROLLI

L. Comel

Manutenzione integrata per la riparazione e l'ottimizzazione di scambiatori di calore all'interno di sistemi di condizionamento..... *pag.1104*

F. Rossetti, N. Palumbo, A. Serra, P. Tria
Verifica di visita interna di un generatore di acqua surriscaldata a tubi d'acqua al servizio della Centrale Nord A2A di Brescia,,,

Localizzazione di sorgenti di emissione acustica in serbatoi compositi mediante reti neurali profonde

D. Bogomolov[1,2], C. Q. G. Muñoz[3], S. Zolfagharysaravi[1,2], A. Marzani[2]

[1]Advanced Research Center on Electronic Systems (ARCES), Università di Bologna, Bologna
[2]Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM, Bologna
[3]Autonomous University of Madrid, Ciudad Universitaria de Cantoblanco, Madrid,

Sommario
Questo studio presenta una strategia per la localizzazione di sorgenti di emissione acustica (EA) in serbatoi in materiale composito di Tipo IV, agnostica alla geometria e alle proprietà meccaniche del serbatoio. L'approccio mira a superare i limiti degli algoritmi di localizzazione tradizionali sfruttando reti neurali artificiali per l'elaborazione dei segnali di AE.
Sono state valutate due architetture di rete: una rete neurale convoluzionale bidimensionale (2D-CNN), che utilizza le forme d'onda complete acquisite dai sensori, e una *rete neurale ricorrente bidirezionale a memoria a lungo-breve termine* (BiLSTM), che opera invece su parametri estratti dai segnali AE.
Le reti sono state addestrate e validate utilizzando un dataset sperimentale generato tramite test pencil break su un serbatoio composito da 40,6 litri, con acquisizione dei segnali mediante una rete di quattro sensori AE con frequenze di 75 e 150 kHz. Le prestazioni dei modelli proposti sono state confrontate con quelle di un algoritmo di localizzazione classico, implementato in un software commerciale dedicato.
I risultati evidenziano come il modello BiLSTM offra un'accuratezza media di localizzazione significativamente superiore rispetto all'algoritmo convenzionale, dimostrando il suo potenziale per un'integrazione robusta ed efficiente in sistemi di monitoraggio strutturale in tempo reale per serbatoi in materiale composito.
Infine, lo studio analizza la configurazione ottimale dei sensori, considerando tipologia, posizionamento e numero minimo di eventi AE necessari per l'addestramento del modello. Tali analisi mirano a garantire la trasferibilità del metodo proposto, facilitandone l'applicazione in una varietà di scenari di monitoraggio della salute strutturale.

1. Introduzione

L'interesse crescente verso i veicoli alimentati a idrogeno deriva dal loro potenziale di ridurre in modo significativo le emissioni inquinanti nei sistemi di trasporto urbani, contribuendo alla transizione energetica e agli obiettivi di decarbonizzazione promossi dall'Unione Europea. I serbatoi a pressione rivestiti in materiale composito (Composite Overwrapped Pressure Vessels, COPV) di tipo IV, che combinano un liner polimerico

interno con un involucro in fibra di carbonio e resina epossidica, rappresentano oggi la soluzione tecnologica più avanzata per lo stoccaggio sicuro dell'idrogeno ad alta pressione (350–700 bar).
Tali serbatoi offrono un eccellente rapporto resistenza/peso e una ridotta suscettibilità ai fenomeni di fragilizzazione da idrogeno rispetto ai serbatoi metallici tradizionali. Tuttavia, la loro architettura anisotropa e stratificata rende complessa la valutazione dell'integrità strutturale, in particolare per la rilevazione precoce di danneggiamenti interni non visibili. In questo contesto, le tecniche di emissione acustica (AE) rappresentano uno strumento diagnostico di grande efficacia [5, 9], in grado di rilevare e localizzare in tempo reale le sorgenti di onde elastiche generate da microfessure, delaminazioni o rotture di fibre durante i cicli di pressurizzazione.
Le metodologie tradizionali di localizzazione delle sorgenti AE si basano sulla triangolazione dei tempi di arrivo e sull'assunzione di una velocità di propagazione costante [1]. Tuttavia, nei materiali compositi tali ipotesi non sono realistiche, a causa dell'anisotropia e delle variazioni locali di velocità [2]. Per questo motivo, negli ultimi anni si è sviluppato un crescente interesse verso approcci data-driven, capaci di apprendere relazioni complesse tra le caratteristiche dei segnali e la posizione delle sorgenti senza richiedere informazioni a priori sulle proprietà elastiche del materiale [3].
Il presente lavoro si inserisce in questo filone di ricerca proponendo un approccio innovativo basato su reti neurali profonde, e in particolare sull'architettura Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) [4, 6], in grado di sfruttare la correlazione spaziale e temporale dei segnali AE acquisiti da sensori distribuiti su un serbatoio in composito (Figura 1).

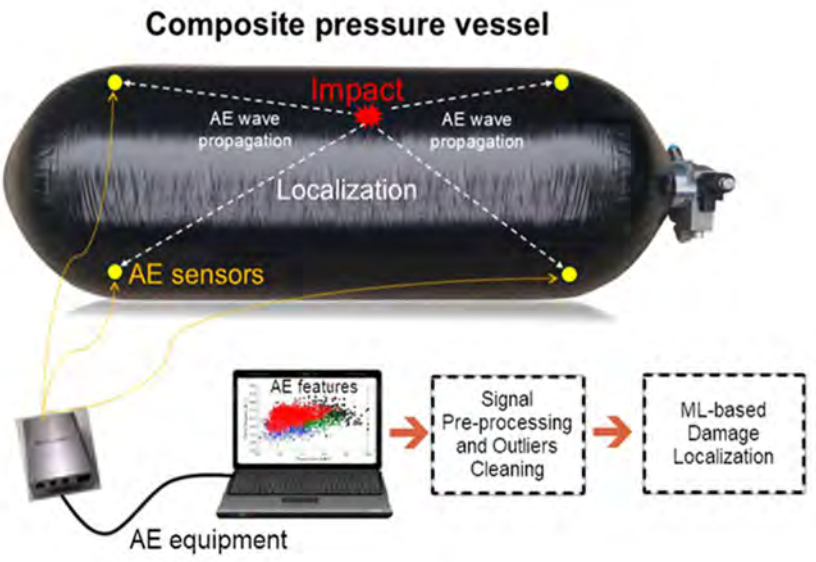


Figura 1. Configurazione del serbatoio e disposizione dei sensori

2. Stato dell'arte

L'emissione acustica (AE) è una tecnica di monitoraggio non distruttivo ampiamente impiegata per la diagnosi precoce dei danni in materiali compositi e metallici [9].
Basata sulla registrazione di onde elastiche transienti generate da processi di frattura o deformazione [5], consente di rilevare fenomeni di cricche nella matrice, rottura delle fibre e delaminazioni, che spesso precedono il collasso strutturale.
La localizzazione delle sorgenti AE (Acoustic Source Localization, ASL) è cruciale per distinguere i segnali realmente associati al danneggiamento da quelli di origine ambientale. Nei serbatoi di interesse per questo studio l'anisotropia, la curvatura e la differente attenuazione delle onde meccaniche lungo diverse direzioni di propagazione, rendono i metodi classici basati sui tempi di arrivo (ΔTOA) e sulla triangolazione [1, 2] inefficienti. Approcci più avanzati, come beamforming e time-reversal, possono migliorare la precisione nella localizzazione delle sorgenti ma richiedono conoscenze preliminari delle proprietà elastiche del serbatoio, risorse computazionali elevate, e capacità di attuazione delle onde meccaniche [8].
Negli ultimi anni, lo sviluppo del machine learning (ML) e del deep learning (DL) ha rivoluzionato l'SHM, consentendo di analizzare grandi volumi di dati AE in modo automatico e adattivo [6]. Le reti neurali, ed in particolare le CNN e le RNN, si sono dimostrate efficaci nell'estrarre pattern complessi anche in condizioni rumorose [3, 7].
Le CNN risultano efficaci nell'identificare le caratteristiche spettrali associate ai diversi meccanismi di danneggiamento, mentre le reti LSTM sono più adatte a modellare la sequenza temporale della propagazione delle onde. L'estensione bidirezionale delle LSTM (BiLSTM) consente di analizzare le dipendenze spaziali e temporali in entrambe le direzioni, migliorando la capacità complessiva di localizzazione delle sorgenti [4].
La letteratura recente indica una tendenza verso approcci ibridi che combinano sensibilità fisica e potenza predittiva dei modelli basati sui dati. Il presente lavoro si colloca in tale prospettiva, confrontando metodi convenzionali e modelli di deep learning con particolare attenzione alla robustezza e all'applicabilità del modello BiLSTM in configurazioni sensoriali ridotte.

3. Metodologia sperimentale

Per valutare l'efficacia degli approcci proposti, è stato utilizzato un serbatoio composito di tipo IV con volume di 40,6 litri, dotato di liner polimerico e avvolgimento in fibra di carbonio realizzato mediante processo di *filament winding*. Tale campione è rappresentativo dei serbatoi impiegati nei veicoli per lo stoccaggio di idrogeno compresso.

3.1 Struttura e configurazione sensoriale

La superficie del serbatoio è stata suddivisa in quaranta zone di classificazione, identificate da coordinate assiali (da 0 a 9) e circonferenziali (da A a D). Quattro sensori di emissione acustica (AE) sono stati installati sulla superficie esterna, con l'obiettivo di garantire una copertura completa e traiettorie di propagazione differenziate. Sono

stati utilizzati due sensori VS75 con frequenza di risonanza di 75 kHz e due sensori VS150 con frequenza di 150 kHz, ciascuno equipaggiato con un preamplificatore da 34 dB.
Come mostrato in *Figura 2*, la disposizione dei sensori e la suddivisione in zone di attivazione delle sorgenti AE sono state progettate per assicurare un'elevata sensibilità direzionale e per consentire l'analisi della propagazione delle onde in differenti condizioni geometriche. I sensori sono stati fissati mediante supporti meccanici e un sottile strato di grasso siliconico per garantire un accoppiamento acustico ottimale e ripetibilità delle misure.

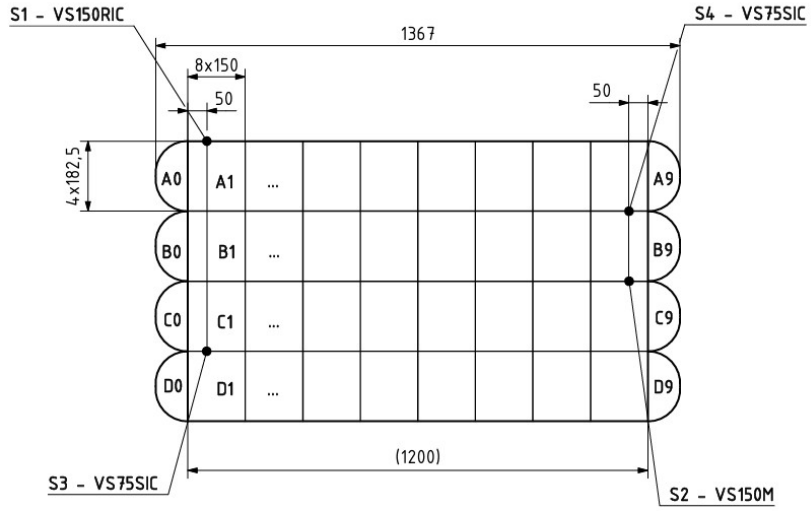


Figura 2. Configurazione del serbatoio, posizione dei sensori AE e zone di attivazione delle sorgenti

3.2 Acquisizione dei segnali e generazione delle sorgenti

Le sorgenti di AE sono state simulate mediante la tecnica Hsu–Nielsen, basata sulla rottura di una mina di matita da 0,5 mm [5]. Come illustrato in *Figura 2*, per ciascuna zona sono stati generati numerosi eventi in posizioni casuali, così da costruire un dataset bilanciato di segnali. I segnali sono stati acquisiti tramite sistema *Vallen AMSY-5* con frequenza di campionamento pari a 2 MHz, soglia di attivazione di 30,6 dB e lunghezza di 4096 campioni.
Ogni evento è stato identificato come combinazione di "hit" provenienti dai diversi canali entro una finestra temporale di 2 ms. I dati acquisiti, comprendenti tempo di arrivo, ampiezza, durata, energia e tempo di salita, sono stati successivamente esportati in ambiente MATLAB per la fase di elaborazione e analisi.

3.3 Pre–processing e pulizia dei dati

Per ogni evento AE, i tempi di arrivo assoluti sono stati convertiti in ritardi relativi rispetto al primo sensore attivato, eliminando così la dipendenza dal tempo assoluto di emissione. Gli eventi anomali o affetti da rumore impulsivo sono stati individuati tramite analisi visiva e rimossi dal dataset.

Le caratteristiche più rappresentative (ampiezza, durata, energia, *root mean square*, tempo di salita) sono state normalizzate mediante *min–max scaling* e ridotte in dimensione tramite *Principal Component Analysis* (PCA), conservando il 95% della varianza totale. Questo approccio ha consentito di eliminare la ridondanza e migliorare la robustezza del modello.
I dati preprocessati per ogni evento sono poi stati concatenati per i vari sensori come a formare delle sequenze temporali di parametri. In tal modo, ogni evento AE è stato rappresentato come una sequenza ordinata di caratteristiche, idonea per l'elaborazione da parte della rete *Bidirectional LSTM*.

4. Risultati principali

L'analisi dei dati sperimentali ha permesso di valutare le prestazioni dei diversi approcci di localizzazione delle sorgenti di emissione acustica.
I risultati sono stati confrontati in termini di accuratezza media di classificazione e di errore quadratico medio nella stima delle coordinate della sorgente.

4.1 Approccio classico basato sul tempo di arrivo

L'algoritmo convenzionale di localizzazione, implementato nel software *Vallen Systeme*, stima la posizione delle sorgenti AE sulla base delle differenze di tempo di arrivo dei segnali registrati dai sensori, assumendo una velocità di propagazione costante [1]. Tale velocità è stata preliminarmente determinata mediante prove di *pitch and catch* tra le coppie di sensori, in modo da calibrare il modello in funzione della risposta del materiale composito.
I risultati hanno mostrato un'elevata sensibilità della precisione di localizzazione al valore di velocità impostato: piccole variazioni di poche centinaia di m/s generano spostamenti significativi della posizione stimata. L'accuratezza media ottenuta con il valore ottimale (4300 m/s) è risultata pari al **37,6%**, con errori medi di localizzazione che aumentano progressivamente allontanandosi dal centro del serbatoio (*Figura 3*).
Gli errori più consistenti si sono riscontrati nelle zone di estremità del serbatoio, dove la curvatura e le riflessioni marginali compromettono la triangolazione dei tempi di arrivo. Questa analisi conferma i limiti intrinseci dei metodi basati su modelli fisici semplificati, in particolare quando si opera su strutture composite anisotrope e di geometria non piana.

4.2 Rete convoluzionale bidimensionale (2D–CNN)

Per superare i limiti dell'approccio classico, è stata addestrata una rete convoluzionale bidimensionale (2D–CNN) direttamente sui segnali AE grezzi provenienti dai quattro sensori [3]. La rete è stata progettata per sfruttare simultaneamente la morfologia temporale del segnale e le relazioni spaziali tra i canali, consentendo di estrarre automaticamente le caratteristiche più rilevanti senza una fase preliminare di *feature engineering*.
Il modello è stato addestrato utilizzando il 60% dei dati per il *training*, il 20% per la *validation* e il restante 20% per il *testing*. Dopo 100 epoche di addestramento con

ottimizzatore *Stochastic Gradient Descent* (SGD) e *dropout* del 20% per ridurre l'overfitting, la rete ha raggiunto un'accuratezza media di localizzazione pari al **74,9%**.

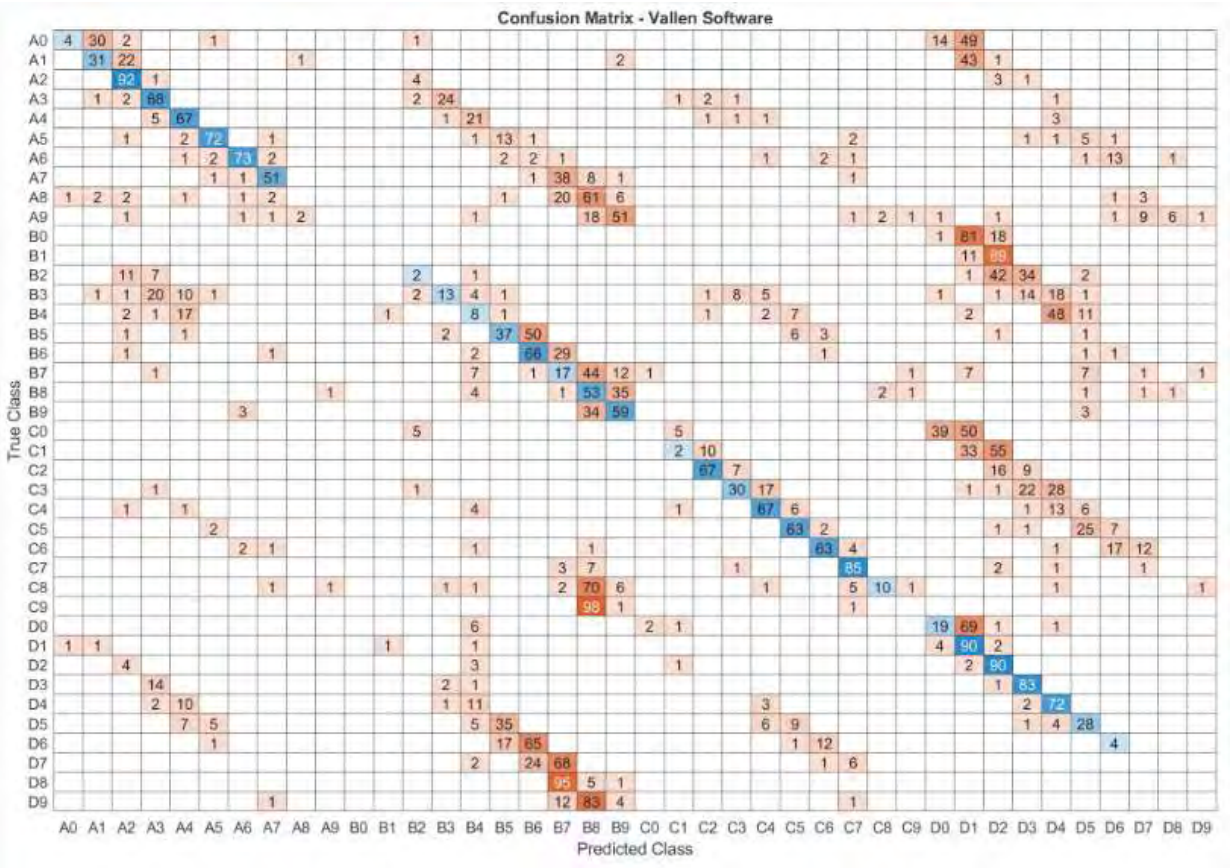


Figura 3. Risultati dell'approccio classico basato sui tempi di arrivo (matrice di confusione e accuratezza di classificazione)

Come mostrato in *Figura 4*, l'analisi della matrice di confusione ha evidenziato una buona capacità di classificazione nelle zone centrali del serbatoio, mentre gli errori residui si concentrano nelle aree adiacenti, dove la somiglianza delle forme d'onda induce il modello a confondere regioni contigue. Ciò conferma la sensibilità della CNN alla prossimità spaziale e sottolinea la necessità di modelli in grado di cogliere anche le relazioni sequenziali e temporali tra i sensori.

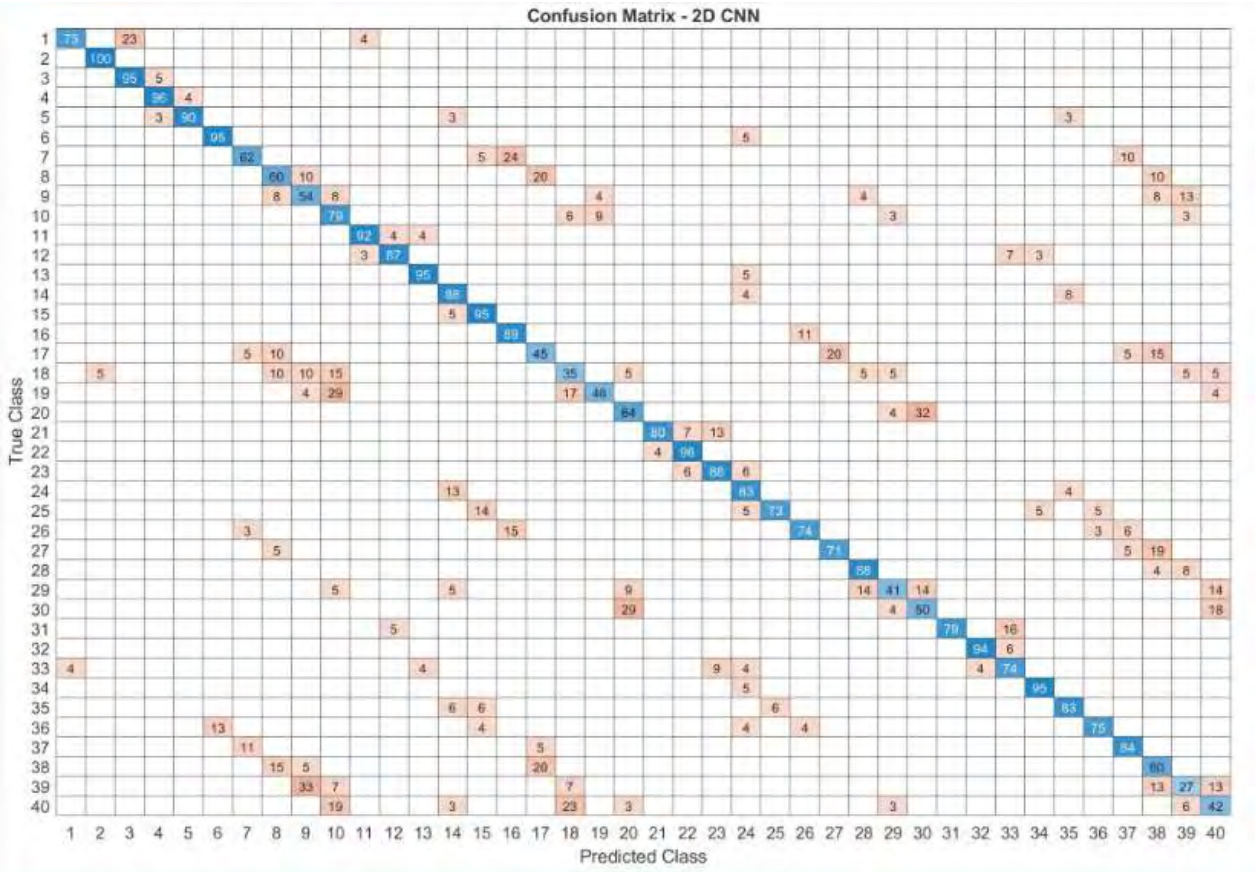


Figura 4. Risultati del modello 2D–CNN (matrice di confusione e accuratezza di classificazione)

4.3 Architettura BiLSTM basata su caratteristiche AE

La terza strategia ha previsto l'utilizzo di una rete *Bidirectional Long Short-Term Memory* (BiLSTM), applicata non ai segnali grezzi ma alle caratteristiche estratte e ridotte tramite *Principal Component Analysis* (PCA) [4, 6]. Ogni evento AE è stato rappresentato come una sequenza di vettori, uno per ciascun sensore, permettendo alla rete di apprendere simultaneamente le dipendenze spaziali e temporali bidirezionali presenti nei segnali.

Il modello BiLSTM, composto da tre strati ricorrenti e due strati completamente connessi, è stato addestrato con l'ottimizzatore *Adam* per 200 epoche, adottando regolarizzazione L2 e *gradient clipping* per garantire la stabilità numerica durante il processo di ottimizzazione.

Come mostrato in *Figura 5*, l'architettura della rete consente un flusso informativo bidirezionale che migliora la sensibilità alla sequenza di arrivo dei segnali AE. Il modello ha raggiunto un'accuratezza di test pari al 97,2%, con una matrice di confusione quasi perfettamente diagonale e un tasso di misclassificazione trascurabile. Tali risultati confermano l'elevata capacità del modello BiLSTM di generalizzare anche in presenza di rumore e di catturare le correlazioni dinamiche tra i sensori, superando nettamente le prestazioni ottenute con la CNN e con l'approccio classico.

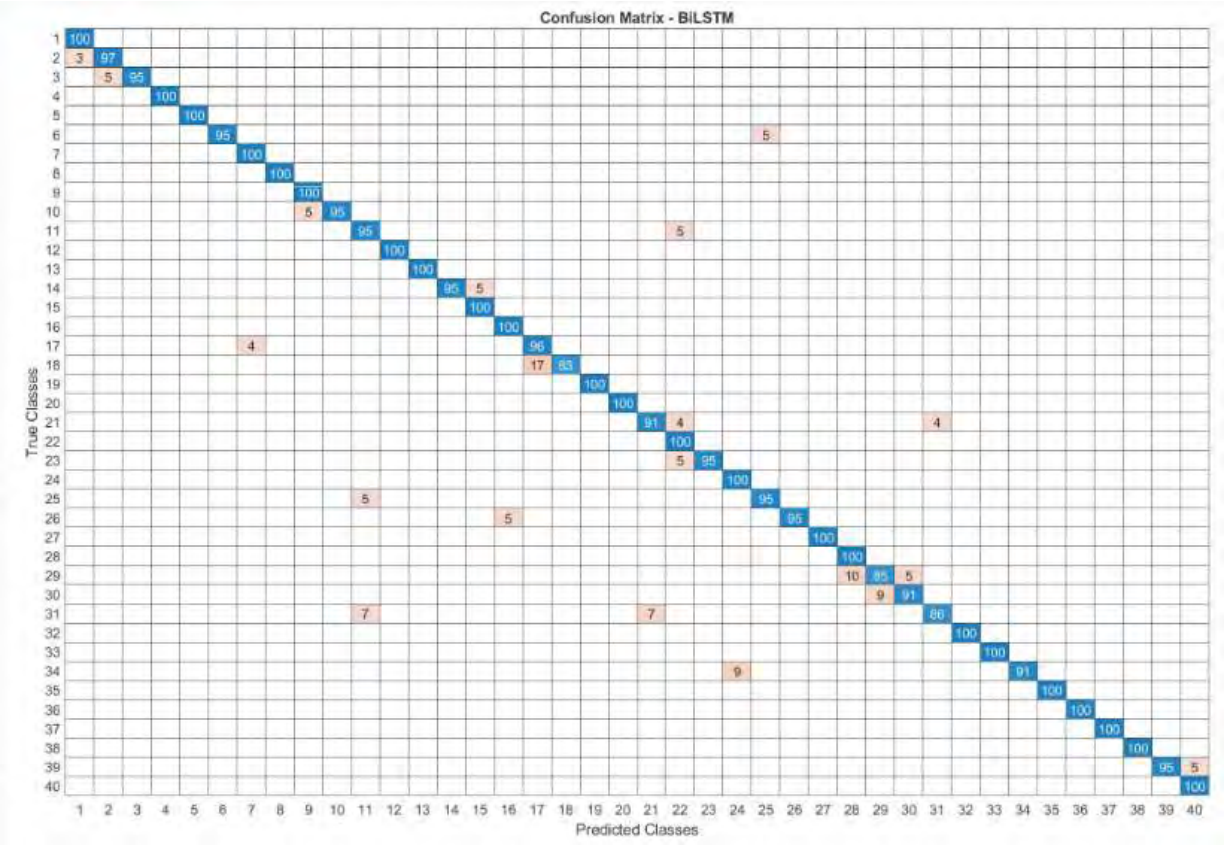


Figura 5. Risultati del modello BiLSTM (matrice di confusione e accuratezza di classificazione)

4.4 Confronto tra i modelli

Il confronto complessivo tra le tre metodologie mette in evidenza la superiorità degli approcci *data-driven* rispetto al metodo classico basato sui tempi di arrivo.

- **Vallen classico**: 37,6% di accuratezza media;
- **2D–CNN**: 74,9% di accuratezza;
- **BiLSTM**: 97,2% di accuratezza.

La rete BiLSTM dimostra la capacità di generalizzare efficacemente anche con dataset limitati e di adattarsi alle complessità introdotte dall'anisotropia e dalla geometria cilindrica. Essa rappresenta dunque una soluzione promettente per l'integrazione in sistemi di monitoraggio strutturale in tempo reale.

5. Discussione

L'analisi complessiva dei risultati ha evidenziato alcuni aspetti fondamentali riguardanti la configurazione sensoriale, la dimensione del dataset, la robustezza del modello e le implicazioni applicative.

Un primo elemento chiave riguarda la sensibilità del modello BiLSTM alla configurazione dei sensori. Come mostrato in *Figura 6*, che confronta tutte le combinazioni possibili da due a quattro sensori, l'aumento del numero di canali oltre quattro non comporta un miglioramento significativo delle prestazioni, mentre una riduzione al di sotto di tre sensori provoca un calo marcato dell'accuratezza (inferiore all'80 %). La configurazione a tre sensori garantisce un equilibrio ottimale tra copertura spaziale, ridondanza informativa e complessità del sistema, risultando la soluzione minima praticabile per implementazioni industriali, dove il numero di canali influisce direttamente sui costi e sulla quantità di dati da elaborare.

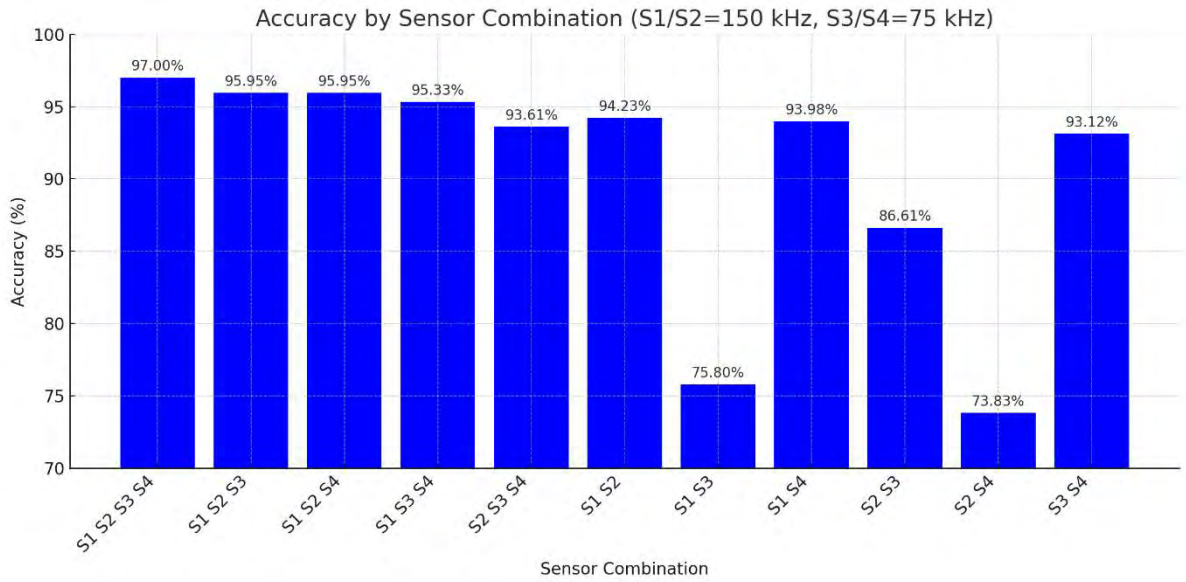


Figura 6. Accuratezza del modello BiLSTM per tutte le configurazioni sensoriali

Un secondo fattore critico riguarda la quantità di dati necessari per l'addestramento. Le prove di riduzione progressiva del dataset hanno mostrato che l'accuratezza del BiLSTM rimane stabile fino a circa sessanta eventi per classe; al di sotto di tale soglia si osserva un rapido deterioramento delle prestazioni, con fluttuazioni superiori al 10 %. Questo risultato suggerisce che la rete, pur essendo capace di apprendere pattern complessi, richiede una quantità minima di esempi rappresentativi per catturare la variabilità spaziale e temporale del fenomeno.

In termini di robustezza, il modello BiLSTM ha mantenuto un'elevata stabilità anche in presenza di rumore artificiale fino a 5 dB, grazie alla capacità intrinseca delle celle LSTM di filtrare le componenti non informative. Dal punto di vista dell'interpretabilità, l'analisi delle mappe di attenzione derivate dagli stati interni della rete ha mostrato una chiara correlazione tra i picchi di energia nei segnali AE e le regioni di massima attivazione del modello, indicando che la rete identifica effettivamente le porzioni fisicamente rilevanti del segnale e non solo relazioni statistiche. Infine, i risultati ottenuti confermano la potenzialità applicativa del modello BiLSTM per la localizzazione automatica delle sorgenti AE in serbatoi compositi destinati allo

stoccaggio di idrogeno. L'approccio proposto offre vantaggi sostanziali rispetto alle tecniche tradizionali:

- eliminazione della necessità di conoscere a priori le proprietà elastiche del materiale;
- adattabilità a geometrie complesse e a variazioni locali di spessore;
- possibilità di elaborazione in tempo reale tramite modelli addestrati *offline*.

Tali caratteristiche aprono la strada a sistemi di monitoraggio integrati, in grado di segnalare precocemente fenomeni di danneggiamento e supportare strategie di manutenzione predittiva nei sistemi a idrogeno ad alta pressione.

6. Conclusioni

Il lavoro presenta un approccio innovativo per la localizzazione delle sorgenti di emissione acustica (AE) in serbatoi compositi. Il modello proposto basato su una rete *Bidirectional Long Short-Term Memory* (BiLSTM) ha raggiunto un'accuratezza media del 97%, superando sia il metodo classico basato sui tempi di arrivo (37%) sia un algoritmo basato su una rete convoluzionale (75%). La configurazione ottimale con tre sensori garantisce un buon compromesso tra precisione e complessità, rendendo l'approccio idoneo a implementazioni industriali. La rete BiLSTM ha inoltre dimostrato robustezza al rumore e capacità di generalizzazione anche con dataset ridotti. L'architettura proposta rappresenta una base promettente per sistemi di monitoraggio integrati e applicazioni *real-time* nel campo dei materiali compositi e dello stoccaggio dell'idrogeno.

Bibliografia

[1] Ge, M. "ANALYSIS OF SOURCE LOCATION ALGORITHMS Part II: Iterative methods" *Journal of Acoustic Emission*, 21, 2003, 29–51.

[2] Kalafat, S.; Sause, M.G.R. "Acoustic emission source localization by artificial neural networks." *Structural Health Monitoring*, 2015.

[3] Zhao, J. et al. "Deep Transfer Learning Approach for Localization of Damage Area in Composite Laminates Using Acoustic Emission Signal." *Polymers*, 15(6), 2023: 1520.

[4] Shang, L., Zhang, Z., Tang, F., Cao, Q., Pan, H., Lin, Z. "CNN–LSTM Hybrid Model to Promote Signal Processing of Ultrasonic Guided Lamb Waves for Damage Detection in Metallic Pipelines." *Sensors*, 23(16), 7059, 2023.

[5] Sause, M.G.R. "Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources." *Journal of Acoustic Emission*, 29, 2011, 184–196.

[6] Cha, Y.-J. et al. "Deep learning-based structural health monitoring." *Automation in Construction*, 2024.

[7] Shang, L. et al. "CNN-LSTM Hybrid Model for Damage Detection in Metallic Pipelines." *Sensors*, 23(16), 2023: 7059.

[8] Wang, X. et al. "A Joint Acoustic Emission Source Localization Method for Composite Materials." *Sensors*, 23, 2023.

[9] Güemes, A. et al. "Structural Health Monitoring for Advanced Composite Structures: A Review." *Journal of Composites Science*, 4(1), 2020: 13.

Dispositivi di sicurezza a protezione degli impianti di refrigerazione: valutazione delle portate dimensionanti e corretto dimensionamento dei dispositivi secondo gli standard UNI EN ISO 24664 ed UNI EN ISO 4126

N. Bravi[1], E. Franchi[1], A. Cappelli[2], M. Logli[2], L. Pratolini[2]

[1]Inail – UOT di Lucca
[2]Saipex

Sommario
Gli impianti di refrigerazione industriale sono sistemi complessi nei quali la sicurezza assume un ruolo decisivo, questo perché i circuiti possono contenere fluidi frigorigeni pericolosi e componenti che lavorano in condizioni variabili di pressione e temperatura. Per tali ragioni, il corretto dimensionamento dei dispositivi di sicurezza, in particolare delle valvole di sicurezza, è fondamentale per garantire l'esercizio in sicurezza. A questo scopo, le norme UNI EN ISO 24664 e UNI EN ISO 4126 rappresentano i principali riferimenti tecnici utilizzabili.
Un gruppo frigorifero comprende normalmente compressori, condensatori, evaporatori, accumulatori, valvole di laminazione e serbatoi ausiliari, tutti collegati da un circuito chiuso in cui il fluido frigorigeno cambia più volte stato. Ciascun componente può trovarsi esposto a condizioni di sovrapressione dovute a blocchi meccanici, ostruzioni, mancanza di alimentazione, esposizione diretta ad agenti esterni o a particolari fenomeni transitori tipici del ciclo frigorifero.
I due principali riferimenti normativi adottano approcci diversi: La UNI EN ISO 24664 si applica agli impianti di refrigerazione e alle pompe di calore che utilizzano fluidi frigorigeni, con particolare attenzione ai circuiti in pressione e ai dispositivi che devono prevenire situazioni di sovrapressione. La norma riguarda i sistemi dotati di compressori meccanici e copre sia gli impianti industriali sia le macchine frigorifere impiegate in processi produttivi o in strutture civili. La UNI EN ISO 4126, invece, fornisce criteri generali sul comportamento dei dispositivi di sicurezza, lasciando al progettista il compito di definire gli scenari applicativi più appropriati.
In questo documento abbiamo confrontato tali normative per approfondirne le differenze e valutare l'applicabilità dell'una o dell'altra agli impianti frigo. Inoltre, è stata esaminata la normativa antecedente alla UNI EN ISO 24664 (ovvero la UNI EN 13136) per analizzare l'evoluzione tecnica intercorsa e la norma EN 378-2 che tratta alcuni aspetti legati ai requisiti di sicurezza di tali sistemi.

1. Descrizione dei gruppi frigo e loro sistemi di sicurezza

Un gruppo frigorifero può essere descritto, in termini pratici, come una macchina che sottrae calore da un ambiente o da un processo per trasferirlo altrove. Il

funzionamento è basato su un circuito chiuso nel quale il fluido frigorigeno cambia più volte stato durante il ciclo. I componenti principali sono:

- Compressore, che innalza la pressione del gas;
- Condensatore, dove il fluido cede calore e condensa;
- Valvola di laminazione, che riduce la pressione generando la condizione utile all'evaporazione;
- Evaporatore, in cui avviene l'assorbimento del calore;
- Tubazioni, serbatoi, ricevitori e accumulatori, che fungono da volumi di compensazione o separazione del liquido.

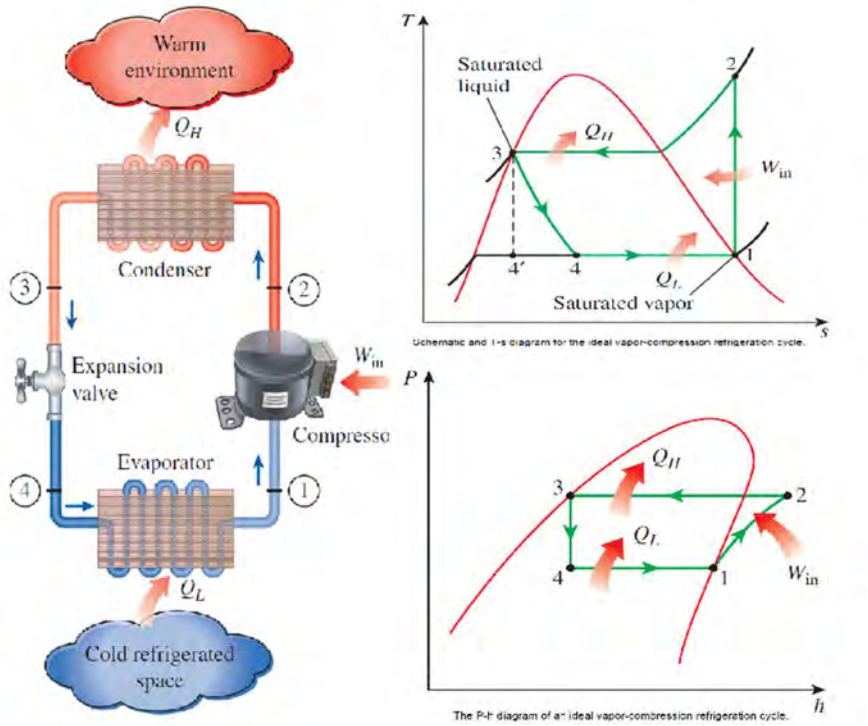


Figura1. Schema e curva caratteristica del ciclo frigorifero

Questi impianti trovano applicazione in numerosi settori: industria alimentare, logistica del freddo, chimica, farmaceutica, stabilimenti di trasformazione, oltre che in edifici commerciali e infrastrutture dove è necessario mantenere condizioni termiche controllate. Le configurazioni possono variare molto e, in alcuni casi, lavorare in condizioni impegnative o con ambienti non costanti. A protezione del circuito contro la sovrapressione si utilizzano principalmente valvole di sicurezza.

2. Tipologie di calcolo della capacità di scarico richiesta dalle parti di un sistema di refrigerazione (UNI EN 13136:2013 e UNI EN ISO 24664)

La norma UNI EN ISO 24664, a differenza di altre normative paragonabili come la UNI EN ISO 4126, non si limita a fornire formule per il dimensionamento delle valvole di sicurezza, ma tratta i principali eventi che possano generare un aumento di pressione

interno al sistema e va quindi a dimensionare, in funzione di tali scenari, le portate da smaltire (portate di carico).
Di seguito verranno trattate le analisi delle sicurezze in termini di rischio superamento dei limiti massimi di pressione, gli scenari analizzati dalla norma UNI EN ISO 24664 sono i seguenti:

- Aumento di pressione causato da fonti di calore:
  - Fonti di calore esterne;
  - Fonti di calore interne;
- Aumento di pressione causato da compressore;
- Aumento di pressione causato da intrappolamento di liquido;

Di seguito verrà analizzata ciascuna tipologia di calcolo e le casistiche di utilizzo di ogni formula.

3. Aumento di pressione causato da fonti di calore – Fonti di calore esterne

L'aumento di pressione causato da fonti di calore esterne è il caso più comune e presente negli impianti di refrigerazione. Tale fenomeno si verifica quando viene trasferita energia termica dall'ambiente o da una fonte di calore esterna all'attrezzatura stessa; le principali cause che provocano questo scenario sono: l'incendio esterno, irraggiamento, temperatura ambiente elevata.
La norma prevede al paragrafo 6.2.1 una formula per il calcolo della portata massica generata dall'espansione del fluido contenuto in un'attrezzatura causato da fonti di calore esterne:

$$Q_{m,required} = 3600 \cdot \Phi \cdot \frac{A_{surf}}{\Delta h_{vap}} \quad (1)$$

I dati della formula sono:

- L'area superficiale dell'attrezzatura esposta a calore (A_{surf}):
  - In caso di analisi conservativa può essere considerata tutta la superficie.
- Un coefficiente di trasferimento termico (ϕ):
  - La norma prevede un valore standard pari a 10 kW/m^2, ma che può essere sostituito da un valore più elevato.
  - In caso di presenza di isolamento termico con spessore (s) superiore a 0,04 m il valore del coefficiente di trasferimento termico può essere ridotto grazie alla presenza della formula seguente:

$$\Phi_{red} = \Phi \cdot \frac{0{,}04}{S} \quad (2)$$

- L'entalpia di vaporizzazione (Ah_{vap}) relativa al fluido refrigerante utilizzato dall'attrezzatura:
  - Tale valore deve essere calcolato alle condizioni di P_0 ($1{,}1 \times P_{set} + P_{atm}$) come indicato al comma 5) della norma stessa.

4. Aumento di pressione causato da fonti di calore – Fonti di calore interne

L'aumento di pressione causato da fonti di calore interne è riconducibile al malfunzionamento di specifici componenti dell'impianto. In questi scenari, l'anomalia

genera un errore di processo che incrementa l'apporto energetico all'interno del sistema, determinando la sovrappressione.
La norma prevede al paragrafo 6.2.2 una formula che permette il calcolo della portata generata dall'espansione del fluido contenuto in un'attrezzatura causato da fonti di calore interno.
Di seguito la formula presente nella norma UNI EN 24664:

$$Q_{m,required} = \frac{3600 \cdot Q_h}{\Delta h_{vap}} \quad (3)$$

I dati della formula sono:
- Massima potenza termica e/o elettrica del compressore/riscaldatore (Q_h);
- Entalpia di vaporizzazione:
  - Relativa al fluido refrigerante utilizzato alle condizioni di P_0 ($1{,}1xP_{set}+P_{atm}$) come indicato al comma 5) della norma stessa.

Intrappolamento di liquido
L'intrappolamento di liquido è un fenomeno più frequente nei sistemi frigoriferi diretti rispetto agli impianti indiretti di piccole dimensioni (dove il refrigerante raffredda un fluido secondario, come acqua glicolata). Tale criticità si manifesta quando il refrigerante allo stato liquido viene isolato tra due organi di intercettazione; l'apporto di calore dall'ambiente esterno verso questa sezione chiusa ne provoca l'espansione termica e la conseguente evaporazione in un volume confinato. In assenza di uno sfogo o di uno spazio di espansione, si genera un rapido e pericoloso aumento della pressione.
Per verificare la capacità del dispositivo di sicurezza a smaltire tale portata la norma prevede il seguente calcolo:

$$A_{actual} \cdot K_{dr} \geq K_{volume} \cdot V_{trapped} \quad (4)$$

I dati della formula sono:
- Area dell'orifizio del dispositivo di sicurezza (A_{actual});
- Coefficiente di scarico ridotto del dispositivo di sicurezza (Kdr);
- Coefficiente da normativa K_{volume}:
  - Pari a 0,02 mm^2/L (quasi totalità dei casi) o 0,04 mm^2/L per i refrigeranti con differenza tra $T_{scarico}$ e $T_{critica} \leq 20K$;
- Volume di liquido intrappolato ($V_{trapped}$);

5. Aumento di pressione causato da compressore

L'aumento di pressione causato dal compressore del gruppo (elemento che energizza il fluido) si verifica più comunemente in due scenari di errore:

- Errata manovra: Il personale manutentore/operante effettuando manutenzione isola una parte del circuito mentre il compressore è in marcia;
- Malfunzionamento condensatore: Il gas refrigerante caldo in uscita dal compressore non riesce ad essere condensato completamente a causa di un malfunzionamento del condensatore.

In entrambi i casi sopracitati l'errore provocherebbe un aumento di pressione nella zona di mandata del ciclo frigo (dall'uscita della macchina fino alla valvola laminatrice) pertanto tale analisi impatta principalmente gli accessori di sicurezza di tale sezione. La formula per ricavare la portata massima del compressore è la seguente:

$$Q_{m.required} = 60 \cdot V \cdot n \cdot \rho \cdot \eta_v \quad (5)$$

I dati della formula sono:

- Volume teorico spostato all'interno del compressore (V);
- Numero di giri del compressore (n);
- Densità del fluido refrigerante (ρ):
  - Calcolato alle condizioni massime di aspirazione dichiarate dal costruttore della macchina;
- Rendimento volumetrico (η_v);

Nel caso in cui sia nota portata volumetrica del compressore può essere scelto di procedere con un approccio generico (esempio quello che viene utilizzato su altri impianti nei quali viene utilizzata la UNI EN ISO 4126), cioè moltiplicare la portata volumetrica per la densità del fluido:

$$Q_{m.required} = Q_v \cdot \rho \quad (6)$$

Paragonando i due metodi descritti emerge che c'è una differenza sostanziale dettata dalle condizioni termodinamiche a cui ricavare la densità:

- UNI EN 24664: densità alle condizioni di aspirazione massime dichiarate dal costruttore della macchina;
- Caso generico (es. UNI EN ISO 4126): valutazione del progettista.

Tale aspetto non va sottovalutato in quanto la UNI EN 24664 da delle indicazioni più precise e quindi attenendosi a tale normativa si riduce nettamente il margine di errore sulla valutazione dei sistemi di sicurezza.

6. Calcolo valvola di sicurezza ai sensi della norma UNI EN ISO 24664

La norma UNI EN ISO 24664 prevede il calcolo della valvola di sicurezza considerando la portata massica di gas che può attraversare una valvola di sicurezza. La formula da utilizzare è la seguente:

$$\dot{Q}m, relief = 1{,}1384 \cdot A \cdot K_{dr} \cdot K_{cap} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \quad (7)$$

UNI EN 24664		
Simbolo	Descrizione	Unità di misura
A	Minima sezione di passaggio	mm^2
Q_m	Portata massica	kg/h
P_0	Pressione di scarico	barA
K_{dr}	Coefficiente di scarico corretto (0,9 x Kd)	/
v_0	Volume specifico di vapore nella linea di ingresso	m^3/kg

UNI EN 24664		
k_{cap}	Coefficiente di capacità corretto	/

Tabella 1. Nomenclatura norma UNI EN ISO 24664

Annex A, B, C, D

Oltre ai criteri per i dimensionamenti descritti in precedenza, la norma UNI EN ISO 24664 fornisce una serie di allegati utili per i vari dimensionamenti. Di seguito si analizza il contenuto di ciascuno.

Annex A

L'Annex A, che è di tipo normativo, fornisce i valori dei fattori e proprietà dei refrigeranti, utili per i calcoli di dimensionamento.

Tali dati sono indispensabili per calcolare, ad esempio, le portate massiche e di scarico, poiché nelle formule di dimensionamento vengono richiesti parametri accurati dei fluidi refrigeranti.

In sostanza l'Annex A è una tabella di riferimento dalla quale prendere i valori per dimensionare correttamente i dispositivi di sovrappressione.

Annex B

L'Annex B, che è di tipo informativo, descrive come calcolare l'area di efflusso nel caso in cui il fluido refrigerante da scaricare sia liquido che vaporizza (flashing fluid) oppure sia liquido che però non vaporizzi.

Sulla base del tipo di fluido, pertanto l'Annex B, guida su come dimensionare il dispositivo di scarico considerando, appunto, la reale condizione del fluido.

Annex C

L'Annex C, che è di tipo informativo, offre un esempio di dimensionamento completo andando a determinare la portata richiesta considerando le perdite in pressione lungo le tubazioni ed inoltre verifica che l'impianto di esempio risulti essere dimensionato correttamente.

Tale allegato, seppure di tipo informativo, è molto utile in quanto offre caso di studio che aiuta progettisti di impianto nell'utilizzare le formule corrette per un contesto reale.

Annex D

L'Annex D, che è di tipo normativo, affronta il caso critico e particolare nel quale durante lo scarico, la velocità del fluido refrigerante superi la velocità del suono; fenomeno detto chocked flow.

In questo caso, non possono essere utilizzate le formule standard di dimensionamento, ma è necessario seguire le equazioni supplementari indicate per poter dimensionare correttamente i dispositivi di sovrappressione.

In tale allegato sono indicate infatti regole specifiche per garantire che in condizioni di grande portata o rapido rilascio, sia le valvole di sicurezza che le tubazioni assicurino che lo scarico avvenga senza pericoli di sovrapressione residua, ristagni, o stress meccanici rilevanti.

Gli allegati (A-D) integrano la norma UNI EN ISO 24664, garantendo la corretta selezione dei dispositivi di protezione contro le sovrappressioni negli impianti di

refrigerazione e nelle pompe di calore, anche in condizioni operative critiche o estreme

7. Normativa EN 378-2

Per quanto riguarda gli impianti di refrigerazione e pompe di calore, è presente un'altra normativa che regola i requisiti di sicurezza e ambientali la EN 378-2.
Al paragrafo 6.2.2.3 della norma viene fornita un'importante indicazione sui dispositivi di limitazione della pressione: è infatti consentita l'installazione di valvole di sicurezza tarate a una pressione superiore alla PS delle attrezzature, a condizione che tale scenario sia limitato ai soli effetti di un incendio esterno. Questo principio è ripreso al paragrafo 6.2.5.1, armonizzato al punto 2.10 della Direttiva PED 2014/68/UE, che definisce le condizioni di intervento degli accessori di sicurezza in base alle seguenti cause:

- Cause prevedibili: Per cause prevedibili (es. errore di manovra) il limite massimo della pressione interna non deve essere maggiore o uguale al 10% in più della pressione massima ammissibile di tale parte;
- Indicazione in linea col punto 2.10 della Direttiva PED che permette un esercizio temporaneo ad un valore di pressione superiore alla PS fino ad un massimo del suo 10%.
- Causa incendio esterno: Il limite di 10% della pressione massima ammissibile non ha valore, per tale motivo la pressione può raggiungere valori superiori. Questa condizione risulta valida solo se la rispettiva parte dell'impianto di refrigerazione sia progettata al fine di soddisfare i requisiti di limitazione dei danni dovuti a tale diversa taratura; in ogni caso il fabbricante dovrà dimostrare un livello di protezione adeguato effettuando calcoli e prove.

È quindi importante valutare l'evento per cui la valvola di sicurezza è installata in quanto la EN 378-2 da più flessibilità al valore di taratura.

8. Confronto tra UNI EN 13136 e UNI EN ISO 24664

Essendo la UNI EN 13136 il predecessore della UNI EN ISO 24664, si è proceduto a un'analisi comparativa per valutare l'evoluzione del quadro normativo relativo alla gestione degli accessori di sicurezza negli impianti frigoriferi. La distinzione principale risiede nel passaggio da una dimensione europea a una internazionale (ISO). Gli aggiornamenti mirano a una maggiore chiarezza e alla semplificazione di alcuni passaggi procedurali, pur introducendo lievi variazioni nei valori di riferimento all'interno delle formule di calcolo:

Differenze	**UNI EN 13136**	**UNI EN ISO 24664**
Valore di densità calcolo errata manovra (6.3)	Densità del vapore alla pressione di saturazione/al punto di rugiada del refrigerante a 10°C	Densità alle massime condizioni di aspirazione del compressore

Caso aumento di pressione nello scenario di intrappolamento liquido	Non era presente una formula che indicava il calcolo da effettuare	Presente formula per la valutazione di tale rischio.
Formule calcolo capacità di scarico valvole di sicurezza	Presenti coefficienti di fluido C, K_b da Annex A	Non presenti coefficienti C e K ma presente unico coefficiente K_{cap} da Annex A

Tabella 2: Differenze tra normativa UNI EN 13136 e UNI EN ISO 24664

9. Descrizione UNI EN ISO 4126

La norma UNI EN ISO 4126, armonizzata alla direttiva PED, rappresenta la norma di riferimento per quanto riguarda il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza all'interno della comunità europea.
Suddivisa in 10 parti, fornisce tutti gli elementi necessari per la selezione, il dimensionamento e l'installazione degli accessori di sicurezza. In particolare dei dispositivi di scarico e di valvole di sicurezza destinati a proteggere apparecchiature dal rischio di sovrappressione.

10. Campo di applicazione

La norma UNI EN ISO 4126 si applica alle valvole di sicurezza aventi almeno un diametro della sezione di passaggio pari a 4 mm e una pressione relativa di taratura uguale o superiore a 0,1 bar. Non è presente invece alcuna limitazione relativamente alla temperatura.
Inoltre, la 4126 si può applicare a tutti i settori industriali, indipendentemente dalla tipologia di fluido contenuto.
Difatti si può considerare una norma trasversale, in quanto trova applicazione in impianti industriali, apparecchiature in pressione, impianti di riscaldamento e linee di processo dove si eserciscono apparecchiature contenenti fluidi allo stato liquido, gassoso o bifase. Pertanto tale riferimento normativo può essere preso in considerazione anche per valvole di sicurezza installate su impianti contenenti un ciclo frigorifero.

11. Confronto tra UNI EN ISO 24664 e UNI EN ISO 4126

La norma UNI EN ISO 4126, come descritto in precedenza, risulta essere generica, in quanto non è specifica per un particolare impianto o fluido.
Non si occupa pertanto di come calcolare la portata di scarico o la specifica selezione dei dispositivi di sicurezza come visto invece nella norma UNI EN ISO 24664 per gli impianti refrigeranti.
Alla luce di ciò, dato che la UNI EN ISO 4126 non trova esclusione dall'applicazione su impianti frigo, procediamo al confronto tra le norme al fine di validare quanto presente alla nota 3 del paragrafo 7.3 della UNI EN ISO 24664, cioè che le formule relative al calcolo della portata smaltita dalle valvole di sicurezza sono analoghe.
Calcoli di scarico

Di seguito analizziamo il dimensionamento di una valvola di sicurezza destinata allo scarico di un gas ideale alla portata critica. Si fa presente che è possibile raggiungere tale condizione se:

$$\frac{P_b}{P_o} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{k}{k-1}\right)} \qquad (8)$$

Ai sensi della UNI EN ISO 4126 la portata massica viene calcolata tramite la seguente formula:

$$\dot{Qm} = p_0 \cdot C \cdot A \cdot K_{dr} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} = 0{,}2883 \cdot C \cdot A \cdot K_{dr} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \qquad (9)$$

Invece, nel dimensionamento secondo la UNI EN ISO 24664 viene considerata la portata massica di gas che può attraversare una valvola di sicurezza. La formula da utilizzare è la seguente:

$$\dot{Qm}, relief = 1{,}1384 \cdot A \cdot K_{dr} \cdot K_{cap} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \qquad (10)$$

UNI EN ISO 4126		
Simbolo	Descrizione	Unità di misura
A	Minima sezione di passaggio	mm^2
Q_m	Portata massica	kg/h
P_0	Pressione di scarico	barA
C	Coefficiente di comprimibilità	/
K_{dr}	Coefficiente di scarico corretto (0,9 x Kd)	/
M	Massa molare	kg/kgmol
Z	Fattore di comprimibilità alla press. e temp. di scarico	/
T_o	Temperatura di scarico	K
P_b	Contropressione	barA
P_c	Pressione critica	barA

Tabella 3. Nomenclatura norma UNI EN ISO 4126

UNI EN ISO 24664		
Simbolo	Descrizione	Unità di misura
A	Sezione di passaggio	mm^2
$Q_{m,relief}$	Portata massica calcolata del refrigerante del dispositivo di scarico della pressione	kg/h
p_0	Effettiva pressione di scarico assoluta	barA
v_0	Volume specifico di vapore nella linea di ingresso	m^3/kg
K_{dr}	Coefficiente di scarico corretto (0,9 x K_d)	/
k_{cap}	Coefficiente di capacità corretto	/

Tabella 4. Nomenclatura norma UNI EN ISO 24664

Nel paragrafo 7.1 della norma UNI EN ISO 24664 viene specificato che le due formule di dimensionamento sono analoghe e danno lo stesso risultato.
Di seguito si dimostra il perché, andando ad analizzare come le due formule si possono considerare equivalenti.
Si mettono in equivalenza, appunto, le due formule di dimensionamento:

$$0{,}2883 \cdot C \cdot A \cdot K_{dr} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} = 1{,}1384 \cdot A \cdot K_{dr} \cdot K_{cap} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \quad (11)$$

Semplificando le due formule, si ha che:

$$0{,}2883 \cdot C = 1{,}1384 \cdot Kcap \quad (12)$$

Da cui ricaviamo:

$$C = \frac{1{,}1384}{0{,}2883} \cdot K_{cap} \sim 3{,}948 \cdot K_{cap} \quad (13)$$

Nella norma UNI EN ISO 24664 è riportata la seguente formula per ricavare kcap:

$$K_{cap} = \sqrt{\gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (14)$$

Dove γ è il rapporto di capacità termica.
Nella norma UNI EN ISO 4126-7, C si ricava con la seguente formula:

$$C = 3{,}948 \cdot \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k + 1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (15)$$

Dove k è l'esponente isoentropico alla pressione e alla temperatura di scarico.
Per un gas ideale sappiamo che γ e k si equivalgono e corrispondono al rapporto tra il calore specifico a pressione costante ed a volume costante, come da formula di seguito:

$$k = \gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (16)$$

Inoltre, sia C che Kcap si possono ricavare in funzione di k e γ in base ai valori riportati rispettivamente all'interno del prospetto 3 della norma UNI EN ISO 4126-7 ed all'interno della tabella A.1 dell'Annex A della norma UNI EN ISO 24664.
Si può dunque evincere che i dimensionamenti risultino essere equivalenti, visto che i due termini fondamentali dell'equazione (C e Kcap) variano in base alla stessa variabile.

12. Caso pratico UNI EN 13136, UNI EN ISO 24664 e UNI EN ISO 4126

Come emerso nei capitoli precedenti le normative analizzate hanno formule analoghe circa il dimensionamento delle valvole di sicurezza, quello che cambia sono le analisi a monte, cioè la valutazione della portata da considerare per il dimensionamento degli accessori di sicurezza (portata di carico).

A tal proposito eseguiamo una simulazione di un caso pratico, il calcolo di dimensionamento in caso di errata manovra di un compressore, nel quale a parità di impianto ipotizzeremo metodologie di approccio normativo differente al fine di approfondire le eventuali differenze.

Il caso in oggetto è relativo ad un impianto frigorifero esercito con R410a, avente un compressore con portata volumetrica dichiarata dal fabbricante di 216 m^3/h con valvola di sicurezza in mandata tarata a 35 barg e valvola di sicurezza in aspirazione tarata a 24,5 barg.

Di seguito sarà effettuato un confronto tra le formule delle normative esaminate (UNI EN 13136, UNI EN ISO 24664, UNI EN ISO 4126):

Eccesso di pressione causato dai compressori (par 6.3)		UNI EN 13136	UNI EN ISO 24664	UNI EN ISO 4126		
					[U.M.]	**RIF.**
Volume teorico:	V	0,001	0,001	0,001	m^3	
Numero di giri:	n	3600	3600	3600	min^{-1}	
Rendimento volumetrico	ηv	1	1	1	-	
Portata volumetrica	q	216,00	216,00	216,00	m^3/h	Datasheet
Densità del vapore saturo (R410a a 10 °C)	ρ	41,74	41,74	41,74	kg/m^3	Diagramma P-h
Volume specifico	v_0	0,004741	0,004741	0,004741	m^3/kg	Diagramma P-h
Portata da scaricare	Q_{md}	**9015,84**	**9015,84**	**9015,84**	kg/h	
Calcolo Area minima di scarico						
Pressione di Taratura	p_{SET}	35	35	35	barg	
Coefficiente di scarico, K o Kd:	K_d	0,83	0,83	0,83	-	
Coefficiente di scarico ridotto, Kdr:	K_{dr}	0,75	0,75	0,75	-	
Esponente isoentropico, k:	k	1,17	1,17	1,17	-	Prospetto 2
Coefficiente, C:	C	2,537	2,537	2,537	-	Prospetto 2

Contropressione a valle della valvola (ATM)	p_B	1,01	1,01	1,01	bara	
Po:		39,51	39,51	39,51	bara	
Pb/Po:		0,03	0,03	0,03	<	0,570
Kcap		-	0,64	-		Tab A.1
Il flusso è		CRITICO	CRITICO	CRITICO		
Coefficiente	K_b	1,00	1,00	1,00		
Areo Orifizio	A tot	298	298	298	mm^2	Scheda Tecnica
Area min di scarico	A_c tot	180,75	181,46	180,76	mm^2	
Portata di scarico	Q_m tot	14864,32	14805,74	14863,48	kg/h	

Tabella 6. Confronto dimensionamento valvole di sicurezza tra normative (esempio 1)

Come si evince dalla tabella le aree minime di scarico sono pressoché identiche nonostante l'utilizzo di norme differenti.
Di seguito sarà effettuato un confronto relativo alle condizioni da assumere per il valore di portata che la valvola di sicurezza deve smaltire (UNI EN 13136, UNI EN ISO 24664, UNI EN ISO 4126). Il valore di portata viene calcolato in base alla densità del fluido indicata dalla normativa di riferimento, questo confronto ha lo scopo di sottolineare le differenze relative al calcolo della portata di carico (ρ_{10}, ρ_{asp}, ρ_{psvasp}):

Eccesso di pressione causato dai compressori (par 6.3)		UNI EN 13136	UNI EN ISO 24664	UNI EN ISO 4126		
					[U.M.]	**RIF.**
Volume teorico:	V	0,001	0,001	0,001	m^3	
Numero di giri:	n	3600	3600	3600	min^{-1}	
Rendimento volumetrico	ηv	1	1	1	-	
Portata volumetrica	q	216,00	216,00	216,00	m^3/h	Datasheet
Densità del vapore saturo ρ_{10}, $\rho_{asp\ (7°C)}$, $\rho_{psvasp\ (24,5\ barg)}$	ρ	41,74	38,04	104,60	kg/m^3	Diagramma P-h
Volume specifico	v_0	0,004741	0,004741	0,004741	m^3/kg	Diagramma P-h
Portata da scaricare	Q_{md}	**9015,84**	**8216,64**	**22593,60**	kg/h	
Calcolo Area minima di scarico						
Pressione di Taratura	p_{SET}	35	35	35	barg	
Coefficiente di scarico, K o Kd:	K_d	0,83	0,83	0,83	-	
Coefficiente di scarico ridotto, Kdr:	K_{dr}	0,75	0,75	0,75	-	

Esponente isoentropico, k:	k	1,17	1,17	1,17	-	Tab A.1
Coefficiente, C:	C	2,537	2,537	2,537	-	Tab A.1
Contropressione a valle della valvola (ATM)	p_B	1,01	1,01	1,01	bara	
Po:		39,51	39,51	39,51	bara	
Pb/Po:		0,03	0,03	0,03	<	0,570
Kcap		-	0,64	-		
Il flusso è		CRITICO	CRITICO	CRITICO		
Coefficiente	K_b	1,00	1,00	1,00		
Areo Orifizio	A tot	298	298	298	mm^2	Scheda Tecnica
Area min di scarico	A_c tot	180,75	165,38	452,98	mm^2	
Portata di scarico	Q_m tot	14864,32	14805,74	14863,48	kg/h	

Tabella 7. Confronto dimensionamento valvole di sicurezza tra normative (esempio 2)

Come si evince dalla tabella c'è una netta differenza nei calcoli delle portate da scaricare delle tre normative, questo perché ogni norma da riferimenti differenti sulla densità da considerare:

- La UNI EN ISO 24664 indica come valore di riferimento la densità alle condizioni massime di aspirazione della macchina, è il caso più realistico e di conseguenza con valore inferiore.
- La UNI EN 13136 indica come valore di riferimento la densità alle condizioni di aspirazione della macchina a 10°C, tale approccio dà come risultato un valore non molto distante dal caso descritto in precedenza.
- La UNI EN ISO 4126 non dà indicazioni relative alle condizioni termodinamiche del fluido, tale scelta è totalmente demandata al progettista. Per tale ragione possono essere scelte varie soluzioni; nel caso attuale abbiamo ipotizzato lo scenario più conservativo, cioè le condizioni di aspirazione dettate dal set dagli accessori di sicurezza (pressione 24,5 barg e temperatura da curva limite superiore).

13. Conclusioni

Come si è dimostrato, il confronto tra i riferimenti normativi UNI EN ISO 24664 e UNI EN ISO 4126 mostra come il primo fornisca criteri specifici e scenari di progetto mirati alle dinamiche del ciclo frigorifero, mentre il secondo offra un quadro generale centrato sulle prestazioni del dispositivo.

Le normative hanno formule analoghe per il calcolo della massima portata smaltita dalle valvole di sicurezza, ciò che differisce sono gli aspetti legati alla valutazione dei rischi di impianto. Se nella UNI EN ISO 4126 è un'analisi totalmente demandata al progettista, sia la valutazione dei rischi sia il calcolo delle portate di carico di ogni scenario di rischio, nella UNI EN ISO 24664 sono indicate le principali situazioni di rischio e vengono forniti i calcoli per la determinazione delle portate da smaltire.

Bibliografia

[1] UNI EN ISO 24664:2025 - Impianti di refrigerazione e pompe di calore - Dispositivi di limitazione della pressione e relative tubazioni - Metodi di calcolo;

[2] UNI EN 13136:2013 - Impianti di refrigerazione e pompe di calore - Dispositivi di limitazione della pressione e relative tubazioni - Metodi di calcolo;

[3] UNI EN ISO 4126-1:2019 - Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrapressioni - Parte 1: Valvole di sicurezza

[4] UNI EN ISO 4126-7:2016 - Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrapressioni - Parte 7: Dati comuni;

[5] UNI EN 378-2:2017 - Sistemi di refrigerazione e pompe di calore - Requisiti di sicurezza e ambientali - Parte 2: Progettazione, costruzione, prova, marcatura e documentazione;

[6] Pagine da ISE EBook Online Access for Thermodynamics- An Engineering -- Yunus A. Çengel; Michael A. Boles; Mehmet Kanoglu -- (WeLib.org).

Integrità strutturale di un reattore non pressurizzato in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) – aspetti principali e analisi del caso studio

D. Di Fonzo[1], G. Augugliaro[2], F. Delli Quadri[3], R. Marrazzo[3], F. Vazzana[3], V. Bartolozzi[4]

[1]Inail - Uot di Palermo
[2]Inail – Dit
[3]ISPRA – Roma
[4]ARPA - Sicilia

Sommario
Questo articolo, attraverso l'analisi dei fattori gestionali che hanno causato un incidente occorso di recente in Italia, si propone di esporre le principali criticità relative all'esercizio in sicurezza, di un reattore in polimero rinforzato con fibra di vetro (GRFP) e più in generale delle apparecchiature "critiche" in materiale composito, le procedure di monitoraggio e controllo dell'invecchiamento, in conformità alla normativa Seveso. Vengono inoltre analizzati gli standard generali di prodotto e di processo per le riparazioni in composito, essenziali per la stesura di specifiche tecniche e applicative. Più specificamente, vengono evidenziati numerosi fattori critici (ad esempio, rapporto di miscelazione resina-indurente, rapporto volumetrico resina-fibra, tipo e direzione delle fibre del tessuto, procedure di impregnazione, tecnologie di polimerizzazione, prove distruttive e CnD dopo la polimerizzazione), da cui dipendono il comportamento elastico e la resistenza meccanica finale di una riparazione utilizzando materiali compositi innovativi. Nel particolare questo articolo analizza un cedimento strutturale catastrofico di un reattore di lisciviazione in *GFRP*, utilizzato in un impianto per la produzione di una soluzione per celle elettrolitiche. Gli insegnamenti tratti dall'incidente riguardano principalmente cause organizzative/gestionali e focalizzano l'attenzione sul tipo di materiale coinvolto nel cedimento catastrofico, il *GRFP*, evidenziando che può essere ispezionato con sufficiente affidabilità solo da esperti professionisti del settore e utilizzando diverse tecniche specifiche e idonei controlli non distruttivi *NDT.* Vengono forniti elementi sulle procedure di monitoraggio e controllo per l'invecchiamento dei contenitori in GFRP.

1. L'incidente – caso studio

L'evento di riferimento per il presente lavoro è un caso incidentale occorso nel 2024 in Italia, consistito nella rottura catastrofica di un reattore in GRFP, con fuoriuscita di soluzione acida nel bacino di contenimento. L'evento non ha avuto conseguenze su persone e ambiente.

1.1.1 Dinamica ed apparecchiatura coinvolta

La rottura catastrofica ha interessato il reattore di lisciviazione dell'impianto "linea zinco" di uno stabilimento Seveso, durante la reazione chimica in corso.
Le principali fasi di processo dell'impianto consistono nella miscelazione di una soluzione elettrolitica acquosa a base di H_2SO_4 a pH 2,5 contenente zinco, e nella successiva fase di reazione chimica. La rottura si è verificata nella zona del passo d'uomo, perpendicolare al generatore a cilindro verticale, causando il distacco del corpo del reattore dalla sua base e il conseguente rilascio del prodotto sia nel bacino di contenimento sia in area pavimentata collegata alla fognatura industriale, che convoglia le acque all'impianto trattamento effluenti di stabilimento, presso cui successivamente è stato trattato e reimmesso nel ciclo produttivo. Le figure seguenti mostrano il guasto del reattore (fig.1) e l'area dell'impianto dopo l'evento. (figura 2).



Figura 1. Guasto del reattore della soluzione acida



Figura 2. Area dell'impianto dopo la fuoriuscita della soluzione dal reattore

L'impianto è rimasto in esercizio, con l'operatività garantita grazie all'intervento del reattore gemello al reattore origine dell'evento, messo in bypass. La sostanza coinvolta, soluzione elettrolitica acquosa a base di acido solforico a pH 2.5 contenente zinco" (CAS: 69012-24-4), è classificata E1 (H400-H410). Il quantitativo direttamente coinvolto è stato di 80 t, superiore alla soglia del 5% ex all.6, parte I, punto 1 del D. Lgs. 105/15, classificando l'evento come 'rilevante' sensu Seveso.

1.1.2 Cause

La causa diretta è la rottura del fasciame conseguente all'indebolimento della struttura del reattore, dovuto alla rottura dei molteplici filamenti presenti all'interno della struttura della vetro-resina (fibre di vetro) in un'area localizzata al di sotto della flangia del passo d'uomo. Sul reattore era stata svolta una attività di controllo biennale visiva, spessimetrica e termografica (maggio 2022), che non aveva evidenziato una cricca, poi riscontrata 4 mesi dopo in occasione della modifica di inserimento del passo d'uomo, quest'ultimo realizzato anche per circoscrivere il danneggiamento ed eliminare la cricca in oggetto, presumibilmente non eliminata in

maniera completa. Nell'occasione della modifica, il gestore ha comunque svolto i controlli di qualità (visivi) sul lavoro eseguito, e la frequenza biennale dei controlli era stata mantenuta anche a seguito della modifica, con scadenza del successivo controllo a maggio 2024, ovvero 3 mesi dopo l'evento.
La causa di radice è individuata nella mancata efficacia dei controlli periodici del reattore, e dei controlli di qualità sull'intervento di riparazione (installazione passo d'uomo), per il caso specifico di lesioni alle fibre di vetro sui manufatti in vetroresina. Tale mancata efficacia è legata sia alla frequenza e tipologia dei controlli, sia anche al fatto che i controlli sono stati svolti da personale aziendale non in possesso dell'adeguata preparazione ed esperienza per tale ambito, e da personale di ditta terza non supportata da specifici standard tecnici di settore per i controlli durante la normale operatività (la ditta terza era comunque in possesso dei requisiti previsti dalla procedura del SGS-PIR e dallo standard di riferimento EN 13121/3 del 2016, valido tuttavia per la sola progettazione dei manufatti in vetroresina e per i controlli a valle dell'installazione, ma non per l'esercizio degli stessi). Inoltre, la mancata validazione degli interventi di riparazione/modifica dei manufatti in vetroresina a cura di un professionista esperto, indipendente rispetto alla ditta che esegue la riparazioni/modifica, con emissione di certificazione di esercibilità dell'apparecchiatura, è stata un ulteriore fattore causale dell'evento incidentale.
Al cedimento del contenimento primario della sostanza pericolosa interessata vanno aggiunti quindi fattori causali legati a errori organizzativi, individuati in addestramento/formazione, supervisione, manutenzione/riparazione, test/ispezione /registrazione dati. Si è ipotizzato che tra i meccanismi di danneggiamento che abbiano potuto dare origine alla rottura dei costituenti fibra-matrice del materiale composito GFRP vi siano nel particolare oltre alle sollecitazioni di esercizio, eventuali altri danneggiamenti dovuti a una impropria attività di manutenzione e/o riparazione. Oltre tali tipici meccanismi di danneggiamento, le particolari condizioni ambientali di esercizio, quali l'assorbimento di acqua e la presenza di agenti corrosivi in soluzione, hanno altresì influenzato il cedimento strutturale del composito. Tali cause di decadimento della resistenza e della rigidezza del materiale hanno successivamente generato sforzi di trazione tali da produrre fenomeni di distacco dell'interfaccia fibra-matrice (debonding) e rottura delle fibre (splitting).

1.2 Azioni correttive e lezioni apprese

Le seguenti misure di prevenzione e mitigazione sono state identificate da parte del gestore:

- Validazione sistematica dell'intervento di riparazione/modifica, a cura di un professionista esperto, indipendente rispetto alla ditta che esegue le riparazioni/modifiche, nel caso di lesioni o modifiche che interessino le fibre di vetro dei manufatti in vetroresina, e contestuale certificazione di esercibilità dell'apparecchiatura.
- Incremento della frequenza dei controlli visivi interni e CND (da 2 anni a 1 anno)

su tutto il parco serbatoi (reattori inclusi) in vetroresina dello stabilimento, in funzione dell'analisi delle condizioni operative. È in corso una valutazione interna circa la scelta delle tecniche di CND più efficaci, ai fini di individuare lesioni alle fibre di vetro sui manufatti in vetroresina. Tale tipologia di materiale non è ispezionabile, con sufficiente grado di affidabilità del risultato, mediante i CND utilizzati attualmente nella pratica di stabilimento.

- Formazione di due Tecnici di Manutenzione interni, in qualità di specialisti in strutture in vetroresina e materiali plastici, al fine di incrementare le competenze in tema di verifica e validazione degli interventi di riparazione e/o modifica dei manufatti in vetroresina.

L'evento è stato classificato come 'rilevante' sensu Seveso per la quantità di sostanza pericolosa ecotossica coinvolta, oltre che per l'interesse tecnico per la peculiarità del materiale del reattore coinvolto, ad oggi ancora soggetto a studi ed approfondimenti sia sul comportamento meccanico in esercizio, sia sul comportamento elastico e la resistenza meccanica finale di una riparazione, sia sulla tipologia di controlli e verifiche, come esposto nei paragrafi che seguono.

3. Elementi sulle procedure di monitoraggio e controllo dell'invecchiamento delle attrezzature in GFRP

L'identificazione e la gestione dei problemi legati all'invecchiamento degli impianti in relazione alla sicurezza di processo sono riconosciute in una serie di sistemi chiave di controllo dei rischi, che devono essere individuati e documentati affinché possano essere regolarmente rivisti e aggiornati. Tra gli elementi chiave figurano:

- Sistemi di gestione della manutenzione
- Sistemi di gestione e integrità degli asset
- Regimi di audit e ispezione
- Processi di gestione della valutazione dei rischi
- Procedure di gestione delle modifiche
- Permessi di lavoro
- Responsabilità e comunicazioni
- Formazione e sviluppo delle competenze

In questo contesto, nell'ambito del controllo operativo, ai sensi degli Allegati 3 e B del D.Lgs. 105/2015, un'Organizzazione deve sviluppare un piano di monitoraggio e controllo (PMC) per "apparecchiature e sistemi tecnici critici", attraverso procedure di manutenzione e di gestione dell'integrità meccanica in modo da garantire che le attrezzature (e in particolare i sistemi di contenimento primari), funzionino in modo sicuro e affidabile, prevenendo i guasti attraverso una combinazione di valutazione dei rischi, ispezioni periodiche e manutenzione proattiva. Attraverso il PMC il gestore deve quindi adottare e applicare procedure e istruzioni che consentono il monitoraggio e il controllo dei rischi legati all'invecchiamento delle attrezzature critiche installate nello stabilimento, rilevando eventuali fenomeni correlati alla corrosione, erosione, fatica, scorrimento viscoso, ecc., riconducibili ai meccanismi di

degrado. Il gestore può adottare standard internazionali o la linea guida invecchiamento. Le strategie chiave (che costituiscono la RBM-Risk Based Maintenance) comprendono l'identificazione dei pericoli, l'utilizzo del monitoraggio basato sulle condizioni, l'attuazione di azioni correttive e il rispetto degli standard di settore durante tutto il ciclo di vita dell'impianto, al fine di prevenire le perdite di contenimento e le conseguenze per i lavoratori, la popolazione e l'ambiente.
Attraverso il suddetto piano, l'operatore può fornire un feedback rapido sull'adeguatezza e l'efficacia delle misure adottate per garantire la gestione in sicurezza di tali apparecchiature e sistemi critici. Il feedback deve essere effettuato rispetto alle condizioni di integrità, funzionalità, affidabilità nel tempo, conformità ai requisiti tecnici e di sicurezza delle attrezzature critiche, e fornito in termini oggettivi, misurabili e periodici. In pratica la valutazione va attuata attraverso indicatori di prestazione, esiti delle verifiche e ispezioni, risultati della manutenzione, segnalazioni di incidenti o quasi incidenti (*near miss*), audit interni o esterni, *trend* nel tempo. Il feedback inoltre deve essere fornito rispetto alle condizioni di integrità, funzionalità, affidabilità nel tempo, conformità ai requisiti tecnici e di sicurezza delle attrezzature critiche. Le attività di ispezione, controllo e manutenzione costituiscono la parte essenziale di un efficace piano di monitoraggio e controllo, in cui l'operatore deve segnalare specificamente la criticità, la tipologia di danno, la tipologia di controllo e ispezione pianificata (tecnica utilizzata), la frequenza e la normativa tecnica applicabile per ciascun sistema critico. Nel caso specifico di compositi GFRP, il comportamento meccanico è quello tipico di un materiale ortogonalmente anisotropo (ortotropo), la cui ricerca delle caratteristiche elastiche (E_L, E_T, G_{LT}, ν_{LT}) del modello teorico, introduce la necessità di considerare i costituenti in assenza di vuoti, gas, solventi, impurità, bolle d'aria, eccesso di resina, precursori di danneggiamenti negli elementi di discontinuità (fibra, matrice e interfaccia fibra-matrice). Il PMC dell'invecchiamento dei compositi GFRP deve includere pertanto anche tali fattori critici che influenzano le caratteristiche meccaniche e le performance del componente riparato. In particolare, durante gli interventi di "ripristino" il comportamento elastico e la resistenza meccanica della struttura riparata dipendono dalla corretta applicazione delle procedure e degli standard di processo di riparazione (Vacuum bag e/o polimerizzazione in Autoclave) e dagli specifici CnD post-riparazione, come specificato in [2].

4. Fattori critici che influenzano il comportamento elastico e resistenza meccanica finale di una riparazione delle attrezzature in GFRP

4.1 Micromeccanica della lamina unidirezionale

Lo studio micromeccanico dei compositi interessa la natura eterogenea delle fasi fibra e matrice e le loro interazioni, consentendo di stimare le principali grandezze ingegneristiche (leggi costitutive) a partire dai singoli costituenti [3, 4, 5].
Il carico totale di trazione P_{1C} applicato alla lamina risulta dalla somma del carico P_f e

P_m sopportato rispettivamente dalle fibre e dalla matrice:

$$P_{1c} = P_f + P_m \quad \text{(kN)}$$

che in termini di tensioni si traduce nella tensione media sulla lamina (regola delle miscele), media delle tensioni presenti su fibre e matrice, pesata secondo le rispettive percentuali in volume:

$$\sigma_{1L} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad \text{(MPa)} \qquad (1)$$

dove V_f e V_m rappresentano rispettivamente la frazione in volume di fibre e matrice nel campione di composito. La (1) definisce la Resistenza a trazione longitudinale della lamina o "Legge della media" o "Regola delle miscele". Per tanto come illustrato in figura 4 e 5, per la sollecitazione di trazione longitudinale, la resistenza sarà massima per un angolo di disassamento fibra-direzione di sollecitazione pari a 0°, minima per il valore dell'angolo pari a 90°. Il modulo di Young longitudinale della lamina (2), obbedisce anch'esso alla "legge della media o regola delle miscele" essendo funzione dei moduli elastici delle fasi (fibra e matrice) presenti e della loro percentuale volumetrica:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{(GPa)} \qquad (2)$$

dove naturalmente è:

$$V_f + V_m = 1$$

La rigidezza in tal caso sarà massima per le fibre a 0°, minima per le fibre a 45° e 90°.

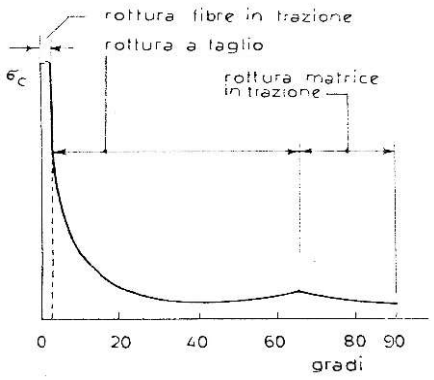


Figura 4. Andamento della resistenza di un composito al variare dell'angolo di disassamento fibra-carico. Fonte: Materiali compositi – I. Crivelli Visconti;

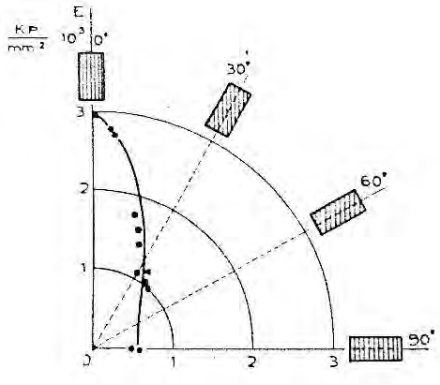


Figura 5. Andamento del valore del modulo di Young di un composito al variare dell'angolazione delle fibre. Fonte: Materiali compositi – I. Crivelli Visconti;

4.1.1 Elementi di discontinuità, meccanismi e tipologie di danneggiamento

Indipendentemente dalla tipologia dei materiali compositi a matrice polimerica *PMC*$_s$ rinforzati con fibre di vetro (*GFRP*), carbonio (*CFRP*) o aramide (*AFRP*), gli elementi sede di discontinuità sono:

- Fibra
- Matrice
- Interfaccia fibra-matrice

I tipici meccanismi di danneggiamento sono:

- sollecitazioni di esercizio (trazione, compressione, taglio, ecc.),
- sollecitazioni cicliche aleatorie (fatica) di natura meccanica, termica,
- impatti da esercizio o manutenzione o uso improprio (Mishandling),
- impatti con oggetti estranei esterni (Foreign Object Damage),
- impatti non visibili in superficie interessanti gli strati interni (Barely Visible Impact Damage),
- condizioni ambientali (temperatura, umidità, raggi U.V., agenti corrosivi, vapore, acqua),

Le tipologie di danneggiamento sono:

- rottura o micro-frattura delle fibre (splitting),
- sfilamento o estrazione delle fibre (pull-out),
- richiamo per osmosi dell'acqua esterna, vescicatura (blistering),
- separazione/distacco fibra-matrice (debonding),
- scollamento degli strati/lamine (delaminazione),
- cricche o microfrattura della matrice.

5. Influenza delle condizioni ambientali su un composito glass-phenolic

Le proprietà meccaniche e il comportamento dei materiali compositi sono fortemente influenzate dalle condizioni ambientali di esercizio quali temperatura, umidità, presenza di agenti corrosivi, vapore, acqua ecc. La presenza di tali fattori genera un decadimento delle proprietà di fibre e matrice e/o della mutua adesione, cosicché ne risulta in genere un decadimento della resistenza e della rigidezza del materiale che sovente è il principale motivo di fuori servizio [4, 5].

5.1 Resistenza delle fibre

La resistenza delle fibre usualmente usate nei compositi è significativamente influenzata da fattori ambientali quali temperatura, umidità e agenti corrosivi. In particolare, per le fibre di vetro si verifica in presenza di umidità o altri agenti corrosivi, una dipendenza della resistenza dal tempo di applicazione del carico (sinergismo tra fattori ambientali e stress). La figura 7 mostra il decadimento della resistenza a trazione delle fibre al variare del tempo di applicazione del carico per diverse temperature di esercizio [4, 5].

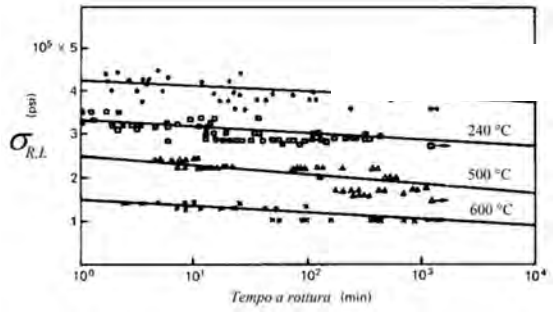


Figura 7. Influenza del tempo di applicazione del carico sulla resistenza delle fibre di vetro
Fonte: Progettazione meccanica con materiali non convenzionali - B. Zuccarello (UNIPA).

5.2 Degrado della matrice

A temperature superiori a quella ambiente (150-200 °C) le matrici polimeriche sono soggette a un processo di degrado termico per volatilizzazione (forma gassosa) di parte del materiale che porta a una diminuzione del peso specifico e a un abbassamento delle caratteristiche meccaniche del materiale. Tali processi di degrado sono caratterizzati da perdite in peso con andamenti nel tempo come quello mostrato in figura 8 per un composito fibra di vetro-resina fenolica. Il campo di temperature superiori a 400 °F (>200 °C) è praticamente riservato ai compositi a matrice metallica [4, 5].

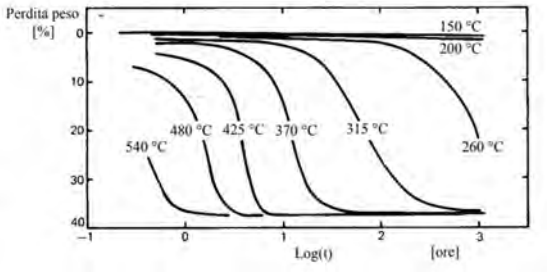


Figura 8. Decomposizione della matrice fenolica in un composito in fibra di vetro
Fonte: Progettazione meccanica con materiali non convenzionali - B. Zuccarello (UNIPA).

Al processo di volatilizzazione del materiale è associata una riduzione della resistenza e dello stesso modulo di Young, come mostrato nella figura 9 per lo stesso composito fibra di vetro-resina fenolica.

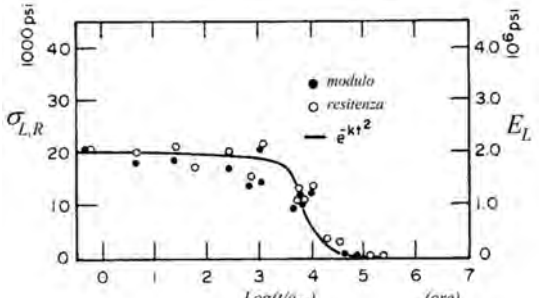


Figura 9. Decadimento della resiste a trazione longitudinale e della rigidezza di un composito in fibra di vetro-resina fenolica

5.2.1 Effetti dell'acqua

L'assorbimento di acqua da parte di un materiale plastico produce un decadimento delle proprie caratteristiche, in modo del tutto simile a quello che si verifica al crescere della temperatura, in quanto l'acqua produce un aumento della duttilità e viscoelasticità della matrice. La diffusione dell'acqua produce nel materiale polimerico rigonfiamenti che generano sforzi tridimensionali di trazione tali da produrre fenomeni di debonding, rottura delle fibre con danneggiamento irreversibile del composito. L'uso per tanto in presenza di sostanze acquose può essere superato con specifiche protezioni, trattamenti superficiali [4, 5].

6. Requisiti sulle tecniche di riparazione cosmetica e strutturale

Si elencano alcuni requisiti generali di un processo di riparazione per laminazione di

parti strutturali in materiale composito, essenziali nella redazione di una specifica tecnico-applicativa:

- Parametri ambientali: 10÷18 °C, umidità ≤ 75% U.R., *water break test*,
- Controllo della data di scadenza delle resine e degli indurenti,
- Resine e indurenti a bassa viscosità ed elevato potere penetrante,
- Rapporto di miscelazione resina/indurente (catalizzatore, accelerante),
- Tempo di utilizzo della miscela resina /indurente,
- Rapporto volumetrico Fibra/Resina,
- Tipologie dei rinforzi: 1D, 2D, mat o feltro, particelle riempitive,
- Procedure applicative e di impregnazione dei tessuti asciutti e pre-preg,
- Cicli di curing con sacco a vuoto (*vacuum bag*),
- Tecnologie avanzate di processo di formatura e polimerizzazione in autoclave,
- Verifica dell'integrità strutturale mediante l'ausilio di CnD post-riparazione (VT esame visivo, Tap Test Tool, RT esame radiografico, UT ultrasuoni C-scan, TT termografia a infrarossi, AT emissione acustica, CT tomografia computerizzata, M NDT microonde, Shearografia.

In particolare, per i fattori gestionali legati alle principali lezioni apprese dall'analisi eseguita:

- è necessario porre adeguata attenzione, per la realizzazione e gestione di manufatti in vetroresina, a tutte le fasi previste, a partire dalla progettazione, certificazione da parte della ditta/e incaricata/e, realizzazione e successiva consegna dei lavori secondo la regola dell'arte
- è necessaria la validazione sistematica in caso di intervento di riparazione/modifica, a cura di un professionista esperto, indipendente rispetto alla ditta che esegue la riparazione/modifica, e contestuale certificazione di esercibilità dell'apparecchiatura
- è necessaria una adeguata frequenza dei controlli interni e CND, in funzione dell'analisi delle condizioni operative, e adozione di tecniche di CND più efficaci, ai fini di individuare lesioni alle fibre di vetro sui manufatti
- è necessario un accrescimento del "know-how" a tal fine (da ricercare mediante richiesta di esperti esterni, e mediante attività di formazione e aggiornamento del proprio personale)
- è necessario porre attenzione, nell'ambito dell'attuazione delle procedure del SGS-PIR connesse alle attività di manutenzione e controllo, a fenomeni anche minori (es. trafilamenti) suscettibili di evolvere in rotture catastrofiche

7. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un caso studio relativo a un evento incidentale occorso in un reattore di lisciviazione non pressurizzato, costruito in materiale composito polimerico rinforzato con fibre di vetro, installato in una azienda sottoposta a ispezioni ai sensi dell'art. 27 comma 6 del D. Lgs. 26/06/2015 n.105.

I precursori del cedimento strutturale, che ha interessato l'apparecchiatura "critica" assoggettata dal gestore a modifica per inserimento di un passo d'uomo non

presente nel progetto originario del reattore, sono da ricercarsi nei:

1. fattori organizzativi e gestionali come specificato in [6]
2. procedure di monitoraggio e controllo dell'invecchiamento in conformità alla direttiva Seveso,
3. procedure adottate per la riparazione strutturale dei materiali compositi,
4. tecniche utilizzate per la riduzione dei principali fattori critici, tra cui è possibile citare, anche se non esplicitamente connessi all'evento incidentale: estrazione dei vuoti, eccesso di resina, reticolazione e polimerizzazione (vacuum bag), al fine di garantire il comportamento elastico e la resistenza meccanica finale dell'attrezzatura riparata,
5. CnD eseguiti post-riparazione. In forma preventiva e predittiva diverse tipologie di CnD risultano efficaci e dedicati alla verifica dell'integrità strutturale. Specificamente per la preventiva individuazione di alcuni danneggiamenti, oltre all'esame visivo (VT) si evidenziano tra i CnD applicabili sia durante l'esercizio che durante le fasi di controllo post-riparazione: gli ultrasuoni (UT), la termografia a infrarossi (TT), le microonde (MNDT) , e la Shearografia.

Bibliografia

[1] Rapporto di Incidente eMARS 2025 - ISPRA, CNVVF, INAIL"

[2] Materiali Compositi, Tecnologie – Progettazione – Applicazioni. Ignazio Crivelli Visconti, Giancarlo Caprino, Antonio Langella. Hoepli Editore. Milano 2013.

[3] Tecnologie e proprietà dei materiali compositi. R. Frassine. Milano, marzo 2021.

[4] Materiali compositi per l'ingegneria. C. Baldini – 2013 Celid.

[5] Progettazione meccanica con materiali non convenzionali - B. Zuccarello (UNIPA).

[6] Criticità durante la fase di ispezione periodica su attrezzature a pressione in Materiale Composito CFRP (Carbon Fiber Reiforced Polymer). D. Di Fonzo, G. Vaccaro, G. Gorrino, E. Pichini Maini, C. Mennuti, G. Augugliaro. Atti del convegno SAFAP 2016, Milano 15 e 16 novembre 2016.

[7] Ispezioni periodiche e tecniche di riparazione dei danneggiamenti sulle bombole in materiale composito CFRP. D. Di Fonzo, G. Vaccaro, G. Gorrino, E. Pichini Maini, C. Mennuti, G. Augugliaro. Atti del convegno AIPnD 2017, Milano 25, 26 e 27 ottobre 2017.

[8] Danneggiamenti sulle bombole in carboresina CFRP e nelle giunzioni filettate flangia-valvola. Le tecniche NdT applicabili in service life. D. Di Fonzo, C. Mennuti, G. Augugliaro. Atti del convegno AIPnD 2019, Milano 23, 24 e 25 ottobre 2019.

[9] Requisiti di Damage Tolerance e Durability per la riparabilità delle attrezzature a pressione in materiale composito avanzato a matrice polimerica (*Polymer Matrix Composites, PMCs*). Procedure operative sulle riparazioni strutturali. Autori: D. Di Fonzo, C. Mennuti, E. Pichini Maini, G. Vaccaro. SAFAP 2021, Roma 16, 17 e 18 novembre 2021.

[10] Tecniche operative di riparazioni cosmetiche per il ripristino dell'estetica originale e per il mantenimento della stabilità strutturale di attrezzature di lavoro in materiale composito avanzato. Le principali metodologie di prove non distruttive applicabili. Autori: D. Di Fonzo, G. Vaccaro, C. Mennuti, E. Pichini Maini. AIPnD 2022, Verona 19, 20 e 21 ottobre 2022.
[11] Monitoring and control of aging of anticor liners in HDPE reinforced with aramid fibers, used in relining applications of natural gas sea lines installed in environments subject to inspections of the directive 2012/18/EU. D. Di Fonzo, G. Augugliaro, G. Vaccaro. Opatija, Croatia, may. 2024.
[12] D. Di Fonzo, G. Augugliaro, E. Pichini, C. Mennuti, G. Vaccaro - Fattori di vulnerabilità nei prodotti PMCS (Polymer-Matrix Composites) wet lay-up nelle riparazioni strutturali temporanee di apparecchiature e tubazioni in pressione - ICSI 2025 - Atti del convegno

Principali riferimenti di legge e normativi

- D.M. 1/12/2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'art. 19 del D.Lgs. 25/02/00, n. 93
- Direttiva 2014/68/UE (97/23/CE) recepita con D.Lgs. 15/02/16, n. 26 (PED)
- https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search (10/09/2025)

Rischi connessi all'utilizzo di impianti criogenici in stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante

A. Morettini[1], R. Vasile[2], E. Izzo[1], F. R. Filograsso[2], F. Vitucci[2]

[1]Inail – UOT di Campobasso
[2]Inail – UOT di Pescara

Sommario
Alcuni stabilimenti a rischio di incidente rilevante, così come definiti ai sensi del d.lgs. n.105 del 26/06/2015, sono caratterizzati dalla presenza di impianti criogenici di proprietà, completa gestione e diretta responsabilità delle ditte fornitrici del prodotto contenuto. Tali impianti, in cui talvolta sono presenti sostanze classificate come pericolose, possono essere causa di condizioni di pericolo e/o di incidente ed è pertanto necessario che il gestore dello stabilimento conduca specifici approfondimenti sul rischio connesso alla loro presenza.
Attraverso le esperienze maturate nell'ambito delle verifiche di messa in servizio ai sensi del d.m. 329/04 e delle istruttorie tecniche di cui al d.lgs. 105/2015, l'esame del sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS-PIR), applicato dal gestore di stabilimento, ha permesso di evidenziare che non è possibile prescindere dalla presenza in sito degli impianti criogenici gestiti da ditte terze e dalle interazioni con queste ultime. Il gestore di stabilimento, in collaborazione con le ditte proprietarie degli impianti criogenici, deve quindi adottare soluzioni tecnico-gestionali necessarie a individuare idonee misure di prevenzione e di mitigazione dei rischi associati all'impianto oltre che misure di coordinamento per un corretto monitoraggio delle condizioni di esercizio, di manutenzione e di invecchiamento delle attrezzature che ne fanno parte.

1. Il d.lgs. n.105 del 26/06/2015

Nell'Unione Europea gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante sono regolamentati dalla Direttiva 2012/18/UE, recepita in Italia dal d.lgs. n.105 del 26/06/2015 entrato in vigore il 29/07/2015 con pubblicazione nella G. U. Serie generale n.161 - Supplemento ordinario n.38/L del 14/07/2015. Le disposizioni legislative definiscono le finalità e l'ambito di applicazione, le autorità competenti in materia e il coordinamento nazionale, gli obblighi dei gestori di stabilimento e le procedure per la pianificazione di emergenza interna ed esterna, il regime sanzionatorio e le norme per l'abrogazione della precedente normativa; gli allegati al decreto forniscono criteri tecnici e linee guida per l'applicazione della norma.
Per incidente rilevante si intende, ai sensi dell'art.3, c.1 lett.o del decreto, un evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati che si verifichino durante l'attività di uno stabilimento assoggettato alle disposizioni e che dia luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute

umana o l'ambiente, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e in cui intervengano una o più sostanze pericolose. Ai sensi dell'art.3, c.1, lett.l è definita sostanza pericolosa una sostanza o miscela di cui alle categorie indicate nella parte 1 o all'elenco indicato nella parte 2 dell'allegato 1, sotto forma di materia prima, prodotto, sottoprodotto, residuo o intermedio.
Salvo le eccezioni previste all'art.2, c.2, sono soggetti al decreto tutti gli stabilimenti di cui all'art.2, c.1 e all'art.3, c.1, lett.a, intesi come tutta l'area sottoposta al controllo di un gestore, nella quale sono presenti sostanze pericolose all'interno di uno o più impianti, comprese le infrastrutture o le attività comuni o connesse.
Ai sensi dell'art.3, c.1, lett.b si hanno stabilimenti di soglia inferiore, assoggettati a controlli in capo agli enti regionali, se in essi sono contenute sostanze pericolose in quantità pari o superiore a quelle indicate nella colonna 2, ma minori di quelle della colonna 3, della parte 1 o 2 dell'allegato 1 o applicando, ove previsto, la regola della sommatoria di cui alla nota 4 dell'allegato 1. Ai sensi dell'art.3, c.1, lett.c si hanno stabilimenti di soglia superiore, assoggettati al controllo del Ministero dell'Interno, se in essi sono contenute sostanze pericolose in quantità pari o superiore a quelle indicate nella colonna 3 della parte 1 o 2 dell'allegato 1 o applicando, ove previsto, la regola della sommatoria di cui alla nota 4 dell'allegato 1.
Il gestore di uno stabilimento, definito all'art.3, c.1, lett.i del decreto come qualsiasi persona fisica o giuridica che detiene o gestisce uno stabilimento o un impianto, oppure a cui è stato delegato il potere economico o decisionale determinante per l'esercizio tecnico dello stabilimento o dell'impianto stesso, ha in capo diversi obblighi non delegabili in relazione allo stabilimento da lui condotto.
Per gli stabilimenti di soglia inferiore il gestore deve presentare e aggiornare presso le autorità competenti una notifica atta a indicare le informazioni sullo stabilimento e i rischi ad esso correlati, redigere e aggiornare un documento di politica di prevenzione degli incidenti rilevanti (PPIR), strutturare e attuare un sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS-PIR), gestire eventuali emergenze interne allo stabilimento mediante le procedure e le pianificazioni predisposte nell'ambito dell'attuazione del SGS-PIR, procedere all'informazione, all'addestramento e all'equipaggiamento di coloro che lavorano nello stabilimento. Per gli stabilimenti di soglia superiore, a ciò si aggiungono gli obblighi di redigere e aggiornare un rapporto di sicurezza correlato allo stabilimento (RdS), redigere un piano di emergenza interno (PEI).
Le autorità competenti hanno, in sintesi, il compito di pianificare l'uso del territorio, effettuare le istruttorie dei rapporti di sicurezza degli stabilimenti, programmare ed eseguire ispezioni presso gli stabilimenti, redigere i piani di emergenza esterna (PEE) sulla base delle informazioni comunicate dai gestori, informare i cittadini sui rischi correlati agli stabilimenti e i comportamenti da tenere in caso di emergenza.

2. Stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante

Uno stabilimento industriale assoggettato al d.lgs. n.105/2015 può definirsi, in via generale, come un'area delimitata e definita destinata allo stoccaggio, a lavorazioni e/o produzioni in cui è riscontrabile la presenza di sostanze pericolose di cui all'allegato 1 del suddetto decreto. Alcuni esempi tipici di stabilimenti possono considerarsi le raffinerie di petrolio, i depositi di carburanti o di gas di petrolio liquefatto (GPL), gli impianti di trattamento o stoccaggio di gas, le industrie chimiche e petrolchimiche.

Genericamente, uno stabilimento industriale si suddivide in aree con specifica destinazione d'uso, interconnesse tra di loro tramite un sistema per la viabilità, in cui è possibile individuare strutture o aree destinate a reparti produttivi e al loro controllo, strutture destinate all'attuazione e alla gestione dell'emergenza, strutture o aree destinate allo stoccaggio di materie prime, prodotti finiti e rifiuti, strutture destinate ad uffici tecnici e amministrativi, alla manutenzione degli impianti, ai servizi.

I reparti destinati alla produzione possono essere costituiti da uno o più impianti, definiti all'art.3, c.1, lett.h, come un'unità tecnica all'interno di uno stabilimento e che si trovi fuori terra o a livello sotterraneo, nel quale sono prodotte, utilizzate, maneggiate o immagazzinate le sostanze pericolose; esso comprende tutte le apparecchiature, le strutture, le condotte, i macchinari, gli utensili, le diramazioni ferroviarie private, le banchine, i pontili che servono l'impianto, i moli, i magazzini e le strutture analoghe, galleggianti o meno, necessari per il funzionamento di tale impianto. Negli stabilimenti industriali, è possibile riscontrare uno o più impianti o unità tecniche, contenenti o meno sostanze pericolose, che possono concorrere direttamente al processo produttivo o essere adibiti a servizi posti a corredo.

3. Impianti criogenici

Tra gli impianti presenti in uno stabilimento industriale non è raro trovare impianti criogenici che possono far parte direttamente del sistema produttivo essendo destinati a lavorazioni e/o stoccaggio di componenti, o che possono essere posti in prossimità degli impianti di processo essendo destinati alla produzione e/o stoccaggio di sostanze utilizzate per attività di servizio, quali ad esempio l'inertizzazione di attrezzature a pressione o l'alimentazione di sistemi antincendio.

Gli impianti criogenici presenti in uno stabilimento industriale possono essere di proprietà o meno del gestore dello stabilimento; non è insolito riscontrare, infatti, impianti appartenenti e gestiti direttamente da ditte terze incaricate della fornitura del prodotto in essi contenuto.

Un impianto criogenico è un sistema progettato per produrre, stoccare e utilizzare gas a bassa temperatura, allo stato liquido o gassoso; di uso comune sono gli impianti contenenti gas come l'azoto, l'argon o l'anidride carbonica, o anche impianti contenenti gas rientranti direttamente nella parte 2 dell'allegato 1 come l'idrogeno o l'ossigeno. A titolo di esempio: l'azoto (N_2) può essere utilizzato per inertizzazioni, per stoccaggio di materiali infiammabili o nei sistemi antincendio; l'ossigeno (O_2) può

essere utilizzato per ottimizzare i processi di combustione dell'industria siderurgica; l'anidride carbonica (CO_2) può essere utilizzata per raffreddamento criogenico, per processi di produzione di urea o nei sistemi antincendio; l'idrogeno (H_2) può essere utilizzato come vettore energetico atto all'immagazzinamento di energia rinnovabile; l'argon (Ar) può essere utilizzato in processi di produzione dell'acciaio.
Il principio di funzionamento di un impianto criogenico prevede tipicamente diversi passaggi, ovvero un ingresso di gas tramite sistemi di collettamento, un sistema di filtraggio e purificazione, un sistema di compressione con raffreddamento, espansione e liquefazione, stoccaggio e immagazzinamento, eventualmente un processo di evaporazione per l'utilizzo allo stato gassoso. Risultano componenti tipici di un impianto criogenico recipienti a pressione come serbatoi e scambiatori, sistemi di tubazioni, compressori, valvole di sicurezza, sistemi per il monitoraggio e il controllo dei parametri di esercizio dell'impianto quali pressione, temperatura e livelli, sistemi di allarme e di protezione antincendio.
In relazione alla tipologia del fluido contenuto, i principali rischi connessi a tali impianti, correlabili o meno a un incidente rilevante, risultano danni per la salute dovuti all'esposizione al fluido criogenico, asfissia, fragilità dei materiali, malfunzionamenti dell'impianto e dei dispositivi di sicurezza per la formazione di condense e di ghiaccio, sovrapressione ed esplosione per espansione volumetrica del fluido contenuto dovuta ad un riscaldamento, incendio connesso principalmente a fluidi comburenti e infiammabili.
Il gestore di uno stabilimento assoggettato al d.lgs. n.105/2015 ha in capo la responsabilità della corretta gestione di tutti gli impianti presenti nel proprio stabilimento e, quindi, anche degli eventuali impianti criogenici gestiti da ditte terze fornitrici. Appare evidente come sia necessaria e di particolare importanza l'instaurarsi di strette interazioni tra gestore e ditte terze fornitrici che vadano oltre semplici rapporti contrattuali di fornitura.

4. Il Sistema di Gestione della Sicurezza

In stabilimenti soggetti al d.lgs. n.105/2015, la presenza di impianti criogenici di proprietà e in gestione di ditte terze fornitrici, può essere causa di incidenti rilevanti; pertanto, il gestore deve considerare tali impianti nella propria valutazione dei rischi e deve agire, in coordinamento con le ditte proprietarie, al fine di applicare tutte le necessarie soluzioni tecnico-gestionali per garantire idonee misure di prevenzione da eventuali incidenti, il corretto monitoraggio delle condizioni di esercizio, di manutenzione e di invecchiamento delle attrezzature facenti parte dell'impianto, idonee misure di mitigazione dei rischi di incidente rilevante.
Ai sensi dell'art.14 del d.lgs. n.105/2015, il gestore ha l'obbligo di redigere un documento atto a definire la propria politica di prevenzione proporzionata ai pericoli di incidenti rilevanti presenti presso il proprio stabilimento e comprendente gli obiettivi generali in termini di prevenzione, i principi di azione, ruoli e responsabilità, l'impegno al continuo miglioramento del controllo dei pericoli di incidente rilevante e

la garanzia di un elevato livello di protezione per la salute umana e dell'ambiente. In tale documento, obbligatorio per stabilimenti di soglia inferiore e superiore, deve essere riportata l'articolazione del sistema di gestione della sicurezza adottato presso lo stabilimento.
Un SGS-PIR, per cui è possibile far riferimento alla UNI 10617, deve essere redatto in conformità agli allegati 3 e B del d.lgs. n.105/2015 e strutturato in modo da definire la politica e la conduzione aziendale per la sicurezza, l'organizzazione tecnica, amministrativa e delle risorse umane, la pianificazione delle attività, la misura delle prestazioni in relazione a parametri specifici prestabiliti, la verifica e il riesame delle prestazioni. In particolare, un SGS-PIR si compone di elementi fondamentali riguardanti organizzazione e personale, identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti, controllo operativo del processo e delle attività di stabilimento, modifiche e progettazione degli impianti, pianificazione di emergenza, controllo delle prestazioni, controllo e revisione.
È da evidenziare che il gestore può rivestire anche il ruolo di datore di lavoro. In tal caso, lo stesso, deve garantire il rispetto degli obblighi previsti dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. ed effettuare, in particolare, una valutazione dei rischi interferenti (DUVRI) correlata alla presenza di ditte terze fornitrici e/o in subappalto presenti presso il proprio stabilimento.
Nella redazione del SGS-PIR la presenza in stabilimento di impianti criogenici, di proprietà e gestione di ditte terze fornitrici, deve essere considerata, in particolare, per l'organizzazione del personale, l'identificazione e la valutazione dei pericoli rilevanti, il controllo operativo, la pianificazione di emergenza.

4.1 Organizzazione del personale

Nel SGS-PIR devono essere individuate le posizioni chiave ad ogni livello dell'organizzazione aziendale definendo in modo univoco ed esplicito ruoli, compiti, responsabilità e disponibilità di risorse oltre che le interfacce tra queste, tra queste e l'alta direzione e tutto il personale coinvolto in attività rilevanti ai fini della sicurezza. All'interno dell'organizzazione deve essere garantito, anche nel tempo, un alto grado di competenza e di consapevolezza nella gestione dei pericoli di incidente rilevante a mezzo di adeguate attività di informazione, formazione e addestramento di tutto il personale coinvolto in attività rilevanti ai fini della sicurezza, sia proprio che di terzi, sia fisso che occasionale; devono essere, inoltre, garantite la disponibilità e l'adeguatezza dell'equipaggiamento di protezione necessario in caso di pericolo. Indicazioni in merito sono riportate nell'appendice 1 dell'allegato B.
Il gestore deve, quindi, instaurare e garantire strette interazioni tra la propria organizzazione e quella delle ditte terze proprietarie e gestrici di impianti criogenici presenti presso il proprio stabilimento; in caso si manifesti, infatti, un pericolo di incidente che interessi sotto qualsiasi aspetto l'impianto criogenico, il personale addetto alla sua gestione e controllo risulta il primo ad essere coinvolto nella gestione di un'emergenza. La collaborazione tra gestore e ditte terze fornitrici, dovrà

instaurarsi sia in termini operativi che documentali, al fine di individuare le opportune figure preposte all'intervento e all'interfaccia tra le ditte e le adeguate procedure da attuarsi nella gestione e nel controllo dell'impianto, in esercizio e in emergenza. Tale coordinamento risulta fondamentale, poiché problematiche riscontrabili nella catena dell'emergenza possono essere causa di un mancato intervento di mitigazione di un incidente o di un aggravarsi delle sue conseguenze.

4.2 Identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti

Il sistema di gestione deve prevedere le procedure per l'identificazione dei pericoli, la valutazione dei rischi di incidente rilevante correlate all'esercizio normale o anomalo degli impianti, anche subappaltato, e l'adozione delle misure per la riduzione del rischio che devono essere correttamente applicate e mantenute efficaci nel tempo.
Tali aspetti vanno aggiornati periodicamente in occasione di modifiche impiantistiche, in considerazione di aggiornamenti normativi o dell'esperienza storica, in occasione di incidenti, quasi incidenti o funzionamenti anomali degli impianti e in considerazione del fenomeno dell'invecchiamento delle attrezzature. Il gestore è obbligato, quindi, a interagire strettamente con le ditte terze proprietarie e gestrici di impianti criogenici collaborando al fine di garantire una corretta valutazione dei rischi correlata alla presenza degli impianti presso il proprio stabilimento e un idoneo monitoraggio e controllo degli impianti stessi.
La valutazione del rischio deve considerare cause di tipo operativo, cause correlate al funzionamento degli impianti, cause di tipo esterno, cause correlate ad effetti domino interni od esterni, cause di tipo naturale. Inoltre, deve condurre all'individuazione dei possibili incidenti e delle relative sequenze, alla determinazione della probabilità/frequenza attesa di accadimento degli incidenti in base all'affidabilità delle attrezzature e dei sistemi di controllo, all'individuazione degli scenari incidentali, alla valutazione delle conseguenze di questi ultimi sull'uomo e sull'ambiente antropico e naturale.
Gli impianti criogenici possono essere utilizzati per la produzione e lo stoccaggio di sostanze pericolose contenute nell'allegato 1 del d.lgs. 105/2015, come ad esempio l'idrogeno (H_2), e questo può far rientrare le attrezzature che compongono tali impianti tra le attrezzature critiche di stabilimento.
Le apparecchiature e i sistemi posti a corredo di tali impianti possono essere causa diretta del verificarsi di un incidente rilevante ad esempio per:

- un malfunzionamento impiantistico, di un sistema per il monitoraggio e controllo o di un sistema/dispositivo di sicurezza;
- un danneggiamento delle apparecchiature dell'impianto criogenico;
- uno stato di conservazione non idoneo delle apparecchiature dell'impianto.

L'assenza di sostanze pericolose in impianti criogenici, in ogni caso, non consente al gestore di escluderli a priori dalla valutazione del rischio. Impianti destinati alla produzione, allo stoccaggio e all'utilizzo di azoto (N_2) oppure di anidride carbonica (CO_2), utilizzati spesso per l'inertizzazione di apparecchiature o per alimentare sistemi

antincendio, risultano fondamentali, infatti, al fine di prevenire incidenti rilevanti o al fine di mitigarne le conseguenze.
Non è da sottovalutare, inoltre, la possibilità che le apparecchiature di un impianto criogenico possano essere causa indiretta del verificarsi di un incidente rilevante. Un collasso improvviso di un serbatoio o di una tubazione dovuto, ad esempio, a uno stato di conservazione non idoneo, può portare all'innesco di una sequenza incidentale. Il verificarsi di eventi di questo tipo, in particolare quando l'impianto criogenico risulta nelle immediate vicinanze di apparecchiature contenenti sostanze pericolose, può essere causa di un effetto domino interno allo stabilimento in cui un primo danneggiamento può arrecare danno ad altre apparecchiature poste in prossimità, con il conseguente innesco di un incidente rilevante o di una situazione di emergenza. La possibilità che possa verificarsi un incidente rilevante per una causa diretta o per una causa indiretta, come l'effetto domino, va ovviamente considerata anche nell'ambito della valutazione del rischio di incidente rilevante innescata da fenomeni naturali. Al fine di una corretta valutazione del rischio si dimostra, quindi, fondamentale che il gestore interagisca e collabori con le ditte terze proprietarie e gestrici di un impianto criogenico presente nel proprio stabilimento per prevenire incidenti rilevanti o per adottare le opportune misure di protezione e mitigazione degli effetti indotti da incidenti. Per il gestore dello stabilimento risulta importante conoscere, relativamente all'impianto criogenico, i quantitativi e le caratteristiche delle sostanze in esso contenute, le opportune informazioni in merito al corretto funzionamento e mantenimento in efficienza dello stesso, le opportune informazioni in merito allo stato di conservazione delle attrezzature componenti l'impianto, la dimensione e lo sviluppo dell'impianto, ovverosia l'esatta collocazione e disposizione planimetrica delle apparecchiature che lo compongono.

4.3 Il controllo operativo

Nel sistema di gestione della sicurezza, il gestore deve prevedere procedure per il controllo operativo di tutte le apparecchiature facenti parte del processo produttivo e di tutte quelle attività di stabilimento rilevanti ai fini della sicurezza. Tali procedure devono riguardare almeno la gestione documentale, le procedure operative, le procedure di manutenzione ed ispezione, l'approvvigionamento e le verifiche di preavviamento. In tal contesto devono essere considerate anche le apparecchiature appartenenti ad impianti criogenici di proprietà e di gestione di ditte terze. Per tali attrezzature, il gestore, non potendo averne un controllo diretto, dovrà adottare procedure specifiche tali da permettere una stretta interazione tra le proprie figure preposte al controllo delle attrezzature e le figure preposte dalle ditte terze fornitrici addette alla gestione dell'impianto criogenico. Tramite tali interazioni e procedure, il gestore deve poter garantire l'affidabilità delle attrezzature nelle condizioni normali e anomale di esercizio oltre che in condizioni di emergenza.
A tal fine le procedure dovranno riguardare in particolare:

- il rispetto della corretta gestione in esercizio dell'impianto criogenico;

- il rispetto di eventuali obblighi per la corretta messa in servizio delle attrezzature ai sensi del d.m. 329/04;
- il rispetto delle eventuali verifiche di riqualificazione periodica ai sensi del d.m. 329/04 e della loro tempistica;
- il rispetto della regolare ispezione e manutenzione delle attrezzature atte a garantirne nel tempo l'efficienza.

Relativamente alle attrezzature di un impianto criogenico alcune di esse possono rientrare tra le apparecchiature critiche, per le quali è previsto l'ulteriore obbligo per il gestore di un attento monitoraggio e gestione del loro invecchiamento che tenga conto dei meccanismi di deterioramento presenti, inclusi corrosione interna ed esterna, erosione, fatica termica e meccanica. Il gestore, quindi, in qualità di responsabile unico e non delegabile dello stabilimento, dovrà garantire l'ottemperanza del suddetto obbligo anche per le apparecchiature presenti in un impianto criogenico di proprietà e di gestione di ditte terze fornitrici.
Ai sensi del d.lgs. 105/2015, allegato H, punto 1, lettera i, per attrezzature critiche si intendono apparecchiature, serbatoi, componenti e dispositivi di controllo, protezione e sicurezza coinvolti nelle sequenze incidentali ipotizzabili nello stabilimento o desunti dall'analisi dell'esperienza operativa.
Ai fini della gestione dell'invecchiamento il gestore dovrà avere contezza dell'invecchiamento di tutti i sistemi di contenimento soggetti a meccanismi di deterioramento di cui alle normative tecniche settoriali, che in esercizio possono contenere sostanze pericolose in quantitativi sufficienti a determinare un incidente rilevante. Le apparecchiature di un impianto criogenico, soggette al controllo dell'invecchiamento, potrebbero risultare tanto sistemi statici quali ad esempio serbatoi, scambiatori, separatori, colonne e tubazioni, quanto sistemi dinamici quali ad esempio pompe, compressori e turbine.
In relazione a quanto esposto appare fondamentale l'importanza di una forte interazione tra il gestore dello stabilimento e le ditte terze, proprietarie e gestrici dell'impianto criogenico, atta a garantire il pieno controllo e l'affidabilità delle attrezzature.

4.4 Pianificazione di emergenza

In merito alla possibilità del verificarsi di un incidente rilevante, il gestore, mediante l'applicazione del SGS-PIR adottato, deve assicurare:

- il contenimento e controllo dell'incidente al fine di mitigarne gli effetti e i danni;
- la messa in opera di tutte le misure necessarie al fine della protezione degli addetti e dell'ambiente dagli effetti dell'incidente rilevante;
- la comunicazione delle necessarie informazioni alla popolazione, ai servizi di emergenza e alle autorità locali competenti;
- i provvedimenti al fine di consentire l'agibilità e il ripristino del sito e dell'ambiente dei luoghi interessati dall'incidente.

Le misure di protezione e di intervento, mirate a contenere le conseguenze di un incidente rilevante, vengono individuate in funzione dei risultati ottenuti dall'analisi del rischio e della successiva valutazione delle conseguenze sugli impianti, sul personale, sulla popolazione e sull'ambiente.
Le procedure di emergenza devono raccogliere in modo dettagliato tutte le misure intraprese e i dispositivi previsti al fine del contenimento di un incidente, la dotazione dei DPI, le apparecchiature di sicurezza e i sistemi di allarme nonché il personale preposto all'attuazione delle misure stesse con indicazione di ruoli e responsabilità.
Il suddetto personale deve, inoltre, essere oggetto di idonee attività di informazione, formazione e addestramento.
Per gli stabilimenti di soglia superiore deve essere predisposto un Piano di emergenza interno (PEI) di cui all'art.20 del d.lgs. 105/2015.
Appare evidente come la ditta terza proprietaria di un impianto criogenico presente presso uno stabilimento e potenzialmente implicato in un incidente rilevante, debba essere coinvolta dal gestore dello stabilimento nella definizione delle procedure di emergenza, nelle attività di informazione, formazione e addestramento oltre che nelle esercitazioni.

5. Esperienza in campo

Nel 2025 l'INAIL ha effettuato, ai sensi del d.m. 329/04, verifiche di messa in servizio e contestuale verifica di integrità su alcune attrezzature a pressione di un impianto destinato alla produzione e fornitura di azoto gassoso, utilizzato per l'inertizzazione di apparecchiature e nel processo produttivo di uno stabilimento R.I.R. L'impianto risultava di proprietà di una ditta terza. A seguito dell'esito non favorevole delle verifiche per un non idoneo stato di conservazione delle attrezzature interessate, la ditta proprietaria ha attuato le necessarie azioni compensative a garanzia della sicurezza e della fornitura arrestando parte dell'impianto e servendosi di carri bombolai. Successivamente, nello stesso anno, lo stabilimento R.I.R. in questione è risultato oggetto di ispezione ai sensi dell'art.27 del d.lgs. 105/2015. L'esame del SGS-PIR e dei flussi documentali svolto dalla commissione ispettiva incaricata, ha fatto emergere che il gestore non aveva contezza delle condizioni di esercizio dell'impianto per azoto di proprietà di ditta terza fornitrice presente presso il proprio stabilimento. Il gestore, infatti, demandava l'intera responsabilità della gestione dell'impianto alla ditta proprietaria ed effettuava solo un controllo delle quantità di prodotto ricevuto in relazione al contratto commerciale in essere. Con riferimento alla Lista di riscontro 3a di cui all'allegato H, la commissione riscontrava, quindi, carenze del SGS-PIR riconducibili, in particolare, all'organizzazione e personale per l'assenza di figure di stabilimento preposte al controllo dell'esercizio dell'impianto, al controllo operativo per la mancata applicazione delle procedure di stabilimento previste per la gestione dell'approvvigionamento di beni e servizi di fornitori terzi. Alla conseguente proposta di prescrizione avanzata dalla commissione ispettiva, poi confermata dal CTR, il gestore ha ottemperato introducendo una nuova procedura nel SGS-PIR applicata a

tutte le ditte fornitrici e proprietarie di impianti presenti in stabilimento. Con tale procedura sono stati meglio definiti ruoli e responsabilità del personale di stabilimento e dei fornitori a garanzia di una più completa e puntuale interfaccia tra le ditte, sono stati definiti i flussi documentali tra le varie figure individuate, sono state censite le apparecchiature delle ditte terze e inserite nei programmi di manutenzione e dei controlli legislativi delle apparecchiature di stabilimento per un corretto monitoraggio delle condizioni di esercizio. Sono stati, inoltre, istituiti gli obblighi per le ditte terze fornitrici di comunicare tempestivamente le nuove installazioni di attrezzature, comunicare gli esiti dei controlli effettuati su loro attrezzature presenti in stabilimento, adottare le eventuali misure compensative e di sicurezza in caso di guasti o controlli non favorevoli. La nuova procedura è stata sottoscritta dalle ditte terze fornitrici ed è stata argomento di formazione del personale di stabilimento.

6. Conclusioni

Gli impianti criogenici, di proprietà e di gestione di ditte terze fornitrici presenti presso stabilimenti R.I.R. di cui al d.lgs.105/2015, devono essere presi in considerazione dal gestore nel proprio SGS-PIR. Tali impianti possono essere causa diretta di un incidente rilevante se contenenti sostanze pericolose di cui all'allegato 1 del d.lgs.105/2015, possono essere causa di innesco di una sequenza incidentale o possono risultare importanti in emergenza perché utilizzati per l'inertizzazione di apparecchiature di processo o per l'alimentazione di sistemi antincendio. Dalle esperienze maturate in campo in occasione degli adempimenti legislativi previsti dal d.m. 329/04 e delle istruttorie tecniche di cui al d.lgs. 105/2015, è emerso che il controllo su tali impianti esercitato dal gestore di uno stabilimento R.I.R. consiste spesso nel semplice monitoraggio delle quantità di prodotto ricevuto in relazione a rapporti contrattuali di fornitura in essere meramente commerciali. La responsabilità della gestione di tali impianti, demandata integralmente alle ditte terze proprietarie e fornitrici, non offre adeguate garanzie di sicurezza. La disamina della struttura del SGS-PIR, descritta nell'allegato B del d.lgs. 105/2015 e di adozione obbligatoria da parte del gestore di uno stabilimento R.I.R. sia di soglia inferiore che di soglia superiore, ha permesso di evidenziare l'importanza di una stretta collaborazione che dovrebbe instaurarsi tra il gestore e le ditte terze proprietarie e gestrici degli impianti criogenici utilizzati per forniture. La cooperazione tra gestore e ditte terze, mirata in particolare all'organizzazione del personale, all'identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti, al controllo operativo e alla pianificazione di emergenza, è garanzia di idonee misure di sicurezza nei confronti degli incidenti rilevanti e di mitigazione delle loro conseguenze.

Bibliografia

[1] d.lgs. del 26 giugno 2015, n.105, "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose".

[2] Linea Guida “Valutazione sintetica dell’adeguatezza dei piani di monitoraggio e controllo dei rischi legati all’invecchiamento di attrezzature e impianti negli stabilimenti Seveso”, Seconda Edizione, marzo 2021.

Manutenzione predittiva nell'industria 4.0 e 5.0: le tecnologie emergenti e il ruolo attivo dell'operatore nel monitoraggio predittivo delle attrezzature a pressione

M. Diano[1], F. Badolato[1], A. Cosentini[1], R. Longo[1], M. Quattromani[1]

[1]Inail - UOT di Catanzaro

Sommario
La manutenzione predittiva rappresenta una delle colonne portanti dell'Industria 4.0. Specie in ambiti che sono caratterizzati da stringenti requisiti di sicurezza, quali sono le attrezzature a pressione, l'uso di tecnologie avanzate per il monitoraggio in continuo di attrezzature ed impianti, attraverso sensoristica dedicata, Internet of Things, tecnologie di digital twin e intelligenza artificiale, rappresenta una svolta cruciale per la gestione della sicurezza e del controllo nel settore industriale. La transizione verso l'Industria 5.0 introduce una prospettiva nuova, centrata sull'uomo, in cui i sistemi predittivi vengono integrati e supportati dal giudizio e dall'esperienza degli operatori, con l'obiettivo di garantire sostenibilità e sicurezza. Questo lavoro propone una revisione critica delle tecnologie emergenti dedicate al monitoraggio predittivo di recipienti e condotte in pressione, soffermandosi sulle tecnologie di monitoraggio più avanzate attualmente disponibili (emissioni acustiche, onde ultrasonore guidate e sensori a fibra ottica distribuita) e delineando un approccio metodologico ibrido che combina i dati prodotti da questi dispositivi con le altre disponibilità tecnologiche utilizzabili e il ruolo attivo dell'operatore umano nei processi decisionali.

1. Introduzione e obiettivi

La manutenzione predittiva (Predictive Maintenance - PdM) è uno dei pilastri dell'Industria 4.0, perché consente di anticipare guasti e degradazioni di macchinari e dispositivi attraverso il monitoraggio in continuo della loro corretta efficienza e integrità sulla base dell'analisi di dati di controllo e sorveglianza (Prognostics and Health Management - PHM), permettendo, anche, la stima della vita residua utilizzabile (Remaining Useful Life - RUL). Nel caso dei recipienti in pressione, il valore della PdM è amplificato da stringenti requisiti di sicurezza, definiti in norme e regolamenti, derivanti dall'elevato rischio intrinseco per persone e ambiente e dai costi dei fermi impianto, che rendono strategico il passaggio da ispezioni periodiche a sorveglianza continua. Un sistema così impostato rende certamente efficiente il meccanismo insito nella PdM, ma il valore aggiunto con la transizione verso l'Industria 5.0 è determinato dalla collaborazione tra tecnologia e persone: i sistemi predittivi diventano collaborativi, integrando sensoristica avanzata e giudizio esperto dell'operatore, con benefici su sicurezza, resilienza e sostenibilità [1,2,3].
Questo lavoro propone:

– una revisione critica di due famiglie tecnologiche per il monitoraggio predittivo dei recipienti in pressione: Emissioni Acustiche (AE) e Onde Ultrasonore Guidate (GW) applicate a mantello, calotte e zone critiche dei recipienti;
– un modello di "operatore nel ciclo" coerente con una oculata valutazione dello stato reale dei recipienti a pressione e una corretta previsione dell'evoluzione del loro degrado secondo la visione europea umano-centrica di Industria 5.0.

2. Contesto europeo e quadro normativo

Nel perimetro UE, la combinazione di direttive, standard e pratiche di ispezione basata sul rischio orienta l'adozione della PdM sui recipienti in pressione. La Pressure Equipment Directive - PED 2014/68/EU [4] definisce l'ambito delle attrezzature a pressione, i requisiti essenziali di sicurezza, le procedure di valutazione di conformità e la marcatura CE per immissione sul mercato e messa in servizio. I programmi di PdM devono quindi risultare compatibili con i principi di safety by design e con la sorveglianza di mercato, contribuendo a dimostrare che i livelli di rischio rimangono entro limiti accettabili per l'intero ciclo di vita.
La norma EN 16991:2018 [5] fornisce il quadro europeo di ispezione basata sul rischio (Risk-Based Inspection - RBI) per la valutazione e pianificazione delle ispezioni, con linee guida applicabili a recipienti in pressione soggetti a degradazione per corrosione, fatica e danneggiamento meccanico. In questo contesto, la PdM e i dati continui da sensoristica alimentano i modelli di probabilità di guasto $P_f(t)$ e consentono di aggiornare dinamicamente gli intervalli ispettivi, perseguendo un approccio basato sul rischio anziché su scadenze temporali. A livello di policy, i documenti su Industria 5.0 della Commissione Europea [1] enfatizzano un'industria umano-centrica, sostenibile e resiliente, in cui l'operatore è dotato di strumenti digitali per interagire attivamente con i sistemi PHM, piuttosto che esserne semplice destinatario.

3. Tecnologie per il Monitoraggio Predittivo dei Recipienti a Pressione

Dal punto di vista tecnico, la PdM su recipienti in pressione si fonda sulla valutazione del rischio:

$$R = P_f \cdot C_f \tag{1}$$

con P_f, probabilità di guasto, stimata a partire da indicatori di degrado e RUL, e C_f , entità delle conseguenze stimata per i diversi scenari di guasto (sicurezza persone, impatto ambientale, continuità produttiva, perdite economiche).
L'evoluzione del danno nel tempo può essere descritta con modelli matematici differenti a seconda dei meccanismi in gioco. In alcuni casi caratterizzati da fenomeni accelerati, un modello esponenziale può essere adeguato a descrivere la crescita del danno:

$$D(t) = D_0 e^{\alpha t} \tag{2}$$

dove D_0 è la lunghezza iniziale e α il coefficiente di crescita. Per fenomeni di fatica, modelli basati sulla frattura elastica lineare risultano più appropriati: in particolare, la

legge di crescita di Paris collega il tasso di avanzamento della cricca ai cicli di carico e alle variazioni del fattore di intensità degli sforzi, consentendo un legame diretto tra variabili di carico, dati di monitoraggio e previsione di vita residua:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{3}$$

con a lunghezza della cricca, $\frac{da}{dN}$ la crescita della crepa da fatica per un ciclo di carico N, C ed m sono costanti del materiale, determinate in via sperimentale per un dato ambiente operativo (ad es., per un tipo specifico di acciaio in aria a temperatura ambiente), ΔK il range del fattore di intensità degli sforzi, che misura l'intensità delle sollecitazioni attorno alle estremità della cricca e dipende dalla geometria del pezzo, dalla dimensione della cricca e dal carico applicato.
La (3) permette di collegare direttamente i cicli di carico N, i dati di monitoraggio e la previsione di vita residua.

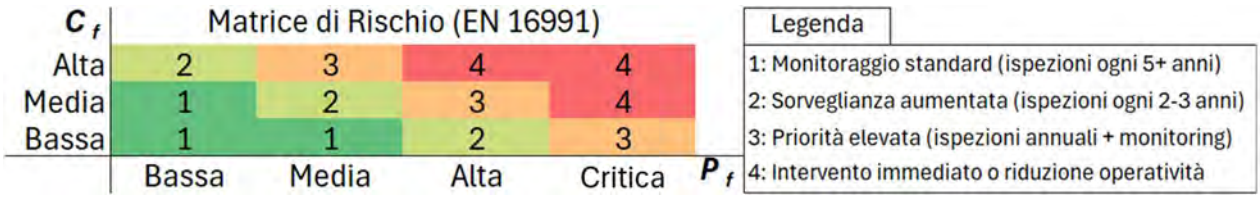


Figura 1. Matrice di Rischio secondo EN 16991

3.1 Il Gemello Digitale dei serbatoi a pressione

La realizzazione di un gemello digitale (Digital Twin – DT) per gestire cicli di carico, dati di monitoraggio e previsione RUL su recipienti in pressione si è dimostrata non solo realizzabile, ma applicata con successo in diversi casi industriali [6,7]. In questo approccio, alla rappresentazione virtuale del componente fisico si affianca un flusso costante di dati provenienti dai sensori, che alimenta il modello digitale e ne aggiorna lo stato di salute nel tempo. Nella nostra analisi ci soffermiamo nello specifico alle tecniche di monitoraggio dinamico delle Emissioni Acustiche (Acoustic Emission - AE) e delle Onde Guidate Ultrasonore (Guided Wave - GW). Le emissioni acustiche forniscono indicatori dinamici di crescita attiva dei difetti (energia cumulata, localizzazioni di cluster), mentre le onde ultrasonore guidate mappano variazioni di spessore e anomalie volumetriche lungo l'intera superficie. Questi segnali, pre-elaborati localmente per eliminare il rumore (attrito, vibrazioni spurie), vengono trasmessi con specifici protocolli verso un'infrastruttura cloud o edge, dove si fondono con i dati operativi (pressione interna, cicli accumulati, corrosione stimata) [8].
Nel cuore di questo sistema risiede un modello fisico dinamico, capace di ricalcolare i campi di tensione e deformazione in funzione dei carichi reali registrati. Sulla base di queste grandezze, il modello prevede l'evoluzione delle cricche, utilizzando leggi di crescita come quella di Paris (3), e aggiorna i parametri del modello in relazione alle tendenze osservate (ad esempio, un aumento dell'energia AE associato alla

propagazione di un difetto). Il risultato è una stima probabilistica della RUL, spesso espressa in termini di intervallo di confidenza (ad es. “con 90% di confidenza, RUL compresa tra 12 e 24 mesi”), anziché come singolo valore numerico [9].
Dal punto di vista operativo, il gemello digitale mette a disposizione una specie di pannello di controllo da cui è possibile visualizzare mappe di rischio in tempo reale (ad es. su saldature critiche), scenari di previsione del tipo cosa succederebbe se si aggiungessero un certo numero di cicli di carico e suggerimenti riguardanti la pianificazione basata sul rischio (RBI). L’intervento dell’operatore rimane fondamentale: sulla base dell’esperienza e della conoscenza specifica dell’impianto, egli può validare o respingere determinati allarmi — per esempio riconoscendo un cluster AE stabile da tempo — e, con le sue annotazioni, contribuire all’evoluzione del modello stesso, in linea con i principi di Industria 5.0.

3.2 Analisi delle Emissioni Acustiche su serbatoi a pressione

Le AE rappresentano la tecnica NDT passiva più consolidata per il monitoraggio dinamico dei recipienti in pressione, rilevando onde elastiche generate da micro-eventi attivi quali nucleazione e propagazione di cricche, fenomeni di frizione, perdite e deformazioni plastiche localizzate. L'energia elastica rilasciata durante questi eventi si propaga nel materiale del recipiente sotto forma di onde elastiche (onde longitudinali, trasversali e superficiali), rilevabili mediante sensori piezoelettrici applicati strategicamente sulla superficie esterna del serbatoio. Le AE hanno un vasto ambito di applicazione, dall'ispezione di attrezzature a pressione durante la prova di accettazione, al monitoraggio continuo in esercizio, trasformando una verifica binaria "superata/non superata" in un'analisi qualitativa e quantitativa dell'evoluzione del danno [10].
L'informazione AE è rinvenibile in parametri standard (conteggi, energia, ampiezza, durata, tempo di salita, noto anche come rise time) e indicatori da questi derivati (parametri di Hurst, entropia spettrale, kurtosis) [10,11], che si correlano con l'entità del danno attraverso relazioni del tipo:

$$D(t) \propto \int_0^t E_{AE}(t)\, dt \tag{4}$$

dove E_{AE} è l'energia cumulata degli eventi.



Figura 2. Catena del segnale AE e modelli di crescita del danno

Tecniche di localizzazione basate ad esempio su differenze temporali di acquisizione dei segnali dai diversi sensori (Time Difference of Arrival - TDOA) permettono di mappare le sorgenti attive su mantello, calotte, saldature e zone di rinforzo, distinguendo e differenziando le EA derivanti da eventi legati a danno strutturale reale che sta evolvendo nel tempo (nucleazione e propagazione di cricche, perdite che peggiorano nel tempo, micro-collassi, ecc.) da altri meccanismi di degrado non direttamente legati alla crescita di un difetto critico (frizione tra parti accoppiate, rumori di processo per turbolenza, cavitazione, disturbi elettrici). I primi sono gli eventi da considerare come veri indicatori di crescita del difetto e quindi di aumento di P_f e riduzione della RUL [12]. L'AE si sta sempre più consolidando come tecnica affidabile per il monitoraggio di micro-cricche da fabbricazione, definendo soglie specifiche per accettazione/reiezione [13], e come "early warning", rilevando in tempo reale l'attivazione di difetti prima della soglia di rottura [14]. Ciò anche grazie all'implementazione di algoritmi di classificazione delle AE con tecniche di Machine Learning [15] e attraverso algoritmi di analisi dei segnali che permettono di discernere e classificare i dati di monitoraggio acquisiti [16].
Occorre, tuttavia, considerare che persistono alcune criticità e limitazioni d'impiego determinate dalla durabilità dei sensori, specie in ambienti con temperature elevate o con elevati tassi di umidità, a causa della deriva delle proprietà piezoelettriche o danneggiamento meccanico [17]. Altre criticità si manifestano a causa della possibile instabilità dell'accoppiamento dei diversi sensori sul recipiente per la degradazione dell'adesivo e per la presenza di falsi positivi da fenomeni non direttamente legati a danni strutturali reali [17]. Tuttavia, l'evoluzione verso Industria 5.0 mitiga tali rischi sia tramite la gestione comparata di dati multi-tecnologia, sia dalla validazione dell'operatore.

3.3 Analisi delle Onde Guidate Ultrasonore su serbatoi a pressione

Le GW sono una tecnica consolidata per condotte e tubazioni, ma rappresentano una tecnologia complementare in rapida espansione per recipienti in pressione, particolarmente efficaci per lo screening volumetrico di zone difficilmente accessibili (saldature circonferenziali, valvole e ugelli, rinforzi, calotte emisferiche). La loro capacità di propagare lungo il mantello cilindrico del recipiente, coprendo aree estese, da pochi sensori permanenti o semi-permanenti, le rende ideali per PdM su superfici >100 m².
Le GW sfruttano la guida d'onda in lastre cilindriche, con 2 famiglie modali principali [18]:

- Modi simmetrici S_0/SH_0: Alta sensibilità a variazioni di spessore (corrosione, erosione), perdite di sezione trasversale e delaminazioni; bassa attenuazione (<0.5 dB/m);
- Modi antisimmetrici A_0: Elevata sensibilità a difetti superficiali o prossimi alla superficie (cricche radiali, fenomeno di degradamento), ma maggiore dispersione e attenuazione.

Per i recipienti in pressione, le onde guidate vengono in genere eccitate in una banda dell'ordine di alcune decine–centinaia di kHz, perché questo intervallo consente un buon compromesso tra sensibilità al difetto e distanza ispezionabile lungo il mantello. In molti studi applicativi si lavora, a titolo indicativo, tra circa 50 e 250 kHz: a frequenze più basse la portata aumenta ma la risoluzione peggiora, mentre a frequenze più alte si ottiene una migliore definizione dei difetti a scapito della distanza coperta e con maggiore attenuazione [19].
In un intervallo intorno ai 100 kHz, per spessori tipici di parete, le GW hanno mostrato di poter evidenziare riduzioni di spessore dell'ordine di pochi punti percentuali rispetto allo spessore nominale mantenendo, al tempo stesso, distanze utili di propagazione che, in condizioni favorevoli, possono raggiungere alcune decine di metri lungo la generatrice del recipiente, sufficienti a coprire intere fasce di mantello con pochi punti di accesso [20].



Figura 3. Propagazione delle onde guidate e sensibilità modale

La propagazione nel mezzo è multimodale e ciò introduce una complessità nella gestione ed interpretazione del segnale che richiede tecniche di elaborazione avanzate. Normalmente si procede con lo scomporre i segnali complessi, combinazione di onde S_o, SH_o e A_o, in contributi associati ai diversi modi e alle diverse frequenze, migliorando il rapporto segnale/rumore e la leggibilità dei riflessi da difetto, ottenendo informazioni su dove e quando si verificano le caratteristiche del segnale. In parallelo, algoritmi di imaging (ad es. il Total Focusing Method), opportunamente adattati al caso di onde guidate su geometrie cilindriche, permettono di "ricostruire" mappe bidimensionali o tridimensionali dell'intensità di diffusione dei segnali nel mezzo, che si traducono in rappresentazioni spaziali del danno (ad esempio spessori ridotti, cavità o cricche localizzate) direttamente sovrapposte alla geometria del recipiente [21].
Le onde guidate nei recipienti a pressione possono rilevare:

- Corrosione generalizzata: riduzione spessore parete > 5%;
- Corrosione localizzata (pitting): cavità con profondità > 10% spessore;
- Cricche: orientate perpendicolarmente alla direzione di propagazione;
- Delaminazioni: in recipienti con rivestimenti.

Il metodo GW è stato ampiamente studiato ed ha dato risultati importanti riguardo alle soglie di rilevabilità, anche su recipienti a pressione [22]. Performance tipiche evidenziano probabilità di rilevamento (PoD) > 90% per difetti con perdita di area > 5-7% della sezione ispezionata e falsi allarmi: < 5% in condizioni operative controllate, con range effettivo fino a 5-7 metri da ciascun collare di trasduttori [23]. Le principali limitazioni nell'uso della tecnica GW sono dovute alla complessità delle geometrie dei serbatoi a causa delle molte discontinuità (valvole, boccaporti, giunti saldati, ecc.) che generano riflessioni multiple o possono attenuare le onde [19].
Nell'ambito della manutenzione predittiva ibrida, l'integrazione tra GW ed AE si realizza attraverso una fusione bidirezionale dei dati che sfrutta i punti di forza complementari delle due tecniche [6].

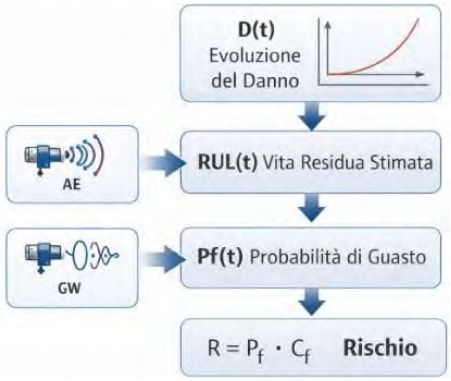


Figura 4. Flusso di manutenzione predittiva con rischio

Ad esempio, la rilevazione di un evento di AE localizzato su una specifica saldatura circonferenziale o in prossimità di un ugello, rappresenta un segnale di allarme che può automaticamente attivare una scansione GW mirata nella stessa regione. Le GW, grazie alla loro capacità di caratterizzazione volumetrica, forniscono allora informazioni quantitative su dimensione, profondità e orientamento del difetto (es. cricca radiale, perdita di spessore), trasformando un sospetto da AE in una diagnosi strutturata con parametri geometrici utilizzabili nei modelli di integrità.

4. Industria 5.0: paradigma umano-centrico e applicazioni al PHM

Nei documenti ufficiali della Commissione Europea [1,2,3], l'Industria 5.0 non è descritta come una semplice sostituzione dell'automazione di Industria 4.0, ma come un suo naturale completamento. Il nuovo paradigma pone l'essere umano al centro dei processi produttivi e manutentivi, valorizzando le competenze cognitive, creative e decisionali proprie degli operatori, mentre la tecnologia svolge una funzione di supporto e potenziamento.
Nel contesto della PdM e del PHM per recipienti in pressione, Industria 5.0 implica un'evoluzione da sistemi centrati sull'apparato (dove l'automazione è prevalente e l'uomo è passivo fruitore di allarmi) a piattaforme di collaborazione uomo-macchina, in cui l'operatore interagisce attivamente con i dati sensoriali e i modelli predittivi [24].

Ad esempio, algoritmi XAI (eXplainable Artificial Intelligence), permettono non solo di prevedere quale sia la RUL, ma mostrano il perché della previsione indicando quali segnali e quali strutture di degrado hanno portato a quel risultato [25]. Queste spiegazioni facilitano il lavoro dell'esperto, che può confrontare i risultati del modello con la storia operativa dell'impianto, validare le previsioni o integrare la propria conoscenza per prendere decisioni più fondate.



Figura 5. Roadmap concettuale: da Industria 4.0 a 5.0 per la PdM su recipienti in pressione

Lavori recenti [26], sottolineano come i sistemi PHM debbano incorporare il fattore umano nella progettazione stessa, non solo come utente finale, ma come partecipante attivo nella raccolta dati, nell'analisi e nel processo decisionale fornendo il valore aggiunto necessario per ottimizzare l'efficacia della manutenzione.

5. Conclusioni

Le tecnologie ibride di PdM basate su Emissioni Acustiche e Onde Guidate, quando vengono integrate in un gemello digitale del recipiente, segnano un cambio di passo: l'ispezione basata sul rischio non è più uno schema statico, ma diventa una sorveglianza realmente dinamica, aggiornata in continuo e coerente con i requisiti PED e con il quadro metodologico della EN 16991.
In questo scenario, un approccio dichiaratamente umano-centrico, in cui l'operatore resta nel ciclo decisionale e viene supportato da strumenti di intelligenza artificiale, consente di costruire sistemi PHM collaborativi: il sapere esperto viene messo a sistema, gli allarmi diventano più selettivi e mirati e si riduce in modo significativo il peso dei falsi positivi, in piena sintonia con la visione europea di Industria 5.0.

Bibliografia

[1] European Commission – Research and Innovation. Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry (2021). https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en

[2] European Commission – Research and Innovation. Industrial Technologies Roadmap on Human-Centric Research and Innovation for the manufacturing sector (2024). https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-

publications-tools-and-data/publications/all-publications/industrial-technologies-roadmap-human-centric-research-and-innovation-manufacturing-sector_en
[3] European Commission – Research and Innovation. Industry 5.0, a transformative vision for Europe (2022). https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-transformative-vision-europe_en
[4] Direttiva 2014/68/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 maggio 2014, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione
[5] EN 16991:2018. Risk based inspection framework (RBIF) per l'integrità degli asset
[6] C. Karapanagiotis, et al. Towards predictive maintenance of hydrogen pressure vessels based on multi-sensor data fusion and digital twin modelling. EWSHM 2024. 11th European Workshop on Structural Health Monitoring. DOI: 10.58286/30513
[7] A. Khaled, et al. Digital twin for real-time pressure vessels fatigue life prediction. Advances in Mechanical Engineering. 2025; 17(5). DOI: 10.1177/16878132251327666
[8] I. Khaled, et al. Digital twin for real-time pressure vessels fatigue life prediction. Advances in Mechanical Engineering. 2025;17(5). DOI: 10.1177/16878132251327666
[9] M.F. Milazzo, et. al. A probabilistic approach for the estimation of the residual useful lifetime of atmospheric storage tanks in oil industry. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022; vol. 77. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104781
[10] M. Prokofyev, H. Marihart, G. Lackner. Acoustic emission monitoring for industrial pressure vessels and infrastructure. EW/SHM 2024. 11th European Workshop on Structural Health Monitoring. DOI : 10.58286/29708
[11] D. Bogomolov, et al. Approccio basato sull'entropia del segnale per la stima dei tempi di arrivo delle emissioni acustiche nel monitoraggio delle apparecchiature a pressione. Atti Convegno SAFAP 2023. Brescia, 22,23 novembre 2023
[12] INAIL. Procedura per il controllo di serbatoi per GPL interrati, tumulati (o ricoperti) e fuori terra di capacità maggiore di 13 m^3 con tecnica basata sul metodo di Emissione Acustica ai fini della verifica di integrità. Rev.0, novembre 2020
[13] Wuriti G.S., Chattopadhyaya S., Thomas T. Acoustic emission signal characteristics of maraging steel 250 pressure vessel during a hydraulic qualification test. Nondestruct. Test. Evaluation 2022; 37(1)
[14] C. Di Girolamo, et al. Criteri di applicabilità di metodologie alternative o complementari alla prova idraulica su attrezzature a pressione. Atti Convegno SAFAP 2023. Brescia, 22,23 novembre 2023
[15] F. Hossein, et al. Acoustic emission and machine learning algorithms for leak detection and condition monitoring in pipelines. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024

[16] C. Mennuti, et al. Tecniche per la localizzazione di danni strutturali per mezzo di AE: Algoritmi e possibili soluzioni HW per WSN. Atti Convegno SAFAP 2016. Milano, 15,16 Novembre 2016
[17] E.D Kastle, et al. Failure Monitoring Failure of Composite Pressure Vessels with Acoustic Emissions. Journal of Nondestructive Evaluation. 2026;45(39). DOI: 10.1007/s10921-025-01319-1
[18] P. Cawley. Guided waves in long range nondestructive testing and structural health monitoring. NDT & E International, 2024; Vol. 144, 103149. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103149
[19] JM.J.S. Lowe. Long Range Guided Wave Inspection Usage – Current Commercial Capabilities and Research Directions. NDT.net, Review report
[20] M. K Yücel, et al. An ultrasonic guided wave approach for the inspection of overhead transmission line cables. Applied Acoustic, 2017, 122(23,24). DOI : 10.1016/j.apacoust.2017.02.003
[21] D. Szlaszynski, et al. Short Range Pipe Guided Wave Testing Using SH0 Plane Wave Imaging and Total Focusing Method. Sensors, 2022, 22(8). DOI : 10.3390/s22082973
[22] J.L. Rose. Ultrasonic Guided Waves in Solid Media. Cambridge University Press.2014
[23] A.J. Brunner. Structural Health and Condition Monitoring with Acoustic Emission and Guided Ultrasonic Waves: What about Long-Term Durability of Sensors, Sensor Coupling and Measurement Chain. Appl. Sci. 2021, 11(24). DOI : 10.3390/app112411648
[24] P. Dersin, K. Bajarunas, M. Arias-Chao. Analytical Modeling of Health Indices for Prognostics and Health Management. Proceedings of the 8th European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2024. DOI: 10.36001/phme.2024.v8i1.4083
[25] A.K.B.M. Nor, et al. Overview of Explainable Artificial Intelligence for Prognostic and Health Management. Sensors; 2021, 21(22), 7700. DOI: 10.3390/s21227700
[26] P. Khanna, J. Kumari, R. Karim. Human-Centric PHM in the Era of Industry 5.0. Proceedings of the 8th European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2024. DOI: 10.36001/phme.2024.v8i1.4121

Dispositivi di protezione dalla temperatura minima negli Impianti Criogenici

R. Acerboni[1], E. Artenio[2], F. Di Rocco[3], F. Panin[4]

[1]Inail - UOT di Venezia
[2]Inail - Dit
[3]Inail - UOT di Verona
[4]Inail - UOT di Padova

Sommario
L'articolo analizza il ruolo dei dispositivi di protezione dalla temperatura minima (LTP) negli impianti criogenici, alla luce delle disposizioni introdotte dalla Circolare n° 53 del 23 dicembre 2003, emanata in seguito a un grave incidente industriale. Nella memoria vengono esaminati i requisiti tecnici delle valvole automatiche di sicurezza, confrontando le principali soluzioni oggi disponibili e lo stato dell'arte in assenza di norme armonizzate specifiche. L'attenzione è posta anche sugli aspetti procedurali, in particolare sul processo di raccolta e verifica dei dati per l'analisi dei rischi. I riscontri statistici presentati evidenziano una diffusa carenza di consapevolezza nella corretta taratura e applicazione degli LTP. Infine, si discutono configurazioni particolari, come i vaporizzatori ad acqua, e possibili sviluppi futuri in ambito normativo e operativo.

1. Introduzione

L'ex-ISPESL, a seguito di un grave incidente che poi divenne caso studio a livello internazionale, emanò la Circolare n° 53 del 23 dicembre 2003, "*Adeguamento di impianti contenenti fluidi criogenici allo stato liquido da gasificare*" [1], poi di seguito abrogata dalla Circolare n. 9 - *"Impianti criogenici - Ulteriori chiarimenti e precisazioni alla Circolare n. 53 del 23 dicembre 2003" [*[2], del 19 luglio 2004*.*

Il grave incidente seguito dall'emissione della suddetta Circolare è quello avvenuto il 13 aprile del 2003 a Caivano (NA), verificatosi a seguito della rottura di un serbatoio in acciaio al carbonio, infragilito da azoto a bassa temperatura, in un impianto che erogava azoto gasificato a circa 500 mc/h a 9 bar di pressione [3].

Nella dinamica dell'incidente del serbatoio polmone in acciaio al carbonio, il sistema di vaporizzazione dell'azoto liquido smise di funzionare correttamente, l'azoto, entrando nel serbatoio a temperature criogeniche, causò l'infragilimento del metallo (transizione duttile-fragile), portando al cedimento strutturale e allo scoppio sotto la pressione operativa [1].



lunedì 14 aprile 2003 | Italia | l'Unità | 11

Raffaele Sardo

CAIVANO «Sembrava la partenza dello shuttle. È saltato in aria il tetto del sertatoio dove era custodito l'azoto. Una botta impressionante che è stata udita distintamente in tutta la zona Industriale. Sono arrivato sul posto poco dopo e quello che ho visto è stato uno spettacolo raccapricciante». Un operaio della PCC, la fabbrica di vernici, che ha sede sulla statale Sannitica, nella frazione Pascarola del comune di Caivano, ai confini tra le province di Napoli e Caserta, racconta con le lacrime agli occhi quello di cui è stato testimone ieri mattina attorno alle 7,30 quando, per cause non ancora accertate, è scoppiato un sertatoio pieno di 20mila litri di azoto, dove la sostanza viene conservata in pressione a 50 gradi sotto zero. Per quattro di loro che stavano cercando di riparare un guasto, non c'è stato nulla da fare. Le vittime sono Francesco De Simone, 55 anni, di Pozzuoli; Francesco Antonio Muto, 54, di Caivano; Vincenzo Di Costanzo, 53, di Caivano, e Giovanni Maione, 35, della provincia di Caserta. Tre di loro erano dipendenti della Ppg vernici, il quarto era un operaio di una ditta esterna, la Air Liquid, chiamato per un inter-

L'incidente è avvenuto nello stabilimento della Ppg di Pascarola di Caivano I lavoratori uccisi dall'onda d'urto

Lo scoppio è stato così forte che la parte superiore della struttura, alta circa sette metri, è stata proiettata verso l'alto ed è poi ricaduta a terra

che lavora a ciclo continuo un semilavorato che viene utilizzato per la produzione di vernici per auto. Il turno di notte era appena finito e due di essi non hanno potuto smontare per cercare di riparare il guasto. E' arrivato da Caserta Giovanni Maione, tecnico della AIR Liquid, ma non ha fatto in tempo a rendersi conto della pericolosità della cosa. La scena che si sono trovati davanti i primi soccorritori è stata scioccante: pezzi di lamiera dappertutto, ma anche i corpi dei quattro lavoratori erano irriconoscibili. Il pezzo più grande che è stato ritrovato è un busto di una persona. Per comporre le salme c'è voluta l'intera mattinata. L'esplosione ha sparso frammenti in tutta la zona circostante.

«Stamani si è verificato un problema al sertatoio» ha dichiarato il responsabile europeo della sicurezza della Ppg Luigi Borriello. «Per questa ragione i nostri dipendenti hanno chiesto un tecnico della Air Liquid. Impossibile al momento stabilirne la cause. Può essersi trattato del cedimento di una valvola o di un cedimento strutturale. L'azoto all'interno del sertatoio era in pressione e una falla ha provocato lo scoppio. Il gas non è comunque infiammabile e non è tossico all'aperto». A Borriello non risulta che ci fossero stati problemi al sertatoio nei giorni precedenti.

Il sindaco di Caivano Domenico Semplice si è recato subito sul posto. Dopo l'ispezione è apparso visibilmente scosso: «Conoscevo due delle vittime - ha dichiarato - che erano di Caivano. Siamo di fronte a un evento tragico in un'azienda in cui la sicurezza viene tenuta in grande considerazione e che le autorità tengono sotto costante controllo». Il sindaco ha poi proclamato il lutto cittadino.

Sull'accaduto indaga il commissariato di Afragola, mentre i vigili del fuoco hanno fatto tutti i rilievi tecnici. Il sostituto procuratore di Napoli Luigi Gay, che conduce l'inchiesta sull'esplosione, è

Esplosione nella fabbrica di vernici: 4 morti

Un silos con 20mila litri di azoto è saltato in aria, tra Caserta e Napoli. Ferita una guardia

La fabbrica di vernici vicino Napoli dove si è verificata l'esplosione — Ciro Fusco/Ansa

la lista nera

Italia, a rischio 10mila aziende

ROMA La Ppg Italia, proprietaria degli impianti di Pascarola dove ieri hanno perso la vita quattro persone per un'esplosione, è nella lista delle aziende a rischio stilata dal ministero dell'Ambiente secondo i criteri fissati dalla «Direttiva Seveso». Si tratta di una serie di disposizioni messe a punto a livello europeo dopo l'incidente di Seveso, nel 1976, che provocò danni gravissimi alla salute di oltre 2000 cittadini e l'evacuazione di 600 abitanti dalle loro abitazioni. In base a quei criteri, aggiornati nel 1996, il ministero dell'Ambiente ha calcolato che sono circa 10mila le imprese a rischio, per un totale di 800.000 addetti ai lavori. Il pericolo è esteso a 5.500.000 di persone, di cui 200.000 risiedono di fatto proprio in misura estremamente grave da eventuali incidenti. Caratteristica tutta italiana infatti è che molti stabilimenti sorgono all'interno di aree urbane densamente popolate (come nel caso di Falconara, Porto Marghera, Trecate, Genova, Livorno, Ravenna, Manfredonia, Ferrara, Taranto, Priolo).

Nella zona dove ieri si è verificato l'incidente negli impianti della Ppg, il ministero dell'Ambiente conta numerose situazioni di pericolo. Ben 73 impianti campani figurano nella lista nera e 27 di questi sono giudicati molto pericolosi. Mentre nella sola provincia di Napoli, che all'interno della regione detiene la maglia nera, gli impianti a rischio sono 36. Non solo aziende impiananti, ma anche aziende che possono causare vere e proprie calamità in caso di incidente. Il pericolo può derivare dal rilascio e fuga di sostanze ad elevata tossicità, esplosione di sostanze infiammabili, perdite di prodotti tossici o infiammabili durante le operazioni di movimentazione e di stoccaggio, mancanza di adeguate vie di fuga o sovraccarico della viabilità ordinaria in caso di emergenza.

Giornale Online

Figura 1. Foto dell'incidente del 13 aprile del 2003 presso la PPG di Caivano tratta

Il titolo stesso della circolare "*Adeguamento di impianti contenenti fluidi criogenici allo stato liquido da gasificare*", faceva intendere che molti impianti, fossero potenzialmente inadeguati all'esercizio in sicurezza, sia per eventuali aumenti nella capacità di utilizzo che rendevano i vaporizzatori atmosferici insufficienti, sia per la mancanza di un controllo/intervento sul gas in uscita dal vaporizzatore, troppo freddo per la linea a valle, ad esempio in caso di ridotta efficienza (ghiaccio sul vaporizzatore).

Non potendo fare ipotesi sulle configurazioni degli impianti già installati, la circolare fornisce indicazioni precise su tutti gli aspetti sensibili, indicando quali informazioni i gestori devono reperire dagli utilizzatori, fino agli accessori da installare.

L'obiettivo di questa memoria è evidenziare come, a distanza di oltre 20 anni, non ci sia ancora una piena consapevolezza dei rischi, una carenza di conoscenza forse dovuta a un vuoto normativo: le disposizioni tecniche presenti nella circolare, infatti, costituiscono l'unico elenco delle caratteristiche tecniche che gli LTP devono possedere, a differenza delle PSV, per le quali i costruttori possono fare riferimento a diverse norme.

2. Le disposizioni tecniche: la valvola automatica con azione diretta (LTP)

2.1 Requisiti della LTP richiesti dalla circolare

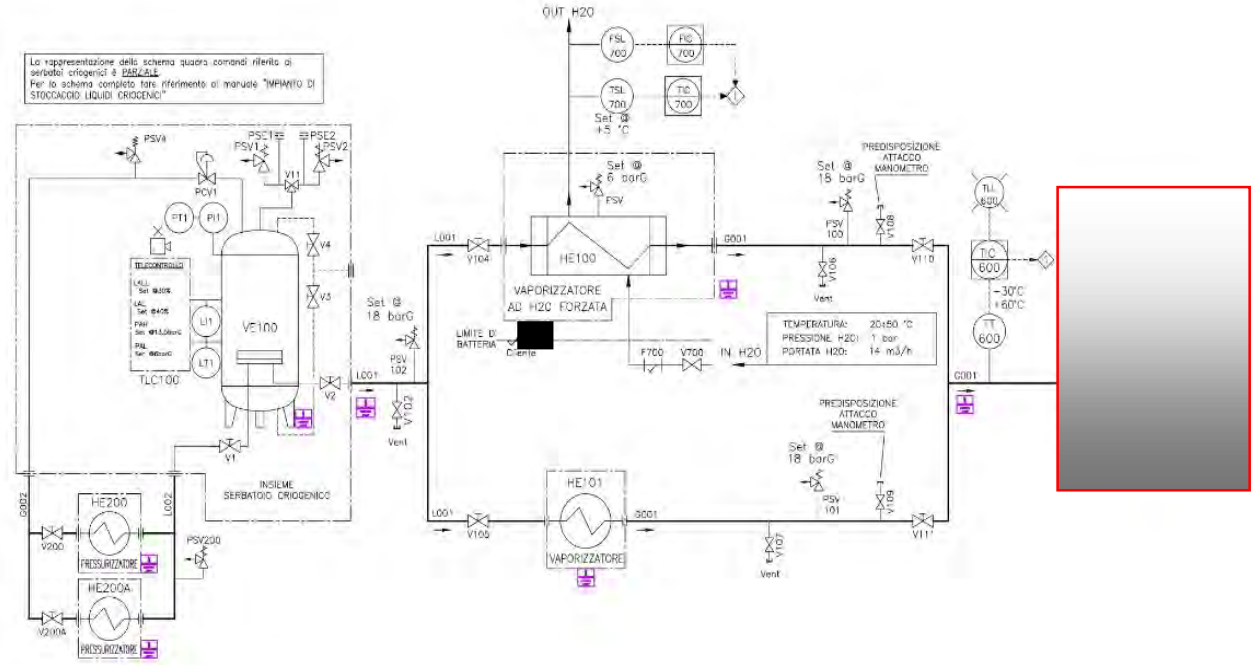


Figura 2. Esempio di installazione con evidenziato il dispositivo LTP

Riguardo l'adeguamento degli impianti criogenici tra le disposizioni tecniche elencate, la circolare 09/2004 richiedeva al punto 6 di " *adottare [...] i seguenti criteri impiantistici:*

a) *a valle del vaporizzatore dovrà essere prevista* ***una valvola automatica*** *(con funzione di sicurezza) che chiuda il passaggio del fluido criogenico qualora la temperatura del fluido stesso sia inferiore a quella minima di progetto del serbatoio cui il fluido è destinato [...] la cui* ***funzione deve essere unicamente di interruzione*** *(non è consentito che sia modulante);*

L'obiettivo del punto 6a) è duplice e centrale: sia attenuare il rischio di infragilimento in ogni impianto, con un sistema di azionamento diretto in cui l'abbassamento della temperatura di un fluido è evento che ne arresta il flusso, sia evitare l'installazione di accessori o l'uso di configurazioni non efficaci, (come ad esempio l'uso di valvole modulanti); a tal fine sono state dettagliate le specifiche tecniche funzionali nei punti successivi.

b) ***tutti gli elementi costituenti l'impianto e posti a monte della suindicata valvola automatica, dovranno essere realizzati con materiale resiliente***

c) *l'installazione di una sola valvola automatica sul fluido gasificato è consentita qualora a valle del vaporizzatore siano presenti solo recipienti in acciaio non resiliente di capacità minore o uguale a 25 litri e/o tubazioni aventi DN minore o uguale a 100 mm*

d) *Un unico sistema di sicurezza marcato CE e appartenente alla IV categoria di cui alla Direttiva 97/23/CE può sostituire le due valvole indicate ai punti 6a) e 6c)*

e) *per gli impianti di cui al primo comma del precedente punto 6c) la valvola automatica prevista al punto 6a) potrà essere sostituita da adeguato dispositivo che garantisca analoga protezione a condizione che un'approfondita analisi dei rischi dimostri l'impossibilità del verificarsi dell'evento dannoso di rottura fragile*

f) *nel caso di installazione delle valvole di cui ai punti 6a) e 6c), l'analisi di rischio dovrà tener conto anche dei seguenti eventi:*

- ✓ *bloccaggio in posizione di apertura, anche parziale, delle valvole automatiche a valle del vaporizzatore;*
- ✓ *bloccaggio in posizione di chiusura della valvola automatica di regolazione del fluido riscaldante ove prevista;*
- ✓ *mancato funzionamento dell'interblocco tra le valvole di cui sopra ove previsto per motivi di sicurezza;*
- ✓ *malfunzionamento del sistema di regolazione della temperatura del fluido riscaldante ove previsto;*
- ✓ *malfunzionamento del sistema di regolazione e di blocco del fluido criogenico eventualmente non gasificato;*

I casi previsti dalla lettera 6f) implicano quindi una eventuale ridondanza del sistema di interruzione sia in intercetto (valvola) che in interblocco (sensore)

g) i sistemi di regolazione, di blocco e di interblocco, nonché le valvole automatiche sui fluidi devono essere espressamente dichiarati idonei all'uso cui sono destinati oppure, se svolgono le funzioni di sicurezza, devono essere di IV Categoria e marcati CE;...

Il punto 6g) implica la cosiddetta caduta positiva, l'intervento in caso di malfunzionamenti

h) *qualora l'utenza sia alimentata da più impianti in parallelo, ciascuno di essi deve essere separato dagli altri mediante l'installazione di due valvole di non ritorno in serie. Se, per caratteristiche costruttive, le predette valvole rientrano in una delle quattro categorie della 97/23/CE ciascuna di esse deve riportare la prescritta marcatura CE*

2.1.1 Riscontri nello stato dell'arte delle LTP

Il nuovo requisito impiantistico introdotto dalla circolare è sicuramente quello relativo alla "valvola automatica", all'epoca non erano infatti presenti norme armonizzate (a riguardo non sono presenti nemmeno attualmente), è possibile rifarsi a norme costruttive relativamente ai singoli componenti (UNI 15714:2022, attuatori, UNI EN 10269:2013, valvole di intercettazione basse temperature, ecc...)

Sono presenti sul mercato diversi costruttori di valvole automatiche, con diverse configurazioni di LTP, possiamo distinguere le valvole automatiche principalmente in:

- Valvole azionate
  - azionamento
    - pneumatico
    - elettrico
  - ridondanza
    - su più sensori

    - su più valvole
    - completa
- Valvole a restringimento termico

2.1.2 Le valvole azionate

Le valvole azionate sono le più diffuse, la centralina può spesso rilevare la temperatura istantanea del gas, durante le verifiche d'intervento ci si accorge facilmente dell'azionamento della valvola pneumatica, sulla parte più alta è infatti presente un segnalatore d'intervento.
Tutte le valvole sono a "caduta positiva", un eventuale diminuzione di pressione dell'aria per rottura di un tubo, o la mancanza di alimentazione, determina la chiusura della valvola con l'arresto dell'adduzione di gas alla linea, questo grazie al fatto che sono normalmente in equilibrio con una molla che causa la chiusura della valvola.

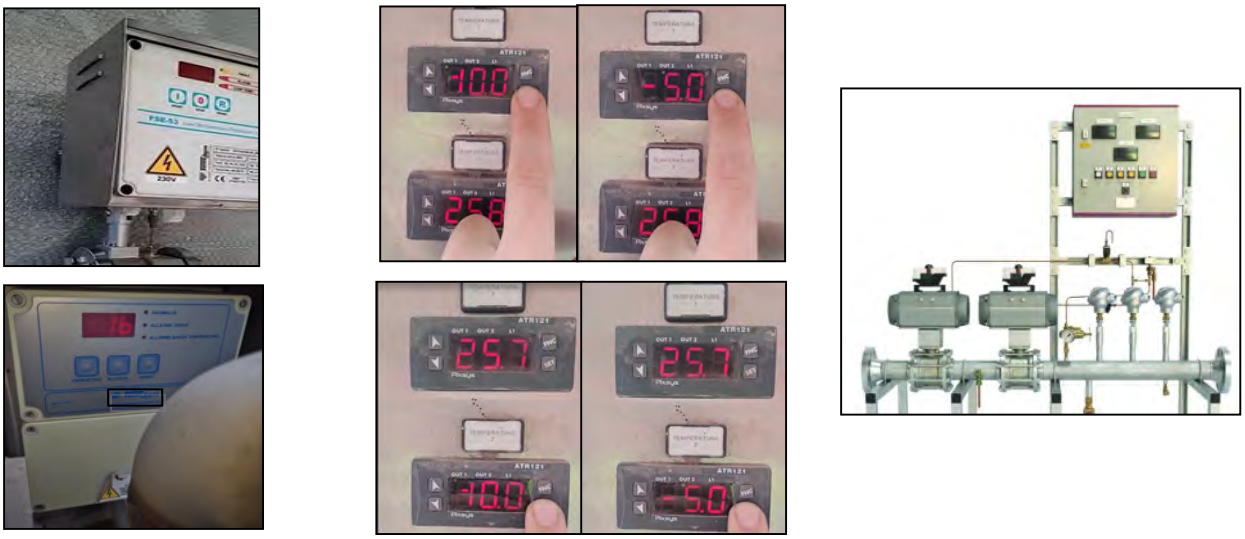


Figura 3. Da sinistra a destra: 2 LTP ad azionamento elettrico (alto) e pneumatico (basso), centralina che mostra ridondanza sui sensori di temperatura (taratura -5/-10°C), LTP con ridondanza su sensori (3) e attuatori pneumatici (2)

2.1.3 Le valvole a restringimento termico

Le valvole a restringimento termico sono completamente meccaniche, non hanno alcuna centralina o sistema di azionamento attivo, ma sfruttano la differenza tra coefficienti di dilatazione di diversi materiali in equilibrio con una molla (Elemento 4 in fig 4), la valvola è normalmente aperta, il sensore di temperatura (Elemento 6 nella schematizzazione di fig 4), è sostanzialmente un contenitore di un liquido sensibile che si dilata/contrae in modo direttamente proporzionale al calore ricevuto/ceduto dal/al fluido che lambisce il sensore.
Se un fluido eccessivamente freddo raggiunge il sensore di temperatura (6), il liquido all'interno del sensore si contrae e l'otturatore tubolare (5) viene spinto dalla molla di posizionamento (4) contro la sede a tenuta (2);

La temperatura limite e l'intervallo di strozzamento a monte possono essere regolati entro l'intervallo limite.
La valvola si riapre solo quando la temperatura del fluido supera il limite impostato di 2 K.
Se il sistema di sensori è difettoso la valvola si chiude, la perdita di liquido implica infatti il suo restringimento come per diminuzione di temperatura.

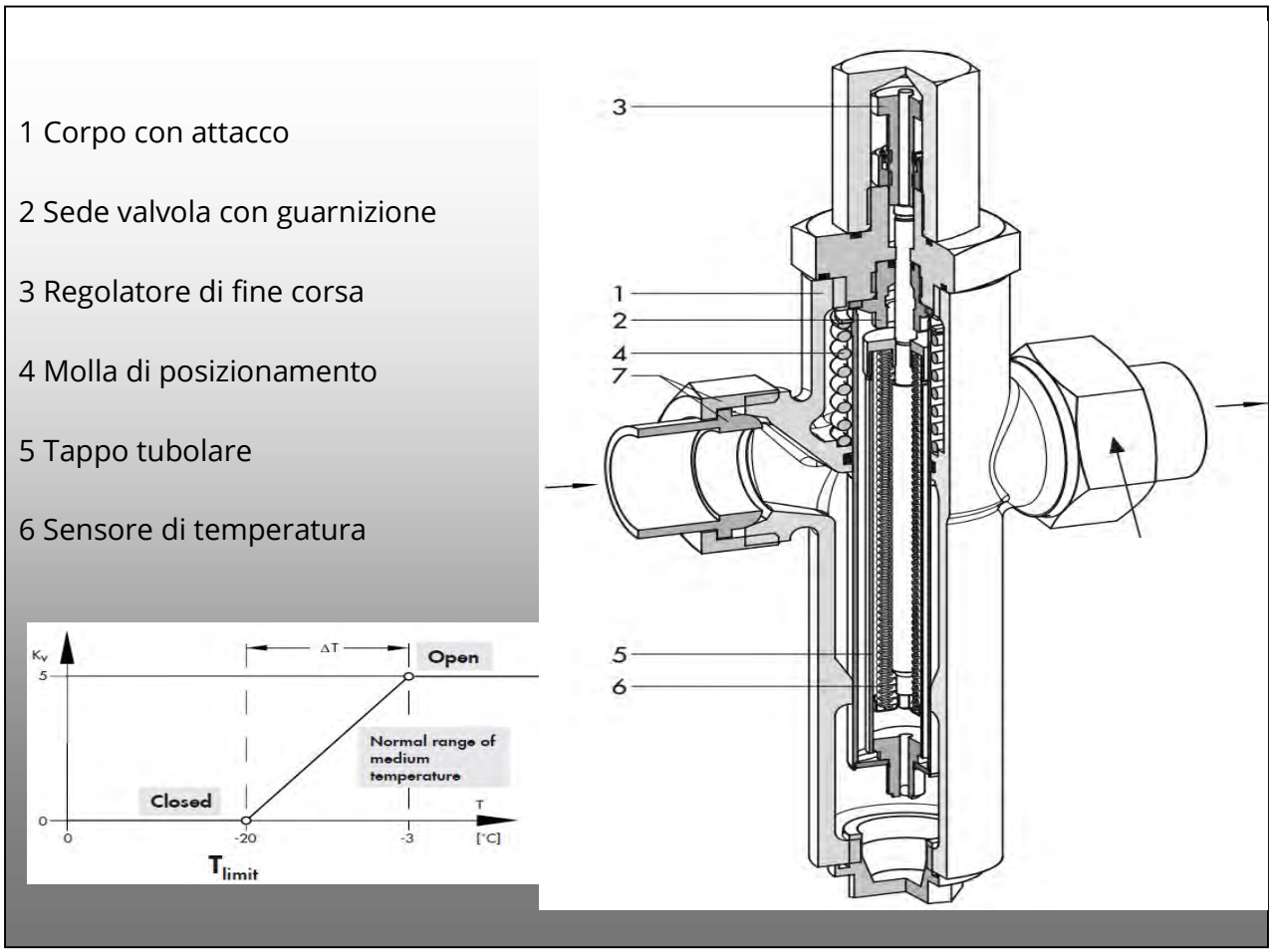


Figura 4. Da sinistra in senso orario: legenda componenti e disegno costruttivo di un LTP, dinamica di funzionamento a restringimento termico,

Allo stato dell'arte quindi tutti i requisiti tecnici sono quelli che vengono richiesti dalla circolare, non sono presenti norme specifiche come per le PSV, con le UNI 13648-1:2009 (appositamente per criogenici), UNI EN ISO 4126:2021, UNI EN 14129:2025, ecc....

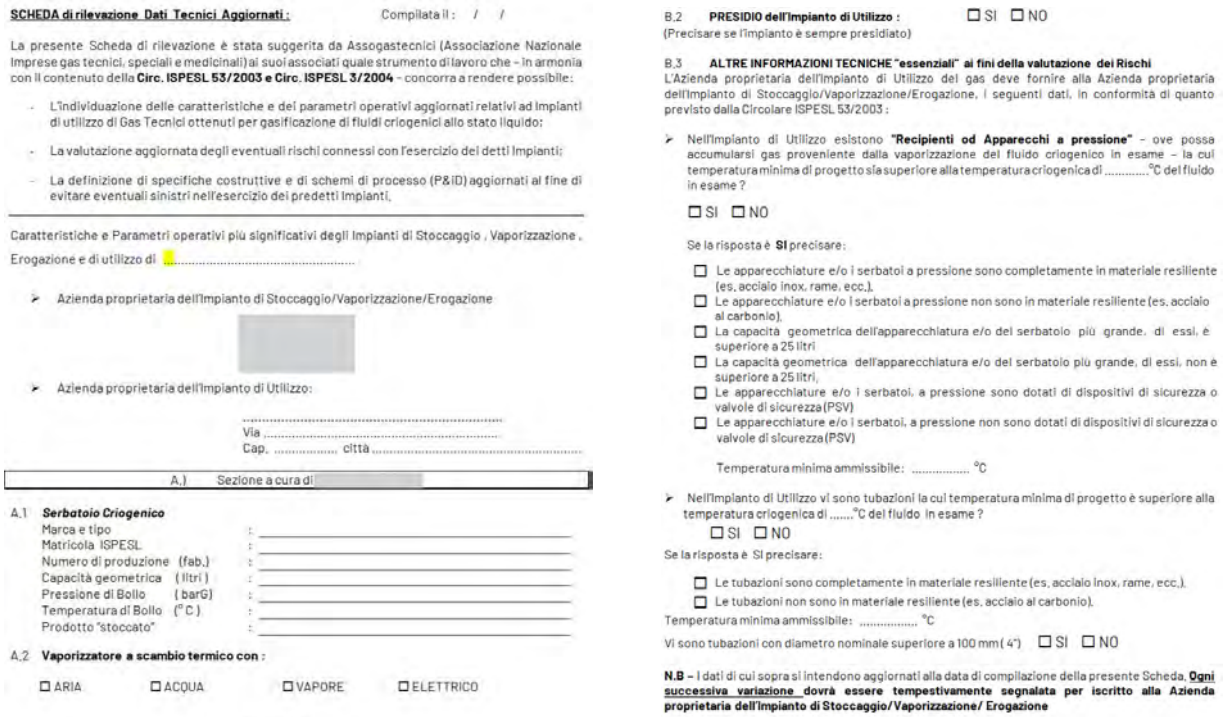
3. Le procedure: comunicare analisi dei rischi

Le procedure indicate nella circolare 09/2004, per la realizzazione di P&I e analisi di rischio, vedono proprietario del criogenico e utilizzatore collaborare per una realistica e completa redazione di quanto richiesto, nello specifico si chiede, al penultimo dettaglio del punto 4 lettera d, di tenere conto "*delle grandezze critiche da controllare con particolare riferimento alle caratteristiche dei materiali impiegati*".
Per questo, i gestori dei criogenici, raccolgono i dati necessari tramite un apposito modulo che l'utilizzatore dell'impianto deve compilare.

L'associazione di categoria ha predisposto moduli che coprono in maniera esaustiva tutti i punti richiamati dalla circolare, sia esplicitamente che implicitamente; la maggior parte dei gestori adotta tali moduli o ne utilizza lo schema di base in maniera sostanzialmente fedele (fig. 5).

3.1. Moduli visionati

Il modulo di raccolta dati deve contenere in modo capillare tutti i dati richiesti dalla circolare, in particolare specificare l'utilizzo, le temperature ammissibili per ogni tipo di attrezzatura installata dalla ditta utilizzatrice del gas a valle dell'impianto criogenico e molti altri dati utili al corretto dimensionamento dell'impianto e alla corretta taratura degli accessori di sicurezza.
La maggior parte dei gestori di serbatoi criogenici utilizza moduli di raccolta dati che si rifanno, nella sostanza, a quello in fig. 5, sia perché efficace nel rilevare tutti i dati richiesti dalla circolare, sia perché comprende informazioni utili e funzionali ai servizi annessi all'installazione.



SCHEDA di rilevazione Dati Tecnici Aggiornati : Compilata il : / /

La presente Scheda di rilevazione è stata suggerita da Assogastecnici (Associazione Nazionale Imprese gas tecnici, speciali e medicinali) ai suoi associati quale strumento di lavoro che – in armonia con il contenuto della **Circ. ISPESL 53/2003 e Circ. ISPESL 3/2004** – concorra a rendere possibile:

- L'individuazione delle caratteristiche e dei parametri operativi aggiornati relativi ad impianti di utilizzo di Gas Tecnici ottenuti per gasificazione di fluidi criogenici allo stato liquido;
- La valutazione aggiornata degli eventuali rischi connessi con l'esercizio dei detti impianti;
- La definizione di specifiche costruttive e di schemi di processo (P&ID) aggiornati al fine di evitare eventuali sinistri nell'esercizio dei predetti impianti.

Caratteristiche e Parametri operativi più significativi degli Impianti di Stoccaggio , Vaporizzazione , Erogazione e di utilizzo di .....

- Azienda proprietaria dell'Impianto di Stoccaggio/Vaporizzazione/Erogazione
- Azienda proprietaria dell'Impianto di Utilizzo:

Via .....
Cap. ..... città .....

A.) Sezione a cura di

A.1 ***Serbatoio Criogenico***
Marca e tipo :
Matricola ISPESL :
Numero di produzione (fab.) :
Capacità geometrica (litri) :
Pressione di Bollo (barG) :
Temperatura di Bollo (°C) :
Prodotto "stoccato" :

A.2 **Vaporizzatore a scambio termico con :**
☐ ARIA ☐ ACQUA ☐ VAPORE ☐ ELETTRICO

B.2 **PRESIDIO dell'Impianto di Utilizzo :** ☐ SI ☐ NO
(Precisare se l'impianto è sempre presidiato)

B.3 **ALTRE INFORMAZIONI TECNICHE "essenziali" ai fini della valutazione dei Rischi**
L'Azienda proprietaria dell'Impianto di Utilizzo del gas deve fornire alla Azienda proprietaria dell'Impianto di Stoccaggio/Vaporizzazione/Erogazione, i seguenti dati, in conformità di quanto previsto dalla Circolare ISPESL 53/2003 :

- Nell'Impianto di Utilizzo esistono **"Recipienti od Apparecchi a pressione"** – ove possa accumularsi gas proveniente dalla vaporizzazione del fluido criogenico in esame – la cui temperatura minima di progetto sia superiore alla temperatura criogenica di .....°C del fluido in esame ?

☐ SI ☐ NO

Se la risposta è **SI** precisare:

- ☐ Le apparecchiature e/o i serbatoi a pressione sono completamente in materiale resiliente (es. acciaio inox, rame, ecc.).
- ☐ Le apparecchiature e/o i serbatoi a pressione non sono in materiale resiliente (es. acciaio al carbonio).
- ☐ La capacità geometrica dell'apparecchiatura e/o del serbatoio più grande, di essi, è superiore a 25 litri
- ☐ La capacità geometrica dell'apparecchiatura e/o del serbatoio più grande, di essi, non è superiore a 25 litri,
- ☐ Le apparecchiature e/o i serbatoi, a pressione sono dotati di dispositivi di sicurezza o valvole di sicurezza (PSV)
- ☐ Le apparecchiature e/o i serbatoi, a pressione non sono dotati di dispositivi di sicurezza o valvole di sicurezza (PSV)

Temperatura minima ammissibile: ..... °C

- Nell'Impianto di Utilizzo vi sono tubazioni la cui temperatura minima di progetto è superiore alla temperatura criogenica di .....°C del fluido in esame ?

☐ SI ☐ NO

Se la risposta è SI precisare:

- ☐ Le tubazioni sono completamente in materiale resiliente (es. acciaio inox, rame, ecc.).
- ☐ Le tubazioni non sono in materiale resiliente (es. acciaio al carbonio).

Temperatura minima ammissibile: ..... °C

Vi sono tubazioni con diametro nominale superiore a 100 mm (4") ☐ SI ☐ NO

N.B – I dati di cui sopra si intendono aggiornati alla data di compilazione della presente Scheda. Ogni successiva variazione dovrà essere tempestivamente segnalata per iscritto alla Azienda proprietaria dell'Impianto di Stoccaggio/Vaporizzazione/ Erogazione

Figura 5. Prima e quinta pagina di un modello di rilevamento dati di 7 pagine di una società che gestisce criogenici

3.2 Riscontri statistici

Avendo trovato frequentemente delle discrepanze tra le impostazioni della temperatura di intervento degli LTP e la manifattura della linea a valle, si è consegnato un modulo (fig 6) di dichiarazione in cui si prende atto delle conseguenze di una dichiarazione mendace; lo si è fatto visionare, compilare e firmare direttamente agli utilizzatori dei serbatoi criogenici.

DICHIARAZIONE DELL'ATTO DI NOTORIETA'

(art. 47 D.P.R. 28 dicembre 2000 n. 445 e s.m.i.)

Cognome_____ Nome_____

Luogo di nascita_____ data di nascita_____

nel ruolo di_____ della ditta_____,

consapevole delle sanzioni penali richiamate dall'art. 76 del D.P.R. 28 dicembre 2000 n. 445 e s.m.i. in caso di dichiarazioni mendaci e della decadenza dei benefici eventualmente conseguiti al provvedimento emanato sulla base di dichiarazioni non veritiere, di cui all'art. 75 del richiamato D.P.R. e s.m.i., sotto la propria responsabilità

DICHIARA all'INAIL

che le attrezzature installate a valle del serbatoio criogenico hanno le seguenti criticità:

- Tubazioni con Tmin=_____
- Membrature con Tmin=_____
- Macchinari con Tmin_____

Luogo_____, li_____ Dichiarante

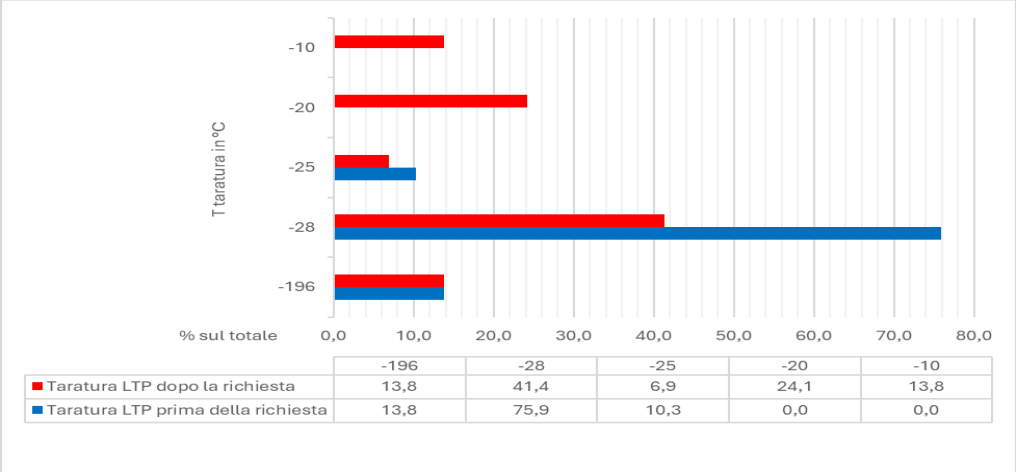
_____

Figura 6. Dichiarazione consapevole delle sanzioni in caso mendace

Questo modulo è stato sottoposto in aggiunta a quello che le ditte avevano già visionato, compilato e firmato in precedenza sotto richiesta del gestore del criogenico.

Alcune ditte che gestiscono criogenici stanno revisionando il modulo di raccolta dati già in uso, per integrarlo con la raccolta di ulteriori dati utili ed eventualmente anche con una maggior definizione della responsabilità del dichiarante.

La differenza tra i valori ottenuti prima e dopo le richieste di verifica dati tecnici delle attrezzature installate a valle del criogenico nell'impianto utilizzatore, sintetizzata nel grafico di fig. 7, evidenzia come non fossero state prese in considerazione le attrezzature più critiche, ovvero quelle garantite a -10°C; viceversa per le attrezzature resilienti non c'è stata alcuna modifica, ovvero non è stato installato alcun LTP.



	-196	-28	-25	-20	-10
Taratura LTP dopo la richiesta	13,8	41,4	6,9	24,1	13,8
Taratura LTP prima della richiesta	13,8	75,9	10,3	0,0	0,0

Figura 7. confronto tra la consapevolezza delle caratteristiche dell'impianto da parte degli utilizzatori prima e dopo la richiesta di verifica ulteriore

4. La valvola automatica ad azione indiretta: i vaporizzatori ad acqua

Nel caso di vaporizzatori ad acqua, qualora l'acqua interna al vaporizzatore si avvicini alla temperatura di solidificazione atmosferica (0°C), dovrà essere predisposto un LTP che blocchi l'adduzione del refrigerante nel vaporizzatore.

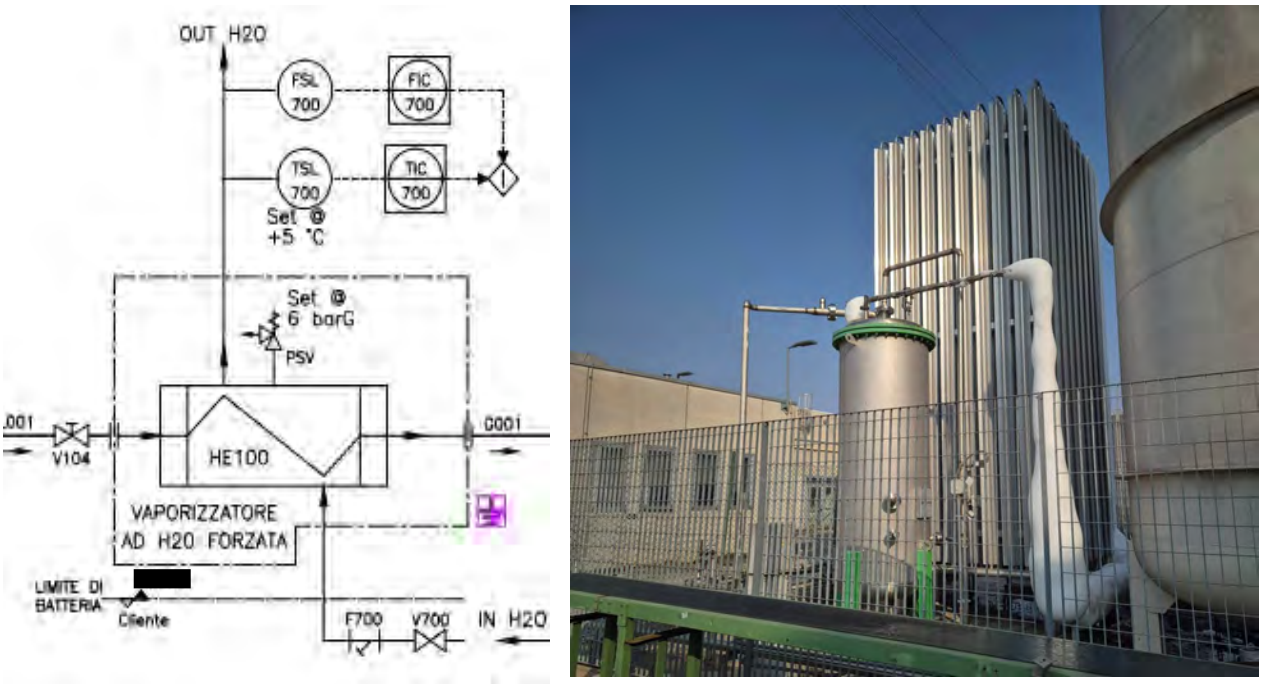


Figura 8. A destra un vaporizzatore ad acqua schematizzato a sinistra

In figura 8 un esempio di vaporizzatore ad acqua con caratteristiche lato acqua P 6 bar, T 99°C-0°C. L'acqua circola tra lo scambiatore della rete di raffreddamento tecnico della ditta utilizzatrice e il mantello del vaporizzatore criogenico, essendo un sistema a vaso aperto non si supereranno mai i 99°C e 6bar.

Un sistema di questo tipo non era stato pensato all'interno della circolare, la differenza sostanziale sta nel tipo di azione: l'abbassamento della temperatura o del flusso nel fluido di riscaldamento del vaporizzatore causa l'arresto dell'adduzione del fluido criogenico da vaporizzare.

Un accessorio che funziona in modo simile è la VIC (Valvola di Intercettazione del Combustibile), interviene bloccando l'adduzione di gas quando l'acqua in uscita dalla caldaia si avvicina all'ebollizione, come LTP non ha norme UNI di riferimento ma, nell'Appendice I della Raccolta R, trova descritte tutte le caratteristiche costruttive necessarie, tra cui la costante di tempo.

Tra i RES dell'allegato II, al punto 2.11, non si citano accessori di sicurezza sull'aumento o diminuzione della temperatura, ma in generale si richiede che siano costruiti in modo affidabile e manutenibili, che non dipendano da altre funzioni e che siano "fail-safe".

Dal punto di vista della configurazione ci sono due differenze:

A. l'arresto del fluido criogenico è a monte del vaporizzatore e non a valle

B. devono essere definite caratteristiche di intervento tali da scongiurare la solidificazione dell'acqua a valvola intervenuta
    - Portata dell'acqua di riscaldamento
    - Temperatura dell'acqua in uscita
    - Tempo di intervento della valvola

Andando a definire esclusivamente il caso limite, ovvero la massima adduzione di liquido alla temperatura criogenica, valutando i casi di equilibrio liquido vapore, sarà necessario definire delle grandezze soglia in ingresso che parifichino le calorie da cedere.

$[Q(soglia)_{H2O\ pompa} \times (H(T=intervento)_{H2Oa20°C} - H(t=5°C)_{H2O})] > \{Q(P_{Max})_{O2} \times [H(t=5°C)_{O2} - (H(T_{min})_{O2} + H_{evap})]\}$

Questa però rischia di essere una formula troppo stringente, difficilmente la portata di ossigeno liquido verso il vaporizzatore sarà quella presente alla massima pressione, per questo si utilizza un sistema di controllo a valle del vaporizzatore con soglia su portata minima a T di uscita dell'acqua di riscaldamento.

5. Conclusione

La circolare ha definito uno spartiacque riguardo alla diffusione di LTP negli impianti criogenici, nel rilievo statistico presentato non sono stati trovati impianti privi di LTP, ma degli impianti con LTP non correttamente tarati, ovvero intorno ai -30°C (fondo scala per la taratura della temperatura d'intervento e temperatura di alcune macchine per il taglio laser).

Le statistiche presentate nella memoria, dimostrano come, sia presso gli utilizzatori di criogenici, sia presso i gestori, non sia ancora adeguatamente diffusa una piena consapevolezza dei rischi dovuti all'incompatibilità per abbassamento di temperatura, questo probabilmente anche a causa di una "lacuna normativa" nel merito.

Un potenziale sviluppo sarebbe quello di ampliare il campione statistico proposto nella memoria e coinvolgere l'associazione di categoria con la quale valutare la possibilità di modificare il modulo proposto (come fatto nella nostra sperimentazione) e di intervenire anche sulle configurazioni prive di LTP per i vaporizzatori ad acqua.

Bibliografia e sitografia

[1] "Adeguamento di impianti contenenti fluidi criogenici allo stato liquido da gasificare", ISPESL circolare n° 53 - Prot.10888/2003

[2] "Impianti criogenici - Ulteriori chiarimenti e precisazioni alla Circolare n. 53 del 23 dicembre 2003", Circolare n. 9 - Prot. n. 53/CONT/2004

[3] Explosion of a nitrogen tank in a varnish company - La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques (https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/33775_en/?lang=en)

[4] R. Sardo, Unità del 14/04/2003

La manutenzione in-house e out-source: modalità, criticità e requisiti per la gestione con AI

G.L. Amicucci[1], M. T. Settino[1]

[1]Inail – Dit

Sommario

Nel settore dell'Industria di Processo, la gestione della manutenzione può essere effettuata utilizzando risorse interne all'azienda (in-house) o esterne (out-sourcing) o una combinazione di entrambe le modalità. Le aziende a cui appartengono le risorse esterne sono appaltatrici dell'azienda committente e la loro valutazione e gestione diviene un elemento essenziale dell'attività manutentiva, accrescendone la complessità e la quantità delle informazioni da gestire. In tal caso, prendere decisioni sulle azioni manutentive migliori da intraprendere per fare in modo che queste siano vantaggiose economicamente e preservino la salute, la sicurezza e l'ambiente, può diventare difficile senza il supporto alle decisioni fornito da un sistema esperto, o una AI, in grado di estrarre schemi da contesti non strutturati. L'attività manutentiva può trarre beneficio dall'uso di piattaforme IT dedicate su cui operano: applicativi per la parte logistica e amministrativa; basi di dati per registrare i dati, provenienti dal campo e da verifiche e ispezioni (Big Data); algoritmi di Machine Learning in grado di ricavare dai dati i valori parametrici da utilizzare nei modelli predittivi del comportamento futuro delle apparecchiature (Digital Twins). Il lavoro indica una possibile metodologia per la progettazione di sistemi esperti da utilizzare per individuare una strategia di manutenzione ottimale.

1. Introduzione

Nel settore dell'Industria di Processo, le attività di manutenzione di ambienti, impianti e attrezzature di lavoro rivestono carattere essenziale per il buon esito dei processi produttivi, favorendo anche la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori e di eventuali soggetti terzi coinvolti e riducendo la probabilità di rischi ambientali.

Lo scopo è quello di preservare nel tempo la funzionalità e l'affidabilità dei processi, fornendo al contempo al management e agli uffici tecnici preposti quegli elementi che consentano una corretta pianificazione e gestione delle energie e delle risorse aziendali, secondo modalità volte ad assicurare elevati standard produttivi e nel rispetto dei requisiti di salute e sicurezza.

L'attività di manutenzione ha subito significativi mutamenti negli ultimi decenni, evolvendo da un'impostazione tradizionale, con interventi di tipo correttivo in caso di guasto, ad un'attività più complessa, con interventi anche di tipo preventivo, predittivo e periodico e un'attenzione crescente alla formazione ed alle competenze specifiche dei lavoratori addetti. La legislazione per la *Salute e Sicurezza sul Lavoro*

(*SSL*) ha trasformato in obbligo la manutenzione e le modalità del suo adempimento, ponendo il datore di lavoro di fronte ad una duplice problematica:

- da un lato, l'esigenza di rispettare le indicazioni fornite dal d. lgs. 81/2008, al fine di garantire la permanenza nel tempo dei requisiti di sicurezza richiesti per gli ambienti, gli impianti e le attrezzature di lavoro;
- dall'altro l'assoluta necessità che siano adeguatamente tutelate anche la salute e la sicurezza dei lavoratori addetti a tale attività (che sono esposti a rischi maggiori rispetto agli altri lavoratori, poiché operano in condizione di sicurezza sospesa).

Un primo obiettivo del lavoro è quello di mettere in evidenza i problemi specifici che si presentano laddove le operazioni di manutenzione siano esternalizzate con l'affidamento in appalto. In tal caso, una corretta valutazione dei rischi non può prescindere dall'identificazione delle interferenze dovute alla compresenza, in un unico contesto, dei lavoratori di più imprese impiegati in attività diverse. La gestione di tali problemi può trarre vantaggio dall'utilizzo di *sistemi esperti* o *sistemi AI*.
Un altro obiettivo è quello di introdurre alcune metodologie di progettazione di *sistemi esperti per la gestione tecnica della manutenzione*. Simili sistemi sono in grado di utilizzare come dati di ingresso le indicazioni di manutenzione rilasciate dai fabbricanti, quelle contenute nelle norme tecniche e i dati dal campo provenienti da verifiche, da ispezioni o da sensori in tempo reale, per fornire in uscita la migliore strategia di manutenzione da perseguire (dal punto di vista della sicurezza e dell'economia).

2. Evoluzione dell'attività di manutenzione

L'attuale evoluzione tecnologica ("Industria 4.0") sta progressivamente spingendo l'Industria di Processo verso una fase di crescente complessità tecnica, organizzativa e normativa, che impatta sulle attività necessarie per la produzione di un bene. Ciò ha indotto molte aziende a voler acquisire maggiore competitività in un mercato ormai globale, portandole alla specializzazione produttiva, in modo da concentrare le risorse solo su un numero ridotto di attività principali. Per questo hanno cercato di individuare quali attività fossero indispensabili per la produzione, tanto da dover essere svolte internamente (in-house), e quali non fossero così strategiche, in modo da poter essere esternalizzate (out-sourcing) [1].
Per un'azienda esternalizzare un'attività significa anche stabilire la metodologia di selezione degli appaltatori, dei sub-appaltatori e/o dei lavoratori autonomi e le attività di controllo sugli stessi. L'esternalizzazione rappresenta un cambiamento significativo nell'organizzazione del lavoro dell'azienda committente, che consiste nel tener conto della presenza dei lavoratori esterni, non soltanto per la gestione dei contratti, ma anche per la gestione della salute e della sicurezza sul lavoro. Le attività svolte dagli appaltatori devono essere bene integrate nelle attività dell'azienda committente in modo che le tutele possano essere estese a tutti i lavoratori coinvolti.
Per quanto riguarda il settore della manutenzione dell'Industria di Processo, le criticità, in termini di salute e sicurezza sul lavoro, che lo caratterizzano sono [2]:

- ambiente di lavoro sconosciuto e rischi sconosciuti per i lavoratori degli appaltatori, dei sub-appaltatori e per i lavoratori autonomi;
- complessità nell'organizzazione del lavoro, dei ruoli e delle responsabilità, poiché i lavoratori appartengono a un'organizzazione (l'azienda appaltatrice) ma lavorano nell'ambiente di un'altra organizzazione (l'azienda committente);
- la presenza di lavoratori degli appaltatori e le attività di manutenzione da essi svolte possono comportare rischi per gli altri lavoratori (ad esempio, gli appaltatori potrebbero portare i propri mezzi di trasporto in loco o utilizzare attrezzature che potrebbero essere fonte pericolo);
- mancanza di comunicazione tra il personale di produzione e quello di manutenzione: la manutenzione spesso è effettuata mentre l'attività prosegue normalmente (la presenza di lavoratori dipendenti da datori di lavoro diversi, che svolgono lavori diversi, quali produzione e manutenzione, evidenzia l'importanza del coordinamento dei lavori e della reciproca informazione);
- pressione temporale: il processo di produzione si interrompe e deve essere riavviato il più rapidamente possibile, mettendo sotto pressione gli addetti alla manutenzione, che sono spinti a lavorare rapidamente piuttosto che in sicurezza;
- nell'appalto (o subappalto) potrebbero trovare impiego lavoratori non madrelingua, con ridotta capacità di comunicazione, difficilmente in grado di comprendere le norme e le istruzioni di sicurezza se impartite al momento;
- la forte concorrenza tra appaltatori può portare a situazioni in cui la riduzione dei costi è ottenuta sacrificando la formazione, le procedure di sicurezza, le competenze e le attrezzature (per questa ragione il committente dovrebbe stabilire gli standard di qualità già nella fase di progettazione dell'appalto).

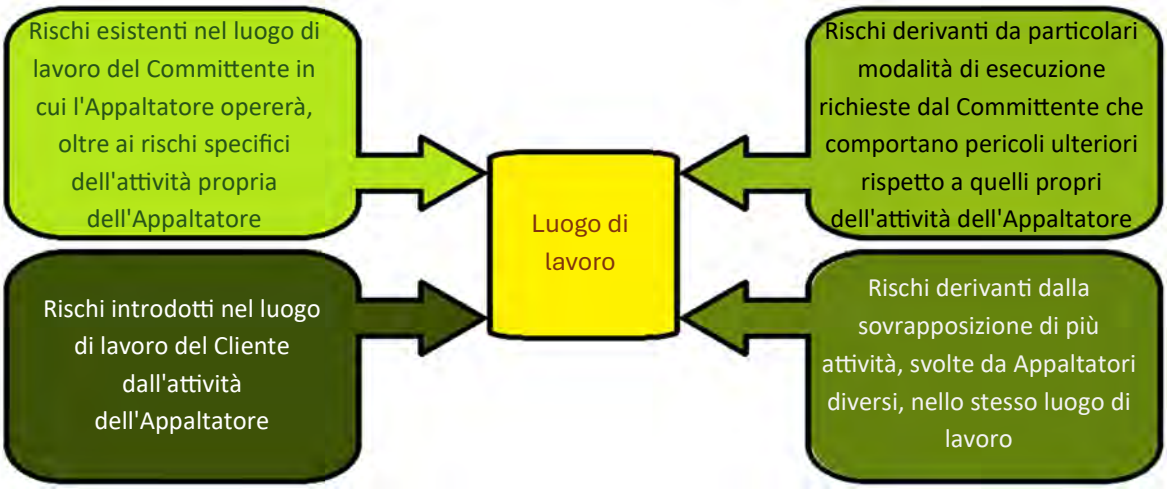


Figura 1. Possibili rischi da interferenza

In base al tipo di attuazione le attività di manutenzione possono essere divise in:
- attività che, durante la normale produzione, sono effettuate continuativamente all'interno dell'azienda committente da aziende appaltatrici esterne (ad esempio, servizi regolamentati da contratto quadro su base annuale);

- attività che, durante la normale produzione, sono effettuate all'interno dell'azienda committente da aziende appaltatrici esterne solo su richiesta specifica (ad es.: manutenzione correttiva di attrezzature a pressione guaste);
- attività straordinarie soggette alla disciplina del Titolo IV del d.lgs. 81/2008 per le quali è prevista la realizzazione del *Piano di Sicurezza e Coordinamento* (PSC).

In un contesto di compresenza di lavoratori di aziende diverse nello stesso ambiente, accanto ai rischi specifici propri dell'attività svolta dai lavoratori, possono verificarsi "contatti rischiosi", dovuti alla sovrapposizione di attività lavorativa tra lavoratori di datori di lavoro diversi (Fig. 1). L'insieme di tali "contatti rischiosi", detto "interferenza", è disciplinato nell'art. 26 del d.lgs. 81/2008, con indicazioni aggiuntive per i cantieri temporanei e mobili contenute nel Titolo IV dello stesso decreto (Fig. 2).

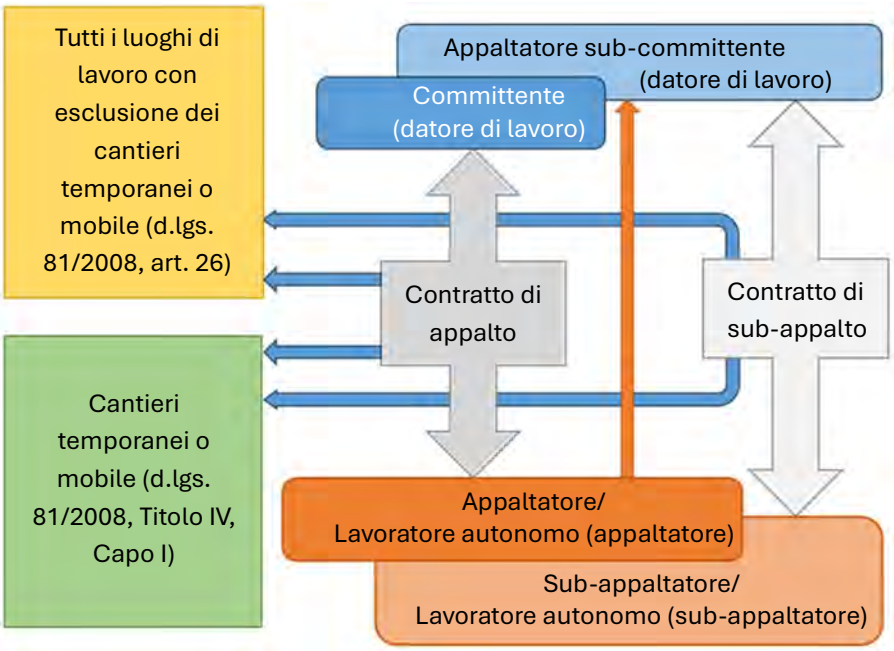
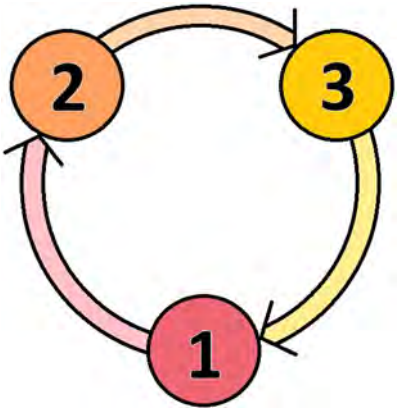


Figura 2. Riferimenti normativi per la SSL nei contratti di appalto/sub-appalto

Durante la manutenzione di un impianto di processo, l'azienda committente può mettere in atto le seguenti azioni per la gestione delle interferenze (Fig. 3):

- verificare l'idoneità tecnico-professionale degli esecutori delle attività di manutenzione, siano essi aziende appaltatrici/sub-appaltatrici o lavoratori autonomi, in relazione ai lavori da affidare in appalto o contratto d'opera;
- fornire dettagliate informazioni sui rischi specifici e sui rischi da interferenza esistenti nel luogo di lavoro in cui sono destinati ad operare i lavoratori delle aziende appaltatrici/sub-appaltatrici o i lavoratori autonomi, e sulle misure di prevenzione e di emergenza da adottare in relazione alla propria attività;
- cooperare con le aziende appaltatrici/sub-appaltatrici e i lavoratori autonomi all'attuazione delle misure di prevenzione e protezione dai rischi sul lavoro che possono incidere sull'attività lavorativa oggetto dell'appalto o contratto d'opera;

- coordinare gli interventi di protezione e prevenzione dai rischi cui sono esposti i lavoratori;
- formalizzare le attività di gestione della salute e sicurezza sul lavoro con la redazione del DUVRI o del PSC, coadiuvato dalle figure della sicurezza a tale scopo designate (CSP, CSE, RSPP, preposti).



1. **Coordinamento:** L'azienda committente coordina razionalmente le fasi dell'attività armonizzandole tra loro in modo da eliminare o ridurre i rischi da interferenza
2. **Cooperazione:** L'azienda committente coopera con e favorisce la cooperazione tra le imprese appaltatrici, sub-appaltatrici e i lavoratori autonomi per predisporre ed applicare le misure di prevenzione e protezione necessarie ad eliminare o ridurre i rischi da interferenza
3. **Informazione:** L'azienda committente fornisce a tutti i lavoratori informazioni e conoscenze utili all'identificazione, riduzione e gestione dei rischi nell'ambiente di lavoro

Figura 3. La gestione della Salute e Sicurezza sul Lavoro in presenza di rischi da interferenza

3. Digitalizzazione e nuove tecnologie nel settore della manutenzione

L'avvento della digitalizzazione ha introdotto strumenti avanzati che hanno trasformato profondamente i processi aziendali e in particolare il settore della manutenzione degli impianti di processo, compresi gli aspetti di Salute e Sicurezza sul Lavoro ad essa correlati.

- L'*Internet of Things* (*IoT*) consente di comunicare da remoto con impianti e attrezzature dotate di apposite interfacce, rendendo possibile effettuare il monitoraggio, la manutenzione e il controllo a distanza, con notevole risparmio delle risorse economiche e riduzione dei tempi di intervento. La rete internet è pubblica, ciò ha i suoi vantaggi rispetto alle reti dedicate: l'hardware è meno costoso, data la grande diffusione; i protocolli sono noti, cosa che permette un risparmio dei tempi di formazione; i protocolli sono anche continuamente testati ed eventualmente emendati e corretti, cosa che consente un certo risparmio dei costi di gestione. Tuttavia, l'essere una rete pubblica, con hardware e protocolli noti, è anche fonte di svantaggi, poiché facilita gli accessi indesiderati e gli attacchi informatici, cosa che ha reso la cybersecurity fondamentale.
- La miniaturizzazione della tecnologia dei sensori, per un gran numero di grandezze fisiche, e la crescente economicità ha permesso la realizzazione di *reti di sensori* (*Sensor Networks – SN*). Alcune possono fornire informazioni su impianti di processo estesi, dotati di un gran numero di componenti; altre possono essere integrate negli abiti di lavoro e rese indossabili, divenendo in grado di fornire una telemetria del lavoratore [una serie di dati sull'ambiente di lavoro (ad esempio, livelli di rumore, qualità dell'aria, temperatura), sulla posizione e/o su parametri fisiologici personali (pressione, battito cardiaco, saturazione ossigeno,

temperatura corporea, livello di stress)][1] mentre si muove in un ambiente di lavoro potenzialmente pericoloso per svolgere i compiti assegnati, tra cui anche quelli manutentivi per gli impianti di processo.

- L'interfacciamento ad internet delle reti di sensori che monitorano impianti e attrezzature ha messo a disposizione una grande mole di dati (*Big Data*), che deve essere analizzata per estrarre informazioni per la produzione e la manutenzione.
- A volte tali dati sono analizzati direttamente, mentre altre volte sono confrontati con un'eguale mole derivante dai *Digital Twins* (simulazioni basate su modelli matematici dei processi, degli impianti e delle attrezzature), allo scopo di individuare discostamenti dai comportamenti ideali, che potrebbero essere dovuti a usure, malfunzionamenti o guasti, fornendo indicazioni preziose ai manutentori. Infatti, la *manutenzione predittiva* (un tipo di manutenzione che cerca di anticipare i problemi prima che si verifichino, permettendo di evitare costose riparazioni di emergenza) fino a poco tempo fa era messa in atto riconoscendo le situazioni di guasto incipiente attraverso il monitoraggio di opportuni parametri fisici (*manutenzione su condizione*), recentemente, invece, è messa in atto anche ricorrendo alle simulazioni basate sui Digital Twins.
- La disponibilità di simili strumenti, che permettono, in tempo reale, di anticipare i guasti, consente l'invio di avvisi immediati e l'implementazione tempestiva di azioni preventive, consentendo di pianificare la gestione dei ricambi e delle scorte, in modo da ottimizzare le risorse impiegate e il numero degli interventi manutentivi e da ridurre al minimo i tempi di inattività, e le modalità di esecuzione.
- La *realtà virtuale* (*Virtual Reality – VR*) permette la creazione di ambienti di lavoro virtuali utili nel campo della manutenzione a scopo formativo e informativo, oppure per testare quali sequenze di una procedura di lavoro presentano i rischi minori, senza doverli effettivamente correre prima della scelta definitiva della procedura e della messa in atto operativa.
- La *realtà aumentata* (*Augmented Reality – AR*) permette, attraverso l'uso di appositi visori, l'aggiunta di elementi simbolici alla realtà. Tali elementi possono essere utilizzati nel settore della manutenzione per segnalare: avvisi di pericolo, allarmi di sicurezza, presenza di sistemi di protezione o misure di sicurezza, documenti relativi allo stato di manutenzione di un impianto di processo o di un'attrezzatura reale. Gli elementi simbolici possono essere selezionabili per scelta volontaria del lavoratore che utilizza i visori o possono attivarsi su condizione (ad esempio, l'avvicinamento del lavoratore con i visori ad un elemento reale).
- La *realtà estesa* (*eXtended Reality – XR*) integra le caratteristiche di VR e AR in una modalità mista. La XR può essere utilizzata anche come supporto al controllo e alla manutenzione da remoto di impianti di processo e attrezzature (ad esempio,

[1] L'acquisizione (anche per scopi di SSL) dei parametri fisiologici o dei movimenti dei lavoratori, solleva questioni etiche relative alla privacy. Sebbene tesa a migliorare la SSL, tale acquisizione, stressante per il lavoratore, è anche fonte di interrogativi riguardo alle modalità di utilizzo, archiviazione e condivisione dei dati raccolti, essendo possibile un eventuale uso improprio da parte dei datori di lavoro o di terzi.

per azionare sistemi automatici o movimentare droni robotici che svolgano manutenzione di impianti di processo e attrezzature in situazioni pericolose).
- Sistemi di sorveglianza ambientale, basati su droni, permettono la raccolta di immagini in diverse lunghezze d'onda che, analizzate in tempo reale da software intelligenti, permettono di individuare l'esistenza di perdite dagli impianti, perdite che dovranno poi essere eliminate ricorrendo ad opportuni interventi manutentivi seguiti eventualmente da bonifica ambientale.

4. AI nella gestione della manutenzione

Le risorse digitali garantiscono che l'attività manutentiva (preventiva, predittiva e correttiva) sia eseguita puntualmente, in modo da prolungare la vita utile degli impianti di processo e delle attrezzature, riducendo al contempo i periodi di inattività imprevisti, consentendo anche una migliore pianificazione e allocazione delle risorse e portando, di conseguenza, a operazioni più sicure ed efficienti.

- Opportuni software di gestione della manutenzione consentono il monitoraggio degli aspetti amministrativi, contrattuali e logistici di tali attività (procedure di valutazione e scelta dell'appaltatore, applicativi per il monitoraggio dello stato di esecuzione dei contratti, applicativi per la valutazione delle prestazioni delle risorse impiegate, applicativi per la conformità nell'adozione delle misure di prevenzione e protezione sul lavoro, applicativi per la registrazione delle spese e dei costi, applicativi per la gestione dei magazzini delle scorte e dei ricambi).
- Accanto a questi software sono utilizzati sistemi di *intelligenza artificiale* (*Artificial Intelligence – AI*), *applicativi di supporto alle decisioni* o *sistemi esperti per la soluzione di problemi*. L'utilità di tali sistemi è evidente soprattutto in campo tecnico. Infatti, sfruttando la loro capacità di elaborare dati sia numerici sia testuali, sono in grado di dedurre dettagli significativi da descrizioni concise come quelle contenute nei rapporti di manutenzione. Tali dettagli possono integrare l'elaborazione statistica dei dati numerici, provenienti dai sensori e dall'archivio storico, fornendo informazioni utili per comprendere lo stato di impianti di processo e attrezzature e le eventualità di guasto, arrivando, infine, a suggerire le azioni preferibili per rimuoverne le cause probabili o per agire in modalità predittiva.
- Altri sistemi utili nei processi manutentivi sono le piattaforme *PDM* (*Product Data Management*), strumenti software utilizzati per gestire e tracciare i dati relativi ai prodotti (dati CAD, modelli, informazioni sui componenti, istruzioni di produzione, requisiti, note e documenti). L'AI sta rendendo possibile l'integrazione della funzionalità conversazionale in tali piattaforme. Ciò consentirà agli utenti di effettuare ricerche in linguaggio naturale (ad esempio, per ottenere riepiloghi delle attività di manutenzione o altre informazioni specifiche su impianti, attrezzature o prodotti). Le informazioni ottenute potranno essere raccolte e riassunte dall'AI evitando così la navigazione attraverso più finestre.

- L'analisi dei registri di manutenzione permette all'AI di identificare i problemi più comuni e le soluzioni più efficaci, permettendo di creare un archivio in grado di supportare anche i tecnici meno esperti.

5. Cybersecurity per la manutenzione con AI

La manutenzione si configura sempre più come un processo complesso che integra tecnologie avanzate, gestione strategica dei dati e solide misure di cybersecurity.
Per mitigare il rischio di furto e/o di uso improprio delle informazioni, oltre alle normali precauzioni, potrebbe essere utile far in modo che i sistemi esperti/sistemi AI siano messi in grado di operare in ambienti cloud sicuri, con apprendimento disattivato dopo l'addestramento iniziale, per evitare la condivisione dei dati aziendali. Inoltre, potrebbe risultare utile *neutralizzare* i dati rendendoli, per quanto possibile, *anonimi* prima dell'elaborazione, rimuovendo informazioni sensibili.

6. Elementi di progettazione di sistemi esperti per la manutenzione

Un sistema esperto (applicativo di supporto alle decisioni) per la manutenzione ha lo scopo di fornire indicazioni utili che consentono di effettuare scelte relative a quale procedura seguire, decidendo sulla base di un gran numero di casi simili (*base di conoscenze*). Per poter operare in tal modo, ha bisogno (in aggiunta alla *base di conoscenze*) di un *sistema di inferenza*. Combinando tali elementi con *osservazioni* dal campo, il sistema è in grado di giungere a conclusioni sullo stato dell'oggetto reale di interesse e sulle azioni da intraprendere.
La base di conoscenze, seppur costruita a partire dall'analisi di un gran numero di eventi simili a quelli di interesse, non è detto che sia esaustiva di tutti i casi possibili e ciò introduce un certo livello di incertezza. Il sistema di inferenza deve essere esteso in modo da assicurare la coerenza del ragionamento anche in presenza di tale incertezza (la coerenza dipende dal contesto delle certezze ottenute). Un metodo per trattare il problema è quello di utilizzare lo strumento di calcolo probabilistico chiamato *reti di Bayes* [3]. Una rete di Bayes è una rete *causale* costituita da:

- un insieme di *variabili* utilizzate come *nodi* e un insieme di *archi orientati* tra i nodi;
- ogni variabile ha un numero finito di *stati* mutuamente esclusivi;
- le variabili e gli archi orientati formano un *grafo orientato aciclico* (*directed acyclic graph – DAG*) [un grafo orientato è aciclico se non esistono cammini orientati $A_1 \rightarrow \ldots \rightarrow A_n$, per cui $A_1 = A_n$];
- a ogni variabile A con genitori $B_1, \ldots, B_n$, è associata una tabella di probabilità condizionata $P(A \mid B_1, \ldots, B_n)$ [se A non ha genitori, la tabella si riduce alle probabilità non condizionate $P(A)$, una per ciascuno dei possibili stati della variabile A].

Per una rete di Bayes vale la definizione di *d-separazione* (*indipendenza condizionata* tra due variabili data una terza variabile): due variabili A e B si dicono *d-separate* se in ogni cammino da A a B esiste una variabile intermedia C tale che:

- la connessione è in serie o divergente e lo stato di C è noto (Fig. 4(a) o Fig. 4(b)), o
- la connessione è convergente e né C né alcuno dei suoi discendenti è noto (Fig. 4(c)).

Se lo stato di una variabile è noto, si dice che la variabile ha ricevuto un'*evidenza* (indicata in Fig. 4(a) o in Fig. 4(b) con "e"). In pratica, due variabili sono *d-separate* se qualche evidenza relativa al nodo intermedio blocca lo scambio di informazioni tra di esse. Se A e B sono *d-separate*, allora $P(A \mid B, e) = P(A \mid e)$.
Se due variabili non sono *d-separate* allora si dicono *d-connesse*.
Se $b_1, \dots, b_n$, sono stati che si escludono mutuamente di una variabile B e si conosce $P(A, B)$ [questa può essere vista come una collezione di $P(A, b_i)$ per $i = 1, \dots, n$], allora si possono calcolare le probabilità $P(A)$ [una per ogni stato a_j, con $j = 1, \dots, m$, della variabile A] con la seguente operazione (chiamata *marginalizzazione*): $P(A) = \Sigma_i P(A, b_i)$.
Valgono la regola della probabilità condizionata, $P(A \mid B, C)\ P(B \mid C) = P(A, B \mid C)$, e la regola di Bayes: $P(B \mid A, C) = P(A \mid B, C)\ P(B \mid C) / P(A \mid C)$.

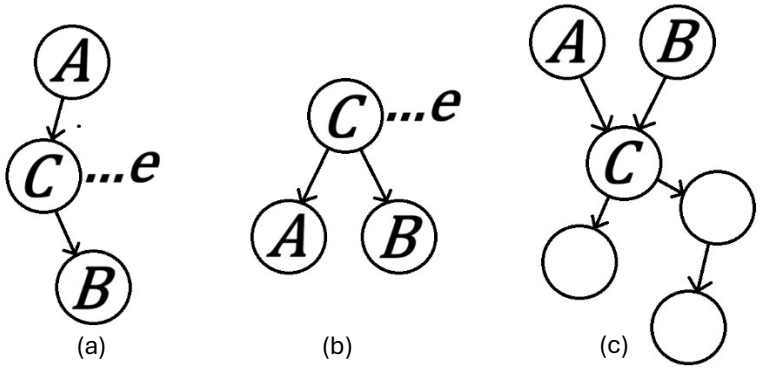


Figura 4. Esempi di *d-separazione* delle variabili A e B data la variabile C

Data una rete di Bayes, definita su un insieme di variabili $U = \{A_1, \dots, A_n\}$, allora la probabilità congiunta $P(U)$ è data dal prodotto [$pa(A_i)$ è l'insieme dei genitori di A_i]:

$$P(U) = \prod_i P(A_i \mid pa(A_i))$$

Per comprendere un sistema esperto, consideriamo il semplice esempio di Fig. 5.

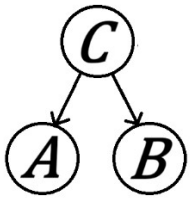


Figura 5. Modello di un guasto che coinvolge elementi di un impianto

Durante un controllo, il manutentore trova l'elemento A guasto. L'elemento A e l'elemento B tendono a guastarsi normalmente con una certa probabilità, tuttavia, se il guasto di A è stato causato da una sovracorrente dovuta ad un guasto dell'alimentatore comune C, allora è quasi certo che anche l'elemento B sia guasto (la causalità è indicata dall'orientamento degli archi in Fig. 5). Il manutentore allora decide di recarsi in magazzino per prendere i ricambi per riparare entrambi gli elementi e l'alimentatore. Sulla strada per il magazzino passa davanti all'alimentatore

C e ne constata il corretto funzionamento. A questo punto, l'eventuale guasto di B è divenuto ai suoi occhi indipendente dal guasto di A e la probabilità che anche B sia guasto è tornata ai livelli iniziali. Il manutentore è messo davanti al dilemma se fidarsi delle proprie convinzioni e prendere dal magazzino solo i ricambi di A, oppure se fare una deviazione e recarsi a controllare anche lo stato di B prima di passare in magazzino (infatti, B potrebbe essersi guastato in maniera indipendente).
Questo è un esempio di come la dipendenza/indipendenza di eventi e il livello di confidenza che riponiamo in essi possano variare in base alle informazioni che si hanno a disposizione. Quando la confidenza posseduta cambia, le azioni da decidere si modificano anch'esse.
Come già ricordato, le variabili di una rete di Bayes possono avere un numero finito di stati. Nel caso della rete descritta in Fig. 5 è sufficiente limitarsi a tre variabili con due soli stati ciascuna (X=$True$, se il corrisponde elemento è guasto, e X=$False$, se non lo è, potendo X essere una qualsiasi delle variabili A, B o C). Il sistema esperto che implementa la rete per poter operare deve avere a disposizione le probabilità iniziali $P(C)$ = ($P(C$=$True)$; $P(C$=$False)$), e le due tabelle con le probabilità $P(A \mid C)$ e $P(B \mid C)$ [ciascuna con 4 probabilità, a seconda delle possibili combinazioni di stati delle due variabili da cui la tabella dipende]. In tutto sono 2+4+4=10 probabilità che devono essere conosciute preliminarmente, prima di poter iniziare a utilizzare la rete. Il passo successivo consiste nel calcolare:

$$P(A, C) = P(A \mid C)\, P(C) \quad \text{e} \quad P(B, C) = P(B \mid C)\, P(C).$$

Poi, da queste, per marginalizzazione, si possono ricavare:

$$P(A) = (P(A{=}True);\ \ P(A{=}False)) \quad \text{e} \quad P(B) = (P(B{=}True);\ \ P(B{=}False)).$$

A questo punto, quando arriva l'evidenza sullo stato di A, si hanno le nuove probabilità:

$$P^*(A) = (P^*(A{=}True);\ \ P^*(A{=}False)) = (1;\ \ 0)$$

Le nuove probabilità sono utilizzate per inferire: $P^*(A, C) = P(C \mid A)\, P^*(A))$.
In realtà, poiché $P(A, C) = P(C \mid A)\, P(A)$, allora, senza bisogno di calcolare $P(C \mid A)$, si ha:

$$P^*(A, C) = \frac{P(A, C)\, P^*(A)}{P(A)}$$

Da cui, per marginalizzazione, si possono calcolare le $P^*(C)$, che, a loro volta, sono utilizzate per aggiornare

$$P^*(B, C) = \frac{P(B, C)\, P^*(C)}{P(C)}$$

$P^*(B)$ è calcolata per marginalizzazione da $P^*(B, C)$. Infine, quando il manutentore scopre che C non è guasto, la probabilità $P^{**}(B)$ ritorna calcolabile dalle informazioni iniziali:

$$P^{**}(B) = P(B \mid C{=}False).$$

7. Conclusioni

Il lavoro considera il problema della gestione della manutenzione con affidamento interno (in-house) o esterno (out-sourcing) alle aziende. Inoltre, indica una possibile metodologia per la progettazione di sistemi esperti in grado di utilizzare dati provenienti da fonti diverse (dai manuali di uso e manutenzione, dalla letteratura tecnica e dal campo) al fine di individuare una strategia di manutenzione ottimale.

Bibliografia

[1] G.L. Amicucci, M.T. Settino, Contractor management using the work interference risk assessment document, ISSA International Symposium on ”Hazardous Substances in Maintenance Works: Risks and Prevention”, 11th–12th June 2024, Frankfurt am Main, Germany

[2] G.L. Amicucci, M.T. Settino, F. Pera, La manutenzione per la sicurezza sul lavoro e la sicurezza nella manutenzione, Monografia, Edizioni INAIL 2019, ISBN 978-88-7484-154-7

[3] F.V. Jensen, An introduction to Bayesian Networks, UCL Press 1996, ISBN 1-85728-332-5

Il progetto RE-SET per la gestione della resilienza in impianti industriali soggetti alla transizione energetica

R. Patriarca[1], G. Di Gravio[1], M. Fargnoli[1], L. Fedele[1], A.J. Nakhal A.[1], F. Simone[1], E. Stefana[1], M.F. Milazzo[2], E. Piperopoulos[2], E. Proverbio[2], P. Agnello[3], A. Alvino[3], S.M. Ansaldi[4], A. Antonini[3], M.R. Vallerotonda[3]

[1]Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
[2] Università di Messina, Dipartimento di Ingegneria
[3]Inail - Dit
[4]Esperto della materia

Sommario
La transizione energetica richiede l'introduzione su larga scala di nuovi combustibili sostenibili, come idrogeno, biocombustibili ed e-fuel. Questa evoluzione apre prospettive significative ma comporta anche sfide cruciali per la sicurezza degli stabilimenti soggetti alla Direttiva Seveso, caratterizzati da sistemi complessi in cui sostanze, materiali, procedure e fattori organizzativi interagiscono in modo dinamico. In questo contesto si inserisce il progetto RE-SET (Resilience Engineering for Safe Energy Transition), volto allo sviluppo di una metodologia integrata per rafforzare la resilienza dei sistemi socio-tecnici industriali. L'elemento centrale è l'applicazione del modello System-Theoretic Accident Model and Process (STAMP), tradotto in Knowledge Graphs capaci di integrare dati tecnici, procedurali e organizzativi. Su questa base sono stati implementati modelli previsionali, alimentati da sperimentazioni di laboratorio e algoritmi di Machine Learning, per analizzare il comportamento dei materiali e loro meccanismi di deterioramento (e.g., infragilimento da idrogeno e corrosione). L'approccio sviluppato all'interno del progetto RE-SET permette di confrontare i sistemi industriali *as-is* e *to-be* (i.e., prima e dopo un'eventuale modifica in ottica di transizione energetica), individuando criticità, potenziali interazioni mancanti e opportunità di aggiornamento della Direttiva Seveso in relazione alla transizione energetica.

1. Introduzione

La transizione energetica rappresenta una delle principali sfide strategiche per il sistema industriale europeo. Da un lato, l'introduzione e l'utilizzo di combustibili quali idrogeno, biocombustibili ed e-fuel tendono a migliorare i livelli di sostenibilità ambientale di aziende e paesi, dall'altro implicano una profonda trasformazione di impianti e processi produttivi. Questo pone nuovi interrogativi per la sicurezza di lavoratori e la protezione dell'ambiente. In particolare, gli stabilimenti soggetti alla Direttiva Seveso (attuale versione europea: Direttiva Seveso III [1], adottata in Italia attraverso il d.lgs. 105/2015 [2]) si trovano ad affrontare un contesto dinamico in cui

(nuove) sostanze, materiali, differenti condizioni operative, diverse procedure, molteplici fattori umani e organizzativi coesistono e interagiscono. Questi stabilimenti rappresentano dunque dei sistemi socio-tecnici caratterizzati da elementi sociali e tecnologici interconnessi e interdipendenti che si influenzano reciprocamente per sviluppare le loro operazioni e perseguire i loro obiettivi. Come conseguenza, ulteriori rischi emergenti incrementano la complessità di gestione degli impianti e della sicurezza, richiedendo l'adozione di approcci in grado di evolvere la tradizionale gestione causa-effetto di misure di prevenzione e protezione per ridurre probabilità e conseguenze di eventi indesiderati.

Recentemente, il paradigma della Resilience Engineering (ingegneria della resilienza) ha proposto una visione alternativa, ponendo l'accento sulle capacità del sistema di anticipare, monitorare, rispondere e imparare da eventi, perturbazioni, condizioni variabili. In tale contesto, il progetto RE-SET (Resilience Engineering for Safe Energy Transition) ha avuto l'obiettivo di sviluppare una metodologia integrata per favorire la gestione resiliente dei sistemi socio-tecnici industriali coinvolti nella transizione energetica, con particolare riferimento agli stabilimenti soggetti alla Direttiva Seveso. In particolare, la metodologia ha combinato strumenti di Resilience Engineering, modelli sistemici avanzati, approcci sperimentali e prove di laboratorio. Una descrizione dettagliata del progetto è disponibile al sito di progetto [3].

Questa memoria ha l'obiettivo di sintetizzare le attività e i risultati principali del progetto RE-SET in termini di strumenti di analisi e valutazione per assistere le aziende del settore Seveso nella transizione energetica, identificando priorità di intervento e azioni migliorative. La memoria intende sottolineare quindi le implicazioni pratiche legate alla gestione del rischio e della sicurezza per il controllo delle sostanze pericolose, di particolare interesse sia per i gestori e responsabili di stabilimenti del settore Seveso sia per le autorità legislative e regolamentari.

2. Metodologia

La Figura 1 fornisce una panoramica completa della metodologia sviluppata all'interno del progetto RE-SET, composto dai seguenti tre Obiettivi Specifici (OS):

- Modellazione del sistema socio-tecnico (OS1), attraverso lo sviluppo di modelli System-Theoretic Accident Model and Process (STAMP) e di Knowledge Graphs;
- Sperimentazione e analisi previsionale (OS2), mediante l'esecuzione di prove di laboratorio volte ad indagare l'azione di meccanismi di deterioramento nelle varie condizioni e di quella derivante dalla concomitanza di diversi meccanismi e lo sviluppo di modelli previsionali;
- Individuazione delle priorità e supporto alle decisioni (OS3), grazie all'implementazione di strumenti di Machine Learning (ML) sui Knowledge Graphs sviluppati.

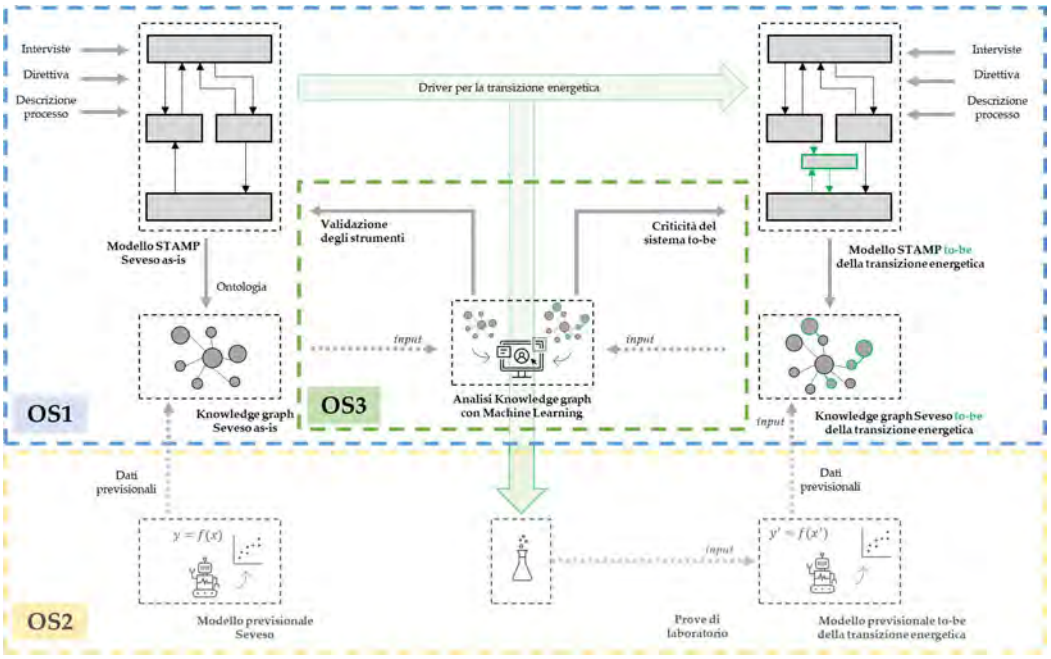


Figura 1. Overview della metodologia sviluppata nel progetto RE-SET

2.1. Modellazione del sistema socio-tecnico

La prima fase ha previsto la modellazione del sistema socio-tecnico, ovvero lo sviluppo di una mappatura funzionale della Direttiva Seveso che sintetizza i principali agenti e le relazioni che intercorrono tra questi. La mappatura è stata sviluppata adottando il modello STAMP e i Knowledge Graphs come strumenti metodologici. In particolare, STAMP si fonda sulla teoria dei sistemi e sulla teoria del controllo, interpretando la sicurezza non con esclusivo riferimento a malfunzionamenti, ma come un problema di controllo all'interno di un sistema socio-tecnico. In tale prospettiva, la sicurezza emerge dalla capacità di una struttura di controllo, esplicitamente identificabile, di imporre e mantenere vincoli adeguati sul comportamento del sistema [4]. D'altra parte, un Knowledge Graph (o grafo di conoscenza) è una struttura di dati che permette di rappresentare in formato grafico la conoscenza relativa ad un determinato ambito. Pertanto, il modello STAMP ha permesso di mappare gli agenti e le loro relazioni nell'ambito dei processi prescritti dalla Direttiva Seveso III, mentre i Knowledge Graphs hanno consentito di evidenziare i nodi e/o le relazioni critici, eventuali dati mancanti in vista del necessario adeguamento delle operazioni per la transizione energetica. Si precisa che i modelli del sistema socio-tecnico riguardano sia lo scenario industriale caratterizzato dall'attuale versione della Direttiva Seveso (*as-is*) sia uno scenario di transizione energetica (*to-be*).

A tal fine, è stata condotta un'analisi documentale approfondita che ha considerato la Direttiva Seveso III [1] e il suo recepimento italiano d.lgs. 105/2015 [2], norme tecniche relative ai Sistemi di Gestione della Sicurezza (SGS) per gli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante (e.g., UNI 10617:2019 [5] e UNI 10616:2022 [6]), documentazioni aziendali in merito agli aspetti organizzativi (e.g., organigrammi) e

operativi (e.g., impianti e processi produttivi) di aziende del settore Seveso, ontologie esistenti basate su normative oppure descritte in articoli scientifici rilevanti per attrezzature, impianti e aspetti legati all'ingegneria di processo. Inoltre, sono state organizzate interviste con esperti (e.g., ispettori e operatori di impianto) e focus group volti a verificare la correttezza e la precisione delle mappature sviluppate attraverso l'analisi documentale. Infine, al fine di rappresentare i modelli STAMP come grafi di conoscenza, sono stati sviluppati un modello ontologico [7] e un algoritmo in Python per definire propriamente le etichette di nodi e relazioni.

2.2. Sperimentazione e analisi previsionale

Sono state quindi eseguite prove di laboratorio e una successiva analisi previsionale al fine di studiare il comportamento meccanico di materiali esposti a miscele di gas rilevanti per la transizione energetica. La sperimentazione è stata finalizzata all'analisi dei meccanismi di infragilimento dell'acciaio, valutando l'influenza delle diverse condizioni di utilizzo del fluido di processo.

Le prove sono state condotte su campioni di acciaio in un impianto sperimentale e opportunamente adattato per i test con miscele di blending. La campagna sperimentale ha previsto prove in gas inerte (azoto) per caratterizzare il comportamento di riferimento, prove di carica con miscela idrogeno-metano (5/10/15% idrogeno in metano) a 75 bar, con diversi tempi di precarica (24 ore, 72 ore, e 1 settimana), per valutare l'effetto combinato di pressione, composizione e tempo di esposizione, caratterizzazioni morfologiche delle superfici di frattura e analisi micrografiche, prove di trazione con velocità di deformazione costante, da cui sono state ottenute curve sforzo-deformazione e parametri meccanici. Le curve sforzo-deformazione e i risultati sperimentali hanno rappresentato gli elementi fondamentali per sviluppare dei modelli previsionali volti a descrivere la variazione nel tempo della resistenza meccanica del materiale. A loro volta, i modelli previsionali sviluppati hanno rappresentato dei dati inediti che hanno rappresentato un ulteriore input per alimentare il Knowledge Graph, permettendo un'analisi proattiva del processo in vista della transizione energetica. A tal fine, è stato inoltre necessario definire una nuova ontologia in grado di rappresentare in modo completo i diversi elementi socio-tecnici [8], superando i limiti del modello ontologico precedentemente sviluppato [7] derivato direttamente dal modello STAMP e in grado di descrivere principalmente le entità di base (e.g., controllore, processo controllato, azioni di controllo).

2.3. Individuazione delle priorità e supporto alle decisioni

Sono state applicate, infine, tecniche di ML al Knowledge Graph volte a individuare relazioni mancanti e la loro posizione (link prediction) tra gli agenti del sistema analizzato qualora fosse oggetto di variazioni legate alla transizione energetica. In particolare, è stata definita una pipeline di algoritmi di ML, che sfrutta sia la topologia del grafo (i.e., collegamenti esistenti tra gli agenti) sia le informazioni semantiche da

associare al grafo stesso (i.e., proprietà di nodi e relazioni). Gli algoritmi di ML impiegati sono stati Logistic Regression, Random Forest, e Multi-Layer Perceptron. L'output della pipeline è la probabilità che esista una relazione non direzionata di una tipologia scelta fra due nodi specifici della proiezione del grafo. Infine, è stato implementato un algoritmo di ottimizzazione che testa diverse configurazioni di iper-parametri e seleziona la migliore (i.e., maggiormente affidabile) al fine di validare il Knowledge Graph sulla Direttiva Seveso (*as-is*). In particolare, è stato implementato un approccio basato su ricerca su griglia (grid search), che costituisce una forma di ricerca esaustiva condotta su una porzione dello spazio degli iperparametri dell'algoritmo di link prediction, con l'obiettivo di ottimizzarne il funzionamento. Questo approccio deve essere associato a una metrica di valutazione da ottimizzare e, nel caso della presente analisi, è stato utilizzato il Brier Score (BS). Tale metrica misura la media dei quadrati delle differenze tra la probabilità prevista dal modello e l'esito reale (0 o 1, corrispondenti rispettivamente alla non esistenza o all'esistenza della relazione). Valori più bassi di BS indicano una migliore calibrazione delle probabilità: un valore pari a 0 rappresenta una previsione perfetta, mentre 1 corrisponde alla prestazione peggiore possibile. La grid search ha quindi avuto l'obiettivo di minimizzare il BS associato alle relazioni suggerite dall'algoritmo di link prediction.

3. Risultati

In questa sezione, i principali risultati ottenuti all'interno del progetto RE-SET sono brevemente descritti. I risultati di dettaglio del progetto sono disponibili in [9].

3.1. Rappresentazione della struttura di controllo

La modellazione del sistema socio-tecnico ha permesso di ottenere il modello STAMP della Direttiva Seveso, sintetizzato in una Safety Control Structure (SCS) che rappresenta l'insieme di attori coinvolti (e.g., autorità competenti, gestore, staff della sicurezza), gli obblighi (e.g., informazione incidente rilevante), i ruoli e le responsabilità (e.g., formulazione piano Informazione, Formazione, Addestramento), le operazioni (e.g., sopralluogo post-incidentale) prescritti nella Direttiva Seveso III. La SCS illustrata in Figura 2 fornisce una rappresentazione di riferimento del sistema socio-tecnico associato alla Direttiva nel contesto del suo recepimento in Italia (ossia il d.lgs. 105/2015). Essa comprende le principali componenti e le figure coinvolte nell'implementazione di un Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS), nonché nei processi di redazione della documentazione, gestione delle informazioni e delle comunicazioni e nell'attuazione di azioni correttive finalizzate alla prevenzione degli incidenti. Tali elementi riguardano tutte le organizzazioni soggette agli obblighi previsti dal decreto sopra citato. Il modello è stato successivamente specializzato con riferimento al caso di studio industriale oggetto del progetto. Questo processo ha portato alla definizione di due diverse SCS: una prima configurazione as-is, che include gli agenti e le relazioni attualmente individuati nel d.lgs. 105/2015; e una

seconda configurazione to-be, coerente con lo scenario di sostituzione dell'olio combustibile con una miscela idrogeno–metano, nella quale si è ipotizzato che alcune relazioni risultino mancanti.
Grazie all'ontologia sviluppata relativa alle etichette dei nodi del grafo e delle loro relazioni e a un algoritmo per la trasformazione del modello STAMP in formato tabellare (.CSV), i diversi modelli STAMP sono stati convertiti in Knowledge Graphs. La definizione di query sui grafi ha consentito di ottenere delle informazioni descrittive, quali, ad esempio, numero e tipologia di nodi, numero e tipologia di relazioni.

3.2. Risultati della campagna sperimentale

Le prove di trazione hanno messo in evidenza differenze significative nel comportamento dell'acciaio in funzione del gas di precarica. In condizioni di azoto, i provini mostrano un comportamento duttile, mentre le prove con miscela idrogeno/metano al 15% e con idrogeno puro evidenziano un infragilimento del materiale: la curva sforzo-deformazione associata alla miscela si colloca in posizione intermedia tra quella in azoto e quella in idrogeno puro, indicando comunque un comportamento più fragile rispetto al campione di riferimento in ambiente inerte.
I dati confermano che, per i provini precaricati con miscela al 15% di idrogeno, i valori di deformazione a rottura risultano in generale inferiori rispetto al caso di riferimento in azoto, a parità di condizioni di pressione e tempo di precarica, a testimonianza di una riduzione della duttilità del materiale. I test condotti su provini precaricati con un blending a più basse percentuali di idrogeno (5%, 10%) hanno evidenziato un comportamento intermedio in cui i meccanismi di frattura duttile e fragile coesistono. Pertanto, l'analisi congiunta delle curve sforzo-deformazione (alcuni esempi sono riportati in Figura 3) e delle micrografie di frattura ha suggerito una transizione da un meccanismo di rottura duttile a uno più fragile al crescere del contenuto di idrogeno e del tempo di esposizione. Queste evidenze sperimentali sono state utilizzate per definire dei modelli previsionali in grado di descrivere il trend di variazione della resistenza meccanica nel tempo. Questi modelli previsionali hanno fornito un parametro (misura di processo) che rappresenta la variazione attesa a valle della transizione energetica.

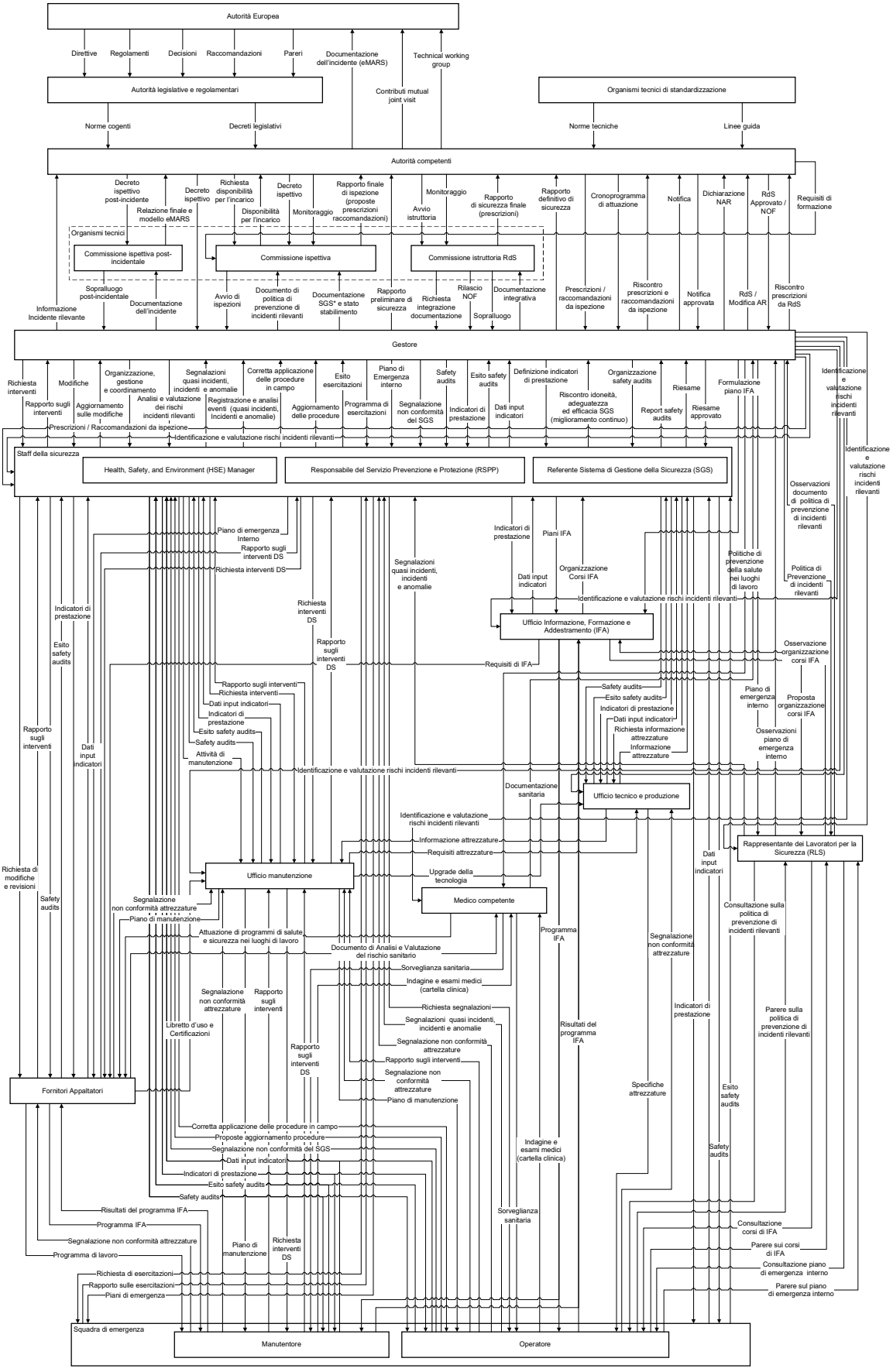


Figura 2. Modello STAMP della Direttiva Seveso (*as-is*)

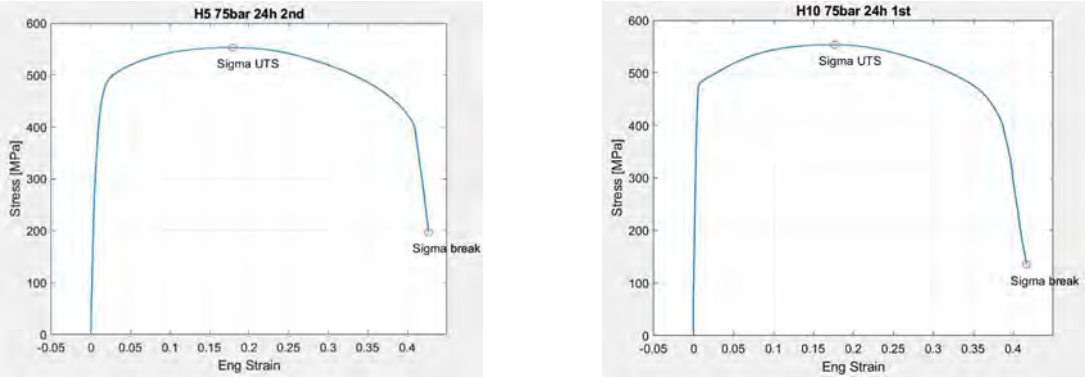


Figura 3. Curve sforzo-deformazione per idrogeno/metano (75 bar e 24 ore).

Queste evidenze sperimentali sono state utilizzate per definire dei modelli previsionali in grado di descrivere il trend di variazione della resistenza meccanica nel tempo. Questi modelli previsionali hanno fornito un parametro (misura di processo) che rappresenta la variazione attesa a valle della transizione energetica. La loro integrazione nei Knowledge Graphs ha consentito il miglioramento della capacità previsionale e la conduzione di analisi delle relazioni all'interno del grafo stesso. Per esempio, le analisi sul Knowledge Graph hanno consentito di verificare se i parametri di interesse sono stati effettivamente utilizzati nel modello di processo del controllore, se i sensori esistenti sono stati adeguati a misurare il nuovo parametro, se l'algoritmo di controllo è stato strutturato per processare correttamente i nuovi segnali.

3.3. Individuazione delle priorità e supporto alle decisioni

I Knowledge Graphs ottenuti mediante la conversione dei modelli STAMP della Direttiva Seveso, opportunamente integrati con i modelli previsionali (*as-is* e *to-be*), sono stati quindi analizzati mediante degli algoritmi di ML organizzati in una pipeline. Tale analisi ha permesso di ottenere dei risultati interessanti in termini di link prediction per il modello *as-is*.

Per esempio, l'impostazione dei seguenti input: (i) dimensione di embedding pari a 64, (ii) numero di alberi pari a 500, (iii) un dataset di testing pari al 30% del grafo totale, (iv) un dataset di training pari al 50% del grafo totale, (v) un numero di validation folds pari a 3, (vi) una soglia minima di probabilità pari a 60,00%, ha permesso di ottenere 121 relazioni aventi una probabilità di esistenza maggiore del 60,00% e ha portato alla previsione che con una probabilità del 88,8% esista una relazione tra l'apparato serbatoio e la risorsa umana squadra di emergenza (non è nota la direzione e quindi non è noto se tale relazione rappresenta una control action o un feedback).

Al fine di validare il Knowledge Graph sulla Direttiva Seveso (*as-is*), è stato implementato un algoritmo di ottimizzazione. L'applicazione di tale processo ha permesso di ottenere i risultati riportati in Tabella 1. Tale tabella riporta la configurazione ottima, avente il BS minimo (pari a 0.1613): sono state predette cinque relazioni, di cui quattro corrette (riportate in Tabella 1), aventi una probabilità di

esistenza maggiore del 80,00%. Per esempio, vi è una probabilità del 86,80% che esista una relazione tra l'Unita Responsabile della Realizzazione dei Lavori (URL) e il Rappresentante del Terzo (non è nota la direzione e quindi non è noto se tale relazione rappresenta una control action o un feedback).

Agente 1	Agente 2	Probabilità
Unita Responsabile della Realizzazione dei Lavori (URL)	Rappresentante del Terzo	86.80%
Squadra di manutenzione area meccanico-civile (operatore - addetto dell'esecuzione)	Camera di combustione	81.40%
Tubazione Serbatoio Camera di combustione	Squadra di manutenzione area meccanico-civile (operatore - addetto dell'esecuzione)	80.45%
Squadra di esercizio (operatore - addetto dell'esecuzione)	Tubazione Serbatoio Camera di combustione	80.00%

Tabella 1. Risultati dell'ottimizzazione, configurazione con embedding=128, trees=2000, test=20, train=60, validationFolds = 3, threshold=80%

4. Conclusioni

Il progetto RE-SET ha sviluppato e applicato una metodologia integrata per rafforzare la resilienza di sistemi socio-tecnici industriali e, in particolare, di impianti soggetti alla Direttiva Seveso e alla transizione energetica. La metodologia ha combinato strumenti di Resilience Engineering, modelli sistemici avanzati e approcci sperimentali. L'innovativa applicazione di STAMP alla Direttiva Seveso, seguita dalla conversione in Knowledge Graphs, ha consentito di rappresentare in modo esplicito gli agenti e le loro interazioni, permettendo di modellare gli elementi sia sociali sia tecnologici del sistema.

La validazione condotta tramite interviste, focus group e questionari con esperti ha evidenziato che il modello STAMP è adeguato nel rappresentare la parte sociale e organizzativa della Direttiva e utile per mappare agenti e relazioni, a conferma dell'efficacia funzionale dello strumento e della sua controparte in Knowledge Graph. Sul versante sperimentale, le prove su materiali in condizioni di gas inerte, miscela idrogeno-metano e idrogeno puro hanno evidenziato l'infragilimento indotto dalla presenza di idrogeno e la natura intermedia del comportamento meccanico in miscela rispetto ai casi di riferimento, fornendo dati inediti per la modellazione del deterioramento e per la costruzione di modelli previsionali. Tali modelli, integrati nei Knowledge Graph attraverso un'ontologia che include le caratteristiche tecniche dell'impianto in esame, hanno consentito di condurre un'analisi proattiva degli effetti della transizione energetica sulle prestazioni di sicurezza.

L'approccio RE-SET consente quindi di confrontare sistemi industriali *as-is* e *to-be*, individuando criticità e opportunità di aggiornamento della Direttiva Seveso in

relazione alla transizione energetica. In definitiva, la combinazione di modelli sistemici ed evidenze sperimentali fornisce un valido strumento di analisi e valutazione per supportare le aziende nel settore Seveso durante la transizione energetica, definendo priorità di intervento e azioni migliorative.

Ringraziamenti

Questo lavoro riporta gli esiti del progetto "RE-SET: Resilience Engineering for Safe Energy Transition", realizzato in collaborazione con INAIL nell'ambito del bando di ricerca BRIC 2022. Si ringrazia inoltre il personale della centrale termoelettrica del gruppo A2A, situata a San Filippo del Mela (ME), Italia, e in particolare l'Ing. Valeria Mancuso, per la disponibilità e la collaborazione nella condivisione delle informazioni che hanno reso possibile lo sviluppo del caso di studio industriale.

Bibliografia

[1] European Union. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. 2012.

[2] Repubblica Italiana. Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105. Attuazione della Direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. 2015.

[3] https://sites.google.com/uniroma1.it/bricreset/home (ultima data di accesso: 05/12/2025)

[4] Leveson N. Engineering a safer world. Systems thinking applied to safety. Massachusetts Institute of Technology Press. 2011.

[5] UNI. UNI 10617:2019. Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali. 2019.

[6] UNI. UNI 10616:2022. Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'applicazione della UNI 10617. 2022.

[7] Simone F., Nakhal Akel A.J., Alvino A., Ansaldi S.M., Agnello P., Milazzo M. F., Di Gravio G., Patriarca R. Extending safety control structures: a knowledge graph for STAMP. *Proceedings of 31th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023)*. Southampton (United Kingdom), 3 - 8 September 2023.

[8] Stefana E., Nakhal Akel A.J., Simone F., Fedele L., Di Gravio G., Patriarca R. An Ontology to Support Safety Management in Industrial Establishments Handling Dangerous Substances. *Chemical Engineering Transactions*. 2025; 120: 589-594.

[9]https://zenodo.org/communities/bric_reset_2023/records?q=&l=list&p=1&s=10&sort=newest (ultima data di accesso: 05/12/2025)

Analisi della variazione dell'area di emissione sulla classificazione delle zone Atex: un caso studio focalizzato sull'idrogeno

R. Lauri[1], E. Di Ponzio[2], V. Galasso[2]

[1]Inail - Dit
[2]Inail - UOT di Taranto

Sommario
Nel percorso intrapreso per conseguire la neutralità climatica dell'Europa attraverso l'attuazione del Green Deal, è fondamentale il processo di rinnovamento dell'intera filiera energetica e la creazione di un sistema energetico totalmente integrato. A tal proposito, nel maggio 2021, la Commissione Europea si è espressa, affermando che l'idrogeno (H_2) "verde", generato da fonti rinnovabili, sia l'unico vettore energetico in grado di poter contribuire in modo sostenibile al raggiungimento della neutralità climatica nel lungo periodo. Infatti, l'idrogeno potrebbe essere impiegato nel settore del trasporto, del riscaldamento e in vari processi industriali. Attualmente l'idrogeno riveste ancora un ruolo marginale nella filiera energetica e ciò dipende principalmente dagli ingenti costi in termini di competitività (il processo di elettrolisi è particolarmente energivoro), dalla scala di produzione, dalle esigenze infrastrutturali e dalla sicurezza percepita. Proprio su questa ultima tematica è stato incentrato il presente articolo ed in particolar modo l'attenzione è stata focalizzata sul pericolo di formazione di atmosfere potenzialmente esplosive (zone Atex), che si potrebbero generare nei luoghi di lavoro a causa di rilasci accidentali da vari componenti (flange, valvole di regolazione, compressori, etc.).

1. Introduzione

L'Unione Europea sta lavorando per favorire l'impiego di gas a basse emissioni di carbonio, tra i quali vanno annoverati l'idrogeno (H_2) e il biometano. L'obiettivo è quello di ridurre le emissioni di gas serra e accelerare la transizione verso fonti energetiche più pulite. Secondo le ricerche condotte, nel 2050 l'idrogeno potrebbe coprire fino al 20% della domanda energetica europea e soddisfare un range compreso tra il 20% e il 50% del fabbisogno relativo al settore dei trasporti e tra il 5% e il 20% per quanto concerne la domanda industriale. Pertanto, un'economia basata sull'idrogeno rinnovabile potrebbe ridurre in maniera ragguardevole l'impatto del cambiamento climatico, rispetto al precedente modello basato sull'impiego di carburanti fossili. Oggi l'H_2 ricopre ancora un ruolo marginale nella filiera energetica e ciò è riconducibile prevalentemente agli elevati costi del processo di produzione di idrogeno "verde" mediante l'elettrolisi dell'acqua, alla scala di produzione, alla necessità di realizzare nuove infrastrutture e alla sicurezza percepita. Proprio su questa ultima tematica è stata incentrata la memoria ed in particolar modo

l'attenzione è stata focalizzata sul pericolo, derivante dalla possibile formazione di atmosfere potenzialmente esplosive (zone Atex), che si potrebbero formare in contesti lavorativi dedicati all'utilizzo, alla produzione, alla distribuzione e allo stoccaggio di idrogeno, a causa di rilasci accidentali da vari componenti [4] (flange, valvole di regolazione, compressori, etc.). Tali emissioni sono generalmente provocate da anomalie di funzionamento. Inoltre, la procedura di classificazione delle zone Atex, che è parte integrante della valutazione del rischio di esplosione, è caratterizzata da alcune fasi "delicate", tra le quali ricade la stima dell'area del foro di rilascio, sulla quale in letteratura non esiste una convergenza univoca. Partendo da questo presupposto, è stato studiato il possibile rilascio di H_2, considerando tre riferimenti letterari relativi alla sezione di emissione e valutando, mediante uno specifico software, basato sulla vigente Normativa Tecnica CEI EN 60079-10-1, sia il livello di pericolosità della zona Atex che la sua estensione geometrica (valore della "distanza pericolosa"). Gli scenari connessi ad una capillare diffusione dell'impiego dell'idrogeno, in contesti civili ed industriali, rappresentano un impegno progettuale e di verifica tecnica, nell'immediato futuro, di notevole rilevanza se si ritiene che questa tecnologia debba contribuire al processo di decarbonizzazione ambientale. Il caso studio esaminato ha come oggetto una configurazione di rifornimento per un mezzo navale, già operante con idrogeno per la generazione di corrente di ricarica di batterie, mediante fuel cell, a loro volta impiegate per la propulsione con motore elettrico.

2. Il caso studio: la modalità di caricamento dell'idrogeno gassoso

Ai fini dell'analisi del rischio degli impianti contenenti sostanze pericolose in pressione, una particolare attenzione deve essere rivolta alle operazioni di travaso e caricamento [7], nelle quali i fluidi vengono generalmente trasferiti tra componenti statici (recipienti fissi o trasportabili, tubazioni) e componenti dinamici (compressori, pompe, etc.). Durante tali trasferimenti è possibile che accadano trasformazioni fisiche, non asservite all'operazione di trasferimento, e pertanto non valutate, o contatti con eventuali sostanze estranee al processo e che potrebbero generare reazioni indesiderate. Pertanto, deve sempre essere considerato, quale scenario incidentale, la probabilità di perdita di contenimento dai vari componenti o dalle numerose connessioni, interessate dalle operazioni. Nel caso studio esaminato è stato considerato il rilascio di idrogeno gassoso durante le operazioni di travaso da un carro bombolaio (figura 1) verso uno stoccaggio costituito da contenitori cilindrici riempiti di lega, che genera il composto idruro metallico.

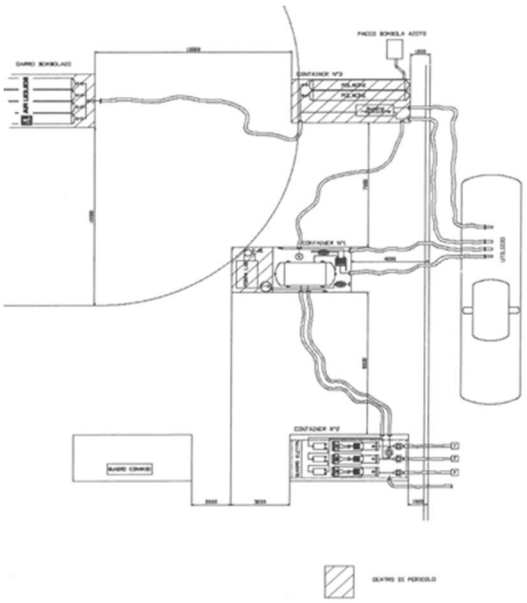


Figura 1. Modalità di rifornimento dell'idrogeno gassoso

3. Materiale e metodi

Applicando la procedura di classificazione delle zone Atex si valuta se una potenziale sorgente di emissione (SE) sia in grado di formare una zona pericolosa (zona 0, zona 1 o zona 2) o non pericolosa, per quanto concerne la formazione di atmosfere potenzialmente esplosive, generate da gas/vapori infiammabili. La zona 2 rappresenta l'area meno pericolosa, la zona 0 è invece quella più pericolosa, mentre la zona 1 si colloca tra le due aree precedentemente menzionate. La suddetta classificazione viene effettuata secondo i dettami, riportati nella Norma tecnica CEI 31-87 (recepimento italiano della Norma europea CEI EN 60079-10-1), la quale impone la determinazione dei tre [3] seguenti parametri (figura 2):

1) Grado di emissione della sorgente;
2) Disponibilità della ventilazione;
3) Grado di diluizione.

Per valutare la velocità della ventilazione (u_w), poiché nel caso studio analizzato la SE si trova in un luogo all'aperto, nel presente lavoro sono state applicate le indicazioni presenti nella Norma tecnica 31-87 (figura 3), considerando un'elevazione della SE inferiore a 2 m e lo scenario "luogo con ostacoli". Ciò ha consentito di assumere pari a 0,5 m/s (la densità dell'idrogeno è inferiore rispetto a quella dell'aria in condizioni ambientali di pressione e temperatura) il valore della suddetta grandezza, che determina una condizione di "buona" disponibilità del flusso di ventilazione, poiché essa viene considerata tale, secondo quanto stabilito dalla Norma, precedentemente menzionata, quando $u_w \geq 0{,}5$ m/s [3].

Grado di emissione	Efficacia della Ventilazione						
	Diluizione Alta			Diluizione Media			Diluizione Bassa
	Disponibilità della ventilazione						
	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona, adeguata o scarsa
Continuo	Non pericolosa (Zona 0 NE)[a]	Zona 2 (Zona 0 NE)[a]	Zona 1 (Zona 0 NE)[a]	Zona 0	Zona 0 + Zona 2[c]	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
Primo	Non pericolosa (Zona 1 NE)[a]	Zona 2 (Zona 1 NE)[a]	Zona 2 (Zona 1 NE)[a]	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 oppure Zona 0[d]
Secondo[b]	Non pericolosa (Zona 2 NE)[a]	Non pericolosa (Zona 2 NE)[a]	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 e persino Zone 0[d]

(a) Zona 0 NE, 1 NE oppure 2 NE indica una zona teorica nella quale, in condizioni normali, l'estensione sarebbe trascurabile.
(b) Il luogo classificato Zona 2 creato da una sorgente di emissione di grado secondo può eccedere quanto attribuito a un'emissione di grado primo o continuo; in questo caso, dovrebbe essere applicata la distanza maggiore.
(c) Qui la Zona 1 non è necessaria. Cioè una piccola Zona 0 si trova nel luogo nel quale l'emissione non è controllata dalla ventilazione e una Zona 2 più grande per quando la ventilazione viene meno.
(d) Sarà Zona 0 se la ventilazione è così debole e l'emissione è tale che, in pratica, un'atmosfera esplosiva per la presenza di gas esiste virtualmente in continuazione (avvicinandosi cioè a una condizione di "assenza della ventilazione").

"+" significa "circondata da".
La disponibilità della ventilazione negli spazi chiusi naturalmente ventilati non è comunemente considerata buona.

Figura 2. Classificazione delle zone Atex (CEI EN 60079-10-1)

Elevazione rispetto al livello del terreno / Modalità di emissione	Luoghi privi di ostacoli			Luoghi con ostacoli		
	≤ 2 m	> 2 m fino a 5 m	> 5 m	≤ 2 m	> 2 m fino a 5 m	> 5 m
Gas o vapori più leggeri dell'aria	0,5 m/s	1 m/s	2 m/s	0,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s
Gas o vapori più pesanti dell'aria o con comportamento neutro	0,3 m/s	0,6 m/s	1 m/s	0,15 m/s	0,3 m/s	1 m/s
Portata di evaporazione da pozze di liquido a qualsiasi elevazione	> 0,25 m/s			> 0,1 m/s		

Figura 3. Valori indicativi della velocità dell'aria (luogo "outdoor")

Nel caso studio è stato utilizzato il software Atmosphere Risk Analysis (ARA) Gas Plus 3.0, basato sulla Norma CEI EN 60079-10-1, per classificare la zona Atex, che si potrebbe generare dal rilascio di H_2 dalla SE. Qualora l'area, formata dalla potenziale sorgente, fosse "pericolosa" (zona Atex), il suddetto software determinerebbe anche la sua estensione geometrica (distanza pericolosa o hazardous distance) per mezzo del diagramma, riportato in figura 4 [3] e presente nella suddetta norma tecnica. Il parametro Q_c (caratteristica di emissione), espresso in m^3/s, viene ricavato per mezzo della seguente equazione [3]:

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \cdot LFL} \qquad 1)$$

In cui:

- W_g (kg/s) indica la portata massica rilasciata del gas/vapore infiammabile (in questo caso è la portata di H_2);

- ρ_g (kg/m^3) è la densità del gas/vapore infiammabile, riferita alle condizioni ambientali di pressione e temperatura;
- LFL (v/v %) rappresenta il limite inferiore di infiammabilità della sostanza infiammabile (è circa pari al 4% in volume per l'idrogeno).

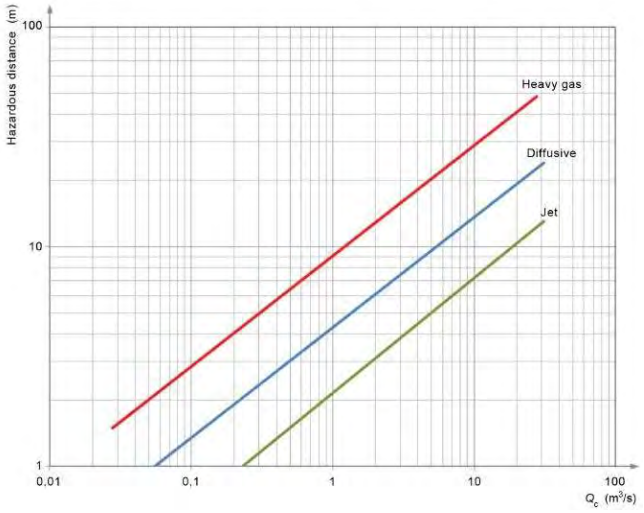


Figura 4. Valutazione della distanza pericolosa (CEI EN 60079-10-1)

Per stimare il parametro d_z (distanza pericolosa), nel caso di rilascio "a getto" (jet), è necessario calcolare preliminarmente la distanza (d_{jet}), alla quale avviene la conversione da getto a dispersione passiva, e successivamente si deve confrontare tale lunghezza con d_z [5]. Questo step permette di valutare se l'ampiezza della zona Atex ricade nella regione del rilascio a getto ($d_{jet} > d_z$) o si estende fino a quella, in cui si verifica la dispersione passiva ($d_{jet} < d_z$). Per far ciò, si utilizza il numero di Froude (Fr) densimetrico, dato dal rapporto tra l'inerzia della massa gassosa e la forza di gravità, che agisce sul gas in movimento [5]:

$$Fr = \frac{\rho_0}{|\rho_a - \rho_0|} \cdot \frac{u_g^{\,2}}{gd} \qquad 2)$$

In cui:
- ρ_0 (kg/m^3) è la densità del gas in uscita dalla SE;
- ρ_a (kg/m^3) indica la densità dell'aria;
- u_g (m/s) rappresenta la velocità del gas in uscita dalla SE;
- g è l'accelerazione di gravità (9,81 m/s^2);
- d (m) rappresenta il diametro del foro di rilascio.

L'estensione della zona, in cui si verifica l'emissione a getto del gas ed indicante quindi il passaggio alla dispersione passiva, è calcolabile con la seguente equazione [5]:

$$d_{jet}(m) = 0{,}5 \cdot \left(\frac{d}{2}\right) \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_a}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{Fr} \qquad 3)$$

Il collegamento del carro bombolaio con il container avviene attraverso un tubo flessibile (figura 1), il quale ha un diametro nominale (DN) ed una pressione nominale

(PN) rispettivamente pari a 16 mm e a 300 bar. L'idrogeno può essere rifornito da carro bombolaio in fase gassosa alla temperatura di -5°C e alla pressione relativa di 200 bar (caso preso in esame nel presente lavoro) o in fase liquida mediante autocisterna. Si sottolinea il fatto che sono previste immissioni sul mercato di mezzi di trasporto dell'idrogeno con bombole caricate a 500 bar di tipo IV (liner in poliammide e contenitore strutturale in fibra di carbonio), che richiederanno, quindi, nuove valutazioni delle relative distanze di sicurezza. La potenziale SE è stata considerata di grado secondo di rilascio, in quanto la sua emissione non è prevista durante il normale funzionamento e qualora dovesse verificarsi, sarebbe caratterizzata da una breve durata temporale. Per stimare l'area del foro (A_f) di emissione dell'idrogeno, la quale influenza la portata massica rilasciata di H_2, sono stati considerati i tre seguenti riferimenti, riportati in letteratura scientifica:
1) Norma CEI EN 60079-10-1: il componente può essere assimilato ad una connessione di piccolo diametro (DN<50 mm), per la quale la Norma indica di assumere A_f =1 mm^2 [3];
2) Purple Book: il diametro del foro è pari al 10% [2] di quello nominale (A_f =2 mm^2);
3) World Bank: il diametro del foro è pari al 20% [6] di quello nominale (A_f =8 mm^2).

4. Risultati e discussione

Mediante il software Ara Gas Plus è stato studiato il rilascio di idrogeno dal tubo flessibile, determinando il regime di efflusso (sonico o subsonico) del gas, che è uno step necessario per determinare la grandezza W_g, la quale è fondamentale per effettuare la classificazione della zona (pericolosa o non pericolosa), che potrebbe essere generata dalla potenziale SE (tubo flessibile). I risultati sono riepilogati in tabella 1, dalla quale si evince che, essendo sempre la pressione critica [1] dell'idrogeno inferiore alla sua pressione relativa (200 bar), vigente all'interno del collegamento flessibile, si instaura sempre un regime di efflusso sonico durante l'emissione. Si riportano nelle figure 5, 6 e 7 le tipologie di zona pericolosa determinate in funzione dei tre riferimenti esaminati per stimare A_f. In tutti i casi la potenziale SE è in grado di formare una zona Atex, il cui livello di pericolosità (zona 2) è il medesimo, applicando le assunzioni della Norma CEI EN 60079-10-1 e del Purple Book, mentre differisce relativamente all'ipotesi suggerita dal World Bank (zona 1 o zona 0).

Modello	Pressione critica (Pa)	Pressione del gas all'interno della SE (Pa)	Regime di efflusso	W_g (kg/s)
CEI EN 60079-10-1	192000	20101300	sonico	0,01
Purple Book	192000	20101300	sonico	0,021
World Bank	192000	20101300	sonico	0,084

Tabella 1. Rilascio di idrogeno gassoso dalla SE

EFFICACIA DELLA VENTILAZIONE							
Grado di emissione	Alta diluizione			Media diluizione			Bassa diluizione
	DISPONIBILITÀ DELLA VENTILAZIONE						
	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona, adeguata o scarsa
Continuo	Non pericolosa (Zona 0 NE)	Zona 2 (Zona 0 NE)	Zona 1 (Zona 0 NE)	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
Primo	Non pericolosa (Zona 1 NE)	Zona 2 (Zona 1 NE)	Zona 2 (Zona 1 NE)	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 o Zona 0
Secondo	Non pericolosa (Zona 2 NE)	Non pericolosa (Zona 2 NE)	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 o Zona 0

Figura 5. classificazione della zona Atex (CEI EN 60079-10-1)

EFFICACIA DELLA VENTILAZIONE							
Grado di emissione	Alta diluizione			Media diluizione			Bassa diluizione
	DISPONIBILITÀ DELLA VENTILAZIONE						
	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona, adeguata o scarsa
Continuo	Non pericolosa (Zona 0 NE)	Zona 2 (Zona 0 NE)	Zona 1 (Zona 0 NE)	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
Primo	Non pericolosa (Zona 1 NE)	Zona 2 (Zona 1 NE)	Zona 2 (Zona 1 NE)	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 o Zona 0
Secondo	Non pericolosa (Zona 2 NE)	Non pericolosa (Zona 2 NE)	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 o Zona 0

Figura 6. classificazione della zona Atex (Purple Book)

EFFICACIA DELLA VENTILAZIONE							
Grado di emissione	Alta diluizione			Media diluizione			Bassa diluizione
	DISPONIBILITÀ DELLA VENTILAZIONE						
	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona, adeguata o scarsa
Continuo	Non pericolosa (Zona 0 NE)	Zona 2 (Zona 0 NE)	Zona 1 (Zona 0 NE)	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
Primo	Non pericolosa (Zona 1 NE)	Zona 2 (Zona 1 NE)	Zona 2 (Zona 1 NE)	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 o Zona 0
Secondo	Non pericolosa (Zona 2 NE)	Non pericolosa (Zona 2 NE)	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 o Zona 0

Figura 7. classificazione della zona Atex (World Bank)

Analizzando questo ultimo caso, la formazione di una zona 0 (zona più pericolosa) è estremamente improbabile, poiché la SE è collocata in un luogo all'aperto, in cui la condizione di bassa diluizione è difficilmente riscontrabile e potrebbe verificarsi solamente a causa di schermatura della potenziale sorgente, dovuta alla presenza di ostacoli particolarmente ingombranti, che possono ridurre il flusso di ventilazione. L'applicazione di specifiche procedure di gestione delle operazioni di rifornimento dell'idrogeno nel container, le quali considerino la stima della frequenza delle azioni di collegamento tra i componenti, condizionata dalla corrispondente frequenza di svuotamento del carro bombolaio o della cisterna, però, può evitare, con elevata probabilità questa eventualità (schermatura). Quindi, lo scenario più credibile è quello di possibile formazione di una zona 1. Poiché la potenziale SE può generare sempre una zona Atex, è stata stimata anche la sua ampiezza geometrica (distanza pericolosa o hazardous distance). In particolar modo, nelle seguenti figure 8, 9 e 10 si riepilogano i risultati ottenuti, mentre in tabella 2 si riportano, per i tre riferimenti letterari considerati, i valori di d_z e la sua variazione percentuale (calcolata sui valori arrotondati) rispetto all'applicazione del valore dell'area del foro, indicato dalla Norma CEI EN 60079-10-1. Facendo riferimento alle figure precedentemente menzionate, il software determina due valori di d_z. Uno è relativo alla retta "jet" (moto sonico del gas), mentre il secondo a quella "diffusive" (moto subsonico del gas). Comparando d_{jet} con la distanza pericolosa relativa al regime sonico dell'idrogeno, è stata ricavata l'effettiva ampiezza della zona Atex. In tutti i casi esaminati, si è verificato che $d_{jet} > d_z$ (i suoi valori vengono arrotondati per eccesso a 4 m, 6 m e 12 m) e quindi l'estensione della zona pericolosa è contenuta nella regione, in cui l'efflusso dell'idrogeno è sonico, senza doverla estendere alla zona caratterizzata dalla dispersione diffusiva. Considerando questo ultimo aspetto, ai fini di incrementare il margine di sicurezza, si potrebbe optare per questa ultima scelta, solamente nel terzo scenario ($d_z \approx 22$ m), in cui inizialmente c'è una differenza pari a 76 cm tra d_{jet} e la distanza pericolosa. Come si evince dalla tabella 2, l'incremento di d_z è particolarmente significativo, assumendo i valori di A_f, proposti dal Purple Book e dal World Bank (in questo caso l'aumento è pari al 200%). Come era preventivabile, la variazione dell'area del foro influenza fortemente l'estensione geometrica della zona Atex ed in particolar modo, facendo riferimento al caso studio analizzato, essendo l'idrogeno caratterizzato da un vasto campo di infiammabilità (4-77 v/v %), è opportuno scegliere lo scenario più avverso per effettuare la classificazione dell'area Atex e aumentare il livello di sicurezza delle operazioni di rifornimento dell'idrogeno. Chiaramente un approccio sempre conservativo, ma, non cogente in relazione al codice di calcolo adottato dal progettista potrebbe generare criticità decisionali, in un contesto di sviluppo industriale e commerciale come auspicato dalle politiche di transizione energetica verso il vettore idrogeno. Lo studio condotto può anche consentire di valutare gli impatti sulle compatibilità territoriali dei diversi impianti di produzione, stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno, i quali rappresentano potenziali ostacoli alle autorizzazioni istituzionali da rilasciare.

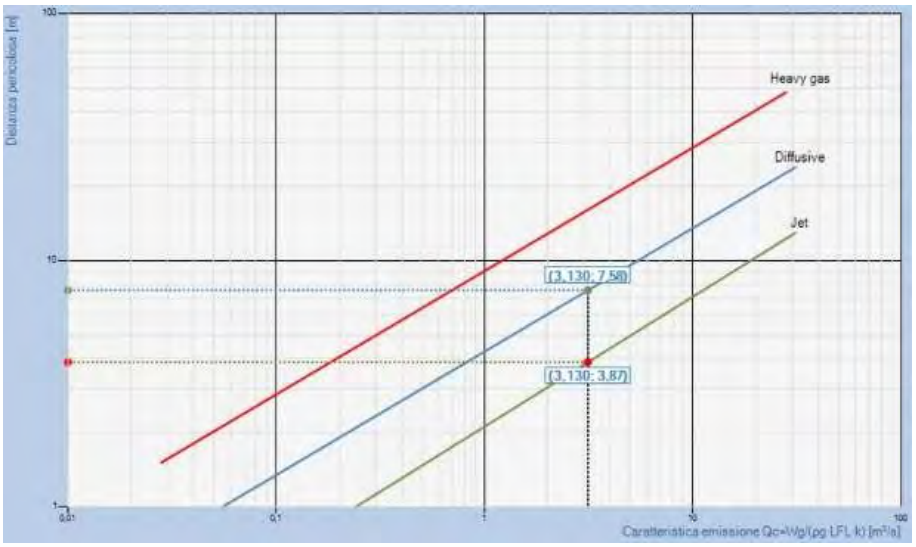


Figura 8. valutazione della distanza pericolosa (CEI EN 60079-10-1)

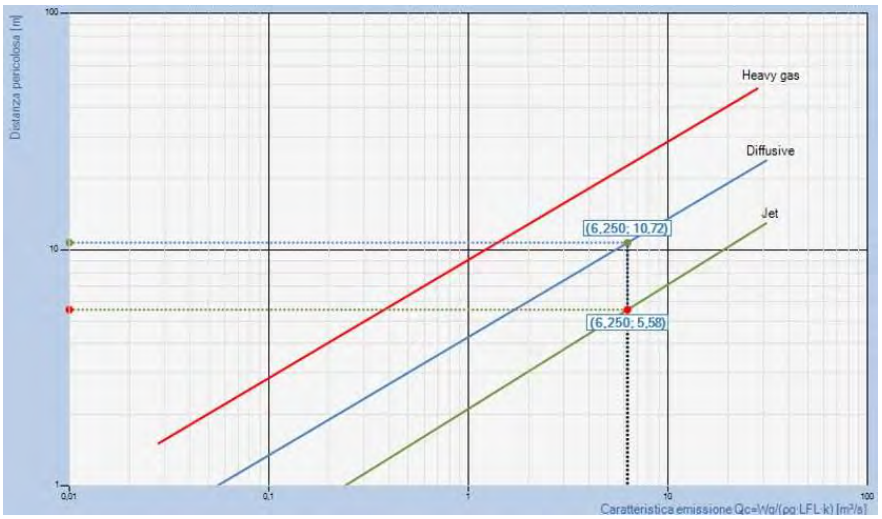


Figura 9: valutazione della distanza pericolosa (Purple Book)

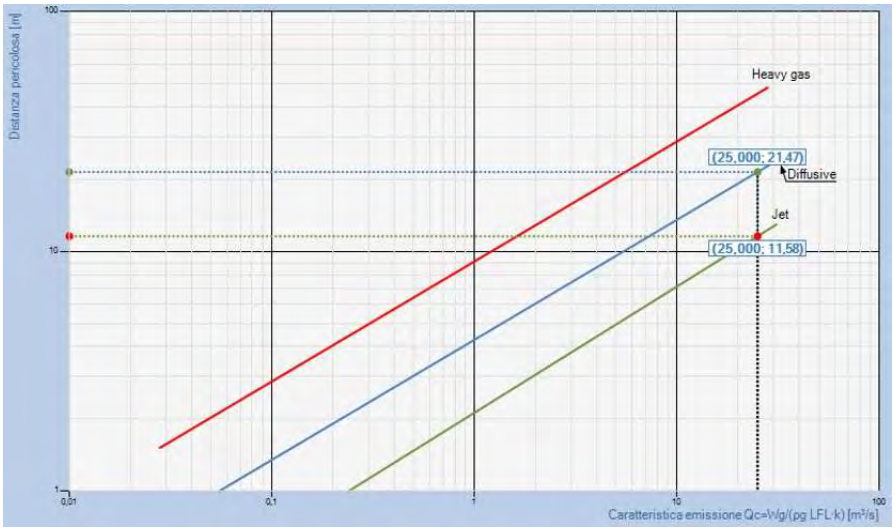


Figura 10: valutazione della distanza pericolosa (World Bank)

Modello	d_{jet} (m)	d_z (m)	Incremento di d_z (%)
CEI EN 60079-10-1	7,58	3,87 (4)	-
Purple Book	9	5,58 (6)	50 %
World Bank	12,76	11,58 (12)	200 %

Tabella 2. valori di d_{jet} e d_z

5. Conclusioni

La scelta dell'area del foro di rilascio, nel caso di potenziali sorgenti di grado secondo di emissione, è una fase cruciale della procedura di classificazione delle zone Atex nei luoghi di lavoro, in quanto in letteratura si riscontrano varie assunzioni per il suddetto parametro. Partendo dalla Norma Tecnica europea CEI EN 60079-10-1, è opportuno considerare anche altri riferimenti scientifici ed effettuare una comparazione dei risultati al fine di valutare sia la variazione del livello di pericolosità della zona Atex che la sua ampiezza geometrica. Assumere un approccio più cautelativo e quindi considerare lo scenario potenzialmente più avverso (riconducibile alla massima area del foro) può costituire una scelta strategica, che aumenta il livello di sicurezza, specialmente quando nei processi sono presenti gas, caratterizzati da un vasto campo di infiammabilità come l'idrogeno. Queste considerazioni possono essere estese anche alle applicazioni industriali, in cui è coinvolto l'idrogeno "verde", poiché esso ha le stesse proprietà chimico-fisiche dell'idrogeno "tradizionale".

Bibliografia

[1] Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. Elsevier. Eastbourne, 2018.

[2] CPR. Guideline for quantitative risk assessment - Purple book. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. Den Haag, 2005.

[3] IEC. IEC EN 60079-10-1: Classification of Areas-Explosive Gas Atmospheres. IEC. Ginevra, 2023

[4] Lauri R. A Methodological Approach for the Characterization of Hazardous Zones due to Potentially Explosive Atmospheres: a Case Study. *Chem. Eng. Trans*. 2018; 67: 169-174.

[5] Marigo M. Rischio Atmosfere Esplosive ATEX, Classificazione, Valutazione, Prevenzione e Protezione (3ª Ed.). Wolters Kluwer. Assago, 2017

[6] Office of environmental and scientific affairs-World Bank. Techniques for Assessing Industrial Hazards. The World Bank. Washington D.C., 1990

[7] NAV 50-6830-0001-30-01B000 norme per le operazioni di rifornimento di reagent per sommergibili classe Todaro – Stato Maggiore Marina ed. 2006

Ricostruzione delle dinamiche di un evento incidentale reale mediante modello agli elementi finiti (FEM): innesco di un getto di gas in pressione

G. Romano[1], A. Mormile[1]

[1]Romano Safety Management S.t.P - Osio Sotto, Bergamo

Sommario

Nel contesto di un'indagine su un evento incidentale, l'utilizzo di simulazioni numeriche avanzate - basate su metodi CFD (Computational Fluid Dynamics) e/o FEM (Finite Element Method) - rappresenta uno strumento fondamentale per la ricostruzione dell'accaduto [1]. Le tecniche sopracitate possono essere impiegate come supporto tecnico-scientifico alle indagini sia dalle autorità competenti sia dalle società coinvolte. Oltre alla ricostruzione dell'evento reale, le simulazioni numeriche permettono anche di esplorare percorsi incidentali alternativi, modificando variabili chiave per valutare se l'incidente avrebbe potuto evolvere con conseguenze differenti [2].

L'articolo riporta il caso studio di un incidente realmente avvenuto, in cui un incendio è divampato in seguito al rilascio di gas in pressione da un foro normalmente chiuso da un apposito dispositivo di tenuta filettato. L'obiettivo dello studio è stato quello di indentificare la più probabile causa di innesco. La ricostruzione dell'accaduto è avvenuta mediante un'analisi con modelli agli elementi finiti (FEM).

Dalle simulazioni è emerso che il dispositivo di tenuta filettato non fosse completamente avvitato ed è stato quindi ipotizzato che ci fosse un trafilamento di gas già prima dell'espulsione dello stesso e che la causa dell'innesco fosse legata all'energia interna di schegge e frammenti generati durante l'espulsione del tappo, valutata di molto superiore alla minima energia di ignizione.

1. Introduzione

Nel corso di un'indagine su un evento incidentale realmente avvenuto, l'utilizzo di simulazioni numeriche avanzate mediante analisi FEM (*Finite Element Method*) si è confermato uno strumento fondamentale per la ricostruzione dell'accaduto.

In particolare, l'evento in questione è stato un jet fire causato da una fuoriuscita di gas naturale in pressione che ha trovato un innesco immediato nelle vicinanze del punto di rilascio stesso.

È stato condotto un sopralluogo dei luoghi durante il quale è stato rinvenuto ad alcuni metri di distanza dalla zona interessata dall'incendio, un dispositivo di tenuta filettato che in condizioni di normal funzionamento dell'impianto è avvitato a chiusura di un foro di spurgo.

A seguito di un primo esame visivo, il dispositivo di tenuta è risultato macroscopicamente integro, pertanto è stato inviato (insieme al corpo a cui era

avvitato) ad un laboratorio specializzato per effettuare una *failure analysis*. Da queste analisi preliminari non sono emerse anomalie di fabbricazione dei componenti, né da un punto di vista chimico, né meccanico.
Al fine di approfondire le cause che hanno portato all'espulsione del dispositivo di tenuta filettato dalla sua sede e al successivo innesco del getto infiammabile, è stato condotto uno studio integrato di analisi con modelli agli elementi finiti (FEM) per la ricostruzione della dinamica dell'incidente. In particolare, lo studio si è composto di due fasi:
1. Valutazione dell'energia generata dallo strappo del dispositivo filettato in termini di attrito generato, temperatura raggiunta ed energia rilasciata.
2. Valutazione della traiettoria balistica per l'individuazione di possibili punti innesco.

Il software con il quale è stata eseguita l'analisi numerica strutturale è LS-DYNA®.

2. Analisi termo-meccanica per la simulazione di espulsione del dispositivo di tenuta filettato dalla propria sede

2.1 Realizzazione del modello ad elementi finiti

Per la realizzazione del modello ad elementi finiti sono stati consultati i disegni tecnici, i manuali d'uso e manutenzione, la scheda tecnica dello strumento, il report delle analisi di laboratorio e il modello 3D fornito dalla committente. Sono stati modellati nel dettaglio sia il filetto del dispositivo di tenuta che il filetto della madrevite.

2.2 Scelta e tipologia di mesh

Data la tipologia di oggetto e del tipo di fenomeno da analizzare, si è scelto di utilizzare una *mesh* composta da elementi solidi di tipo tetraedrico. È stata utilizzata una *mesh* molto dettagliata sul filetto diradandola nelle zone in cui non era necessario tale dettaglio di modellazione. Complessivamente, la *mesh* è composta da 296.864 nodi e 1.641.769 elementi.

2.3 Materiali utilizzati nella simulazione termo-meccanica

Il materiale reale del pressostato, in base alle analisi chimico fisiche condotte sui reperti, è assimilabile ad un acciaio AISI 316. Il materiale considerato per la realizzazione del modello del dispositivo di tenuta è l'acciaio L210GA, come da norma EN 10208-1. Per la madrevite si è scelto un materiale con caratteristiche leggermente migliori L235GA poiché deve resistere alle ispezioni, che consistono nello svitare e riavvitare il dispositivo, quindi la madrevite deve essere più resistente della vite.
Questi modelli di materiale necessitano dei seguenti dati di input (come riportato in Tabella 1): densità, modulo di Young, coefficiente di Poisson, tensione di snervamento, modulo tangente e deformazione plastica a rottura [3].

Proprietà	Dati numerici del materiale del filetto del dispositivo di tenuta	Dati numerici del materiale del filetto della madrevite
Densità [ton/mm^3]	$7.8 \cdot 10^{-9}$	$7.8 \cdot 10^{-9}$
Modulo di Young [MPa]	210000	210000
Coef. di Poisson [-]	0.3	0.3
Tensione di snervamento [MPa]	150	150
Modulo tangente [MPa]	502	777
Deformazione plastica a rottura [-]	0.25	0.22

Tabella 1. Proprietà del materiale utilizzato per le simulazioni.

2.4 Condizioni al contorno e parametri di input

Trattandosi di un fenomeno estremamente localizzato, si è scelto di bloccare la madrevite nello spazio, ad una distanza tale per cui il filetto non risenta della presenza del vincolo. Il dispositivo di tenuta invece è libero, ma tenuto in posizione dal contatto con la madrevite a simulare il più correttamente possibile il fenomeno fisico.

Contatto

Affinché vite e madrevite interagiscano tra loro, è stato introdotto un contatto, ovvero una funzione matematica in grado di ricreare il reale comportamento (interazione) dei due oggetti. Poiché prevediamo che nella zona di contatto avverrà la cancellazione di elementi, quindi si modificherà la superficie di contatto stessa, utilizzeremo un contatto di tipo ERODING, che è un grado di ricreare la superficie ogni qualvolta un elemento viene eroso dalla simulazione, aumentano l'accuratezza della simulazione.

Gravità

Tale forza è considerata costante durante tutta la simulazione e pari all'accelerazione di gravità: 9810 [mm/s^2].

Pressione dell'impianto

La pressione dell'impianto è sicuramente il carico esterno di entità maggiore ed è pari a 70 [bar]. A differenza della gravità, è necessario applicare questo carico in maniera graduale al fine di ridurre le oscillazioni numeriche dovute alla presenza del carico stesso. Per fare ciò, è stata introdotta una rampa di incremento da 0 [bar] a 70 [bar] in 0.01 [s]. La superficie di applicazione della pressione è l'intera superficie terminale del dispositivo di tenuta, su cui termina il filetto, come riportato in Figura 1.

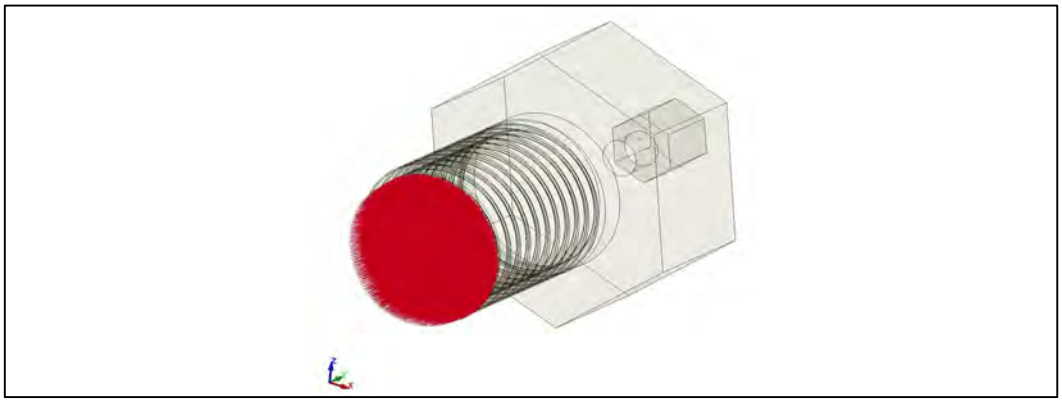


Figura 1. Superficie di applicazione della pressione (rappresentata dalle frecce rosse).

2.5 Parametrizzazione del modello

Per rendere il modello più versatile, quest'ultimo è stato parametrizzato in modo da imporre l'angolo di avvitamento in gradi e ricavare la rototraslazione della vite. Con questa parametrizzazione, un angolo pari a 0° corrisponde ad una posizione del filetto del dispositivo complanare alla madrevite (senza che il filetto sia in presa), mentre un angolo pari a 360° corrisponde ad avere un solo filetto della vite in presa. L'equazione per parametrizzare l'avvitamento del filetto è:

$$Quota\ di\ avvitamento = \frac{Angolo\ di\ avvitamento\ \cdot passo}{360°} \qquad (1)$$

Il passo del filetto è pari a 1,411 [mm], ovvero 18 filetti per pollice.

2.6 Analisi meccaniche

Le simulazioni meccaniche condotte hanno lo scopo di capire quale sia il minimo angolo di avvitamento del filetto per cui avviene l'espulsione del dispositivo. A tal proposito si è partiti considerando la condizione di minima tenuta, in termini di tenuta del gas, ovvero un solo filetto in presa, che nella parametrizzazione del modello corrisponde ad un angolo di avvitamento di 360°. Questa simulazione ha evidenziato che con un filetto in presa la vite riesce a fare presa e a non essere espulso; infatti il filetto raggiunge uno stato di deformazione plastica molto inferiore al valore di rottura del materiale.

<u>Ricerca del massimo angolo di avvitamento affinché avvenga l'espulsione</u>

Partendo dai risultati ottenuti nella prima simulazione (un solo filetto in presa), è stato diminuito gradualmente l'angolo di avvitamento per ricavare quale fosse il massimo angolo per cui la vite viene espulsa. Con un'affidabilità di 2,5° è emerso che il massimo angolo per cui si ha espulsione è pari a 280° di avvitamento (avvitamento non completo).

<u>Ricerca della traiettoria di espulsione</u>

Per calcolare la direzione di espulsione del dispositivo di tenuta sono stati presi in considerazione due istanti nell'intorno del tempo di espulsione e sono stati calcolati i versori delle direzioni con cui è diretto il dispositivo di tenuta. I tempi che sono stati presi in considerazione sono:

- t = 0.012 [s] (equivalente a 1 [ms] dall'inizio dell'espulsione).
- t = 0.0125 [s] (equivalente a 1.5 [ms] dall'inizio dell'espulsione).

Poiché il filetto non è simmetrico è necessario identificare il punto in cui il filetto ha inizio sulla madrevite. Tale posizione è stata ricavata a partire dai reperti fotografici forniti dal laboratorio di analisi. Questa posizione è importante in quanto i versori calcolati dipendono da essa (ruotando il punto iniziale del filetto, ruoteranno anche i versori calcolati). Considerando la posizione iniziale del filetto, sono stati calcolati i seguenti versori:

Direzione	t=0.012 [s]	t=0.0125 [s]
n_x	-0.350	-0.397
n_y	1	1
n_z	-0.543	-0.387

Tabella 2. Versori della direzione della proiezione del dispositivo di tenuta.

Dai versori calcolati notiamo che la tendenza del dispositivo è di muoversi principalmente in direzione Y (direzione di esplusione) e verso il basso. La gravità aumenta, col suo effetto, la tendenza ad andare verso il basso.

Deformazione plastica

In Figura 2 sono riportate le deformazioni plastiche dopo 1 [ms] dall'inizio dell'esplusione del dispositivo di tenuta, da cui si evince che il filetto della vite è molto danneggiato e sono stati rimossi svariati elementi.

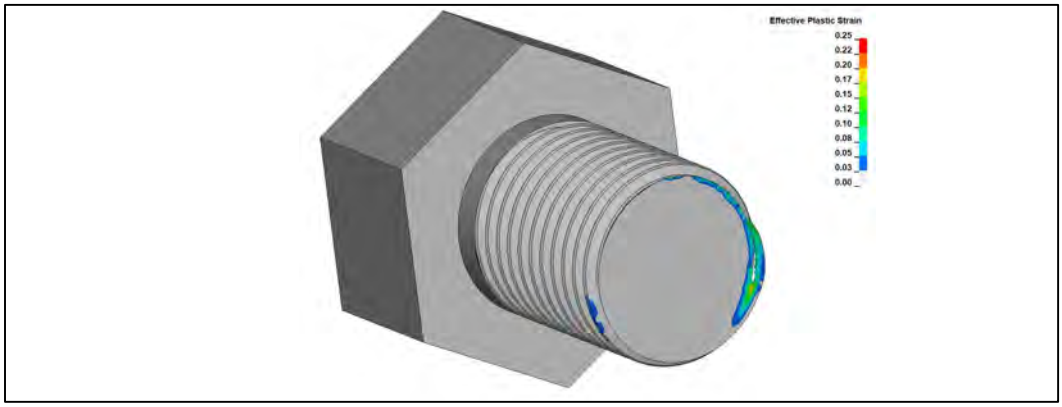


Figura 2. Deformazione plastica a 1 [ms] dall'espulsione (t=0.012 [s]).

2.7 Analisi termo-meccaniche

Le analisi termo-meccaniche condotte sono state suddivise in 2 fasi: una prima fase in cui è stato analizzato il riscaldamento del dispositivo di tenuta per conto della sola deformazione plastica e una seconda fase in cui è stato analizzato l'effetto congiunto della deformazione plastica e dell'attrito che si genera tra la vite e la madrevite.

Condizioni iniziali

Nel caso di simulazioni termo-meccaniche, è necessario imporre le condizioni termiche iniziali, così che la temperatura possa variare durante la simulazione. Per tale analisi è stata impostata una temperatura iniziale uniforme su tutti i componenti pari a 23 [°C].

Dati del materiale per le analisi termiche

Oltre alle caratteristiche meccaniche del materiale, per le analisi termo-meccaniche è stato necessario inserire anche il comportamento termico del materiale, individuando quelle grandezze che permettono di tenere conto di come e con quale

facilità il materiale è in grado di trasmettere calore [4]. Per il materiale in oggetto si ha che:

Proprietà	Valore
Conducibilità termica (TC)	22 [W/(m·K)]
Calore specifico (HC)	502 [J/(kg·K)]
Calore latente (HLAT)	33 [kJ/kg]

Tabella 3. Versori della direzione della proiezione del dispositivo di tenuta.

Contatto

Affinché il contatto sia in grado di sviluppare calore, è necessario attivare questa funzione nella definizione del modello. Tale modifica è stata inserita solo nel caso in cui è stato considerato l'aumento di temperatura per attrito tra il filetto maschio e il filetto femmina. Nelle simulazioni in cui il riscaldamento era dovuto alla sola deformazione plastica, si è considerato che i componenti non potessero scambiare calore per contatto (durata del fenomeno è troppo breve affinché questo avvenga).

Temperature raggiunte

Per le simulazioni in cui il riscaldamento avviene esclusivamente per effetto della deformazione plastica, la massima variazione di temperatura raggiunta è di circa 17 [K] (Figura 3), mentre per le simulazioni in cui il riscaldamento avviene per effetto congiunto della deformazione plastica e dell'attrito, la massima variazione di temperatura raggiunta è di circa 65 [K] (Figura 4). In ambo i casi la temperatura più elevata si trova sulle schegge generate dall'espulsione.

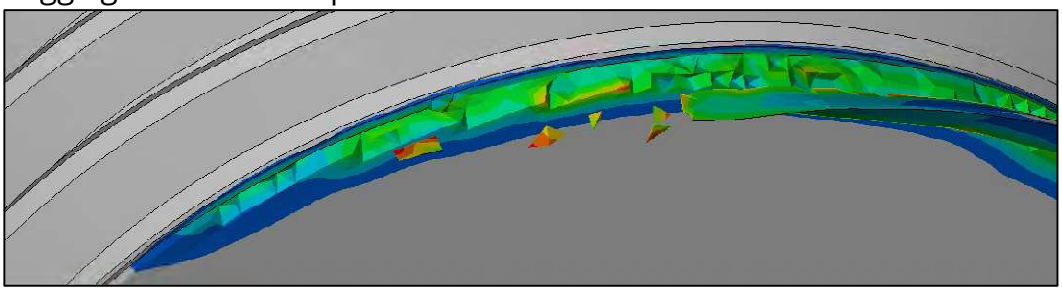


Figura 3. Dettaglio della temperatura per effetto della deformazione plastica.

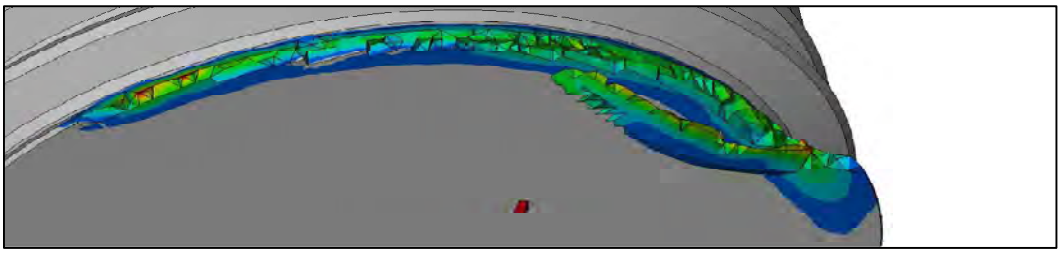


Figura 4. Dettaglio della temperatura per effetto della deformazione plastica e dell'attrito.

Considerazioni sulle analisi termo-meccaniche

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni termo-meccaniche, si riscontra che l'aumento di temperatura dovuto alla deformazione plastica è di piccola entità (circa 17 [K]) e anche considerando il contributo delle forze di attrito l'aumento è ancora abbastanza contenuto (circa 65 [K]). Confrontando questi dati con la scheda di sicurezza del gas

naturale (Sezione 9), si vede che la temperatura di autoaccensione del metano è compresa tra 575 [°C] e 640 [°C], pari a 848 [K] e 913 [K], e di conseguenza la temperatura raggiunta dal dispositivo non è sufficiente ad innescare il metano. Stante quanto sopra, è ragionevole ipotizzare che il gas naturale non si sia acceso per auto-ignizione ma che abbia trovato una fonte di innesco esterna.

2.8 Considerazioni energetiche

Come già anticipato nei capitoli precedenti, durante la simulazione, per effetto delle forze applicate e dell'interazione tra i componenti, il materiale del filetto raggiunge le condizioni di rottura, che, numericamente, si traduce in una cancellazione di elementi, mentre nella realtà questa porzione di materiale si stacca dal filetto trasformandosi in schegge e frammenti che vengono proiettati verso l'esterno per effetto della forza centrifuga. La cancellazione di questi elementi all'interno del modello porta ad una perdita di energia nel modello stesso, che corrisponde alla quantità di energia traferita a schegge e frammenti.

Stante quanto sopra, è stato condotto un approfondimento a partire dal caso puramente meccanico. L'energia erosa è riportata in Figura 5, ed è stata suddivisa per componente (vite e madrevite); nella stessa immagine è stato riportato la *Minimum Ignition Energy* (MIE), ovvero la quantità minima di energia che deve essere trasferita alla miscela di aria e gas naturale affinché possa incendiarsi [5], che è pari a 0.3 [mJ]. I frammenti vengono generati nell'intorno dell'istante in cui si ha lo strappo del dispositivo dalla propria sede, ad un tempo compreso tra 0.011 [s] e 0.0125 [s].

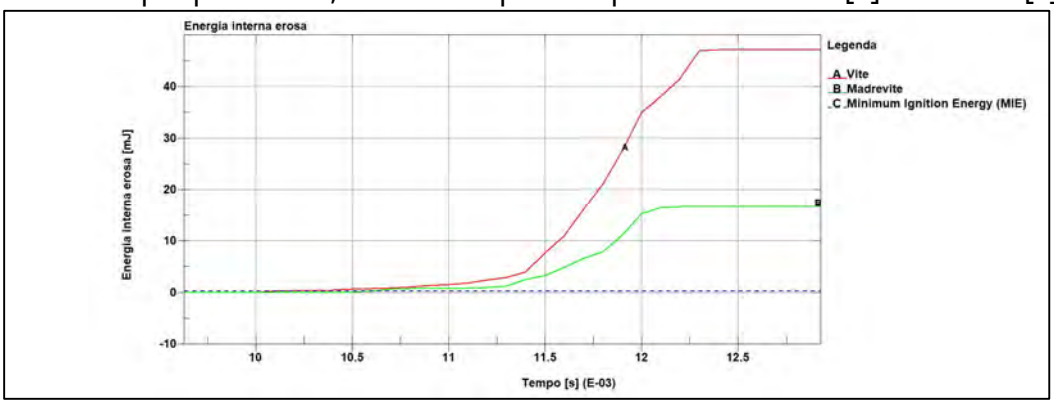


Figura 5. Energia interna rimossa dal modello per vite e madrevite, ingrandimento.

Dall'inizio dell'espulsione si generano frammenti con un'energia complessiva pari a:

- Vite: circa 45 [mJ] (ad 1 [ms] dall'espulsione l'energia è pari a 35 [mJ]).
- Madrevite: circa 17 [mJ] (ad 1 [ms] dall'espulsione l'energia è pari a 15 [mJ]).

Nonostante l'energia rappresentata sia cumulativa, data la quantità di energia in gioco (circa 200 volte maggiore del MIE) e dato il tempo molto ridotto in cui viene rilasciata, è ragionevole supporre che almeno una scheggia abbia un'energia pari o superiore a 0.3 [mJ] o che ci siano più schegge la cui somma delle energie in uno specifico istante sia pari o superiore a 0.3 [mJ]. Poiché per avere il trigger dell'incidente si deve verificare la compresenza di combustibile e sorgente di innesco, sono state calcolate le traiettorie dei frammenti più grandi e le massime distanze raggiunte al fine

confrontarle con l'estensione del campo di infiammabilità. In Tabella 4 è riportata la distanza massima raggiunta dai frammenti.

Coordinate [mm]	Frammento			
	1	2	3	4
x	-105,32	-15,34	69,49	58,03
y	38,02	36,63	151,41	195,13
z	371,66	206,79	-68,60	-212,23
Distanza	**386,30**	**207,36**	**97,65**	**220,02**

Tabella 4. Coordinate e distanza dei 4 frammenti più grandi al termine della simulazione (t=0.02 [s]).

In Figura 6 è riportato l'inviluppo della zona di infiammabilità ottenuto mediante l'applicazione di un modello integrale sviluppato attraverso il software DNV PHAST® Multicomponent 9.0 [6]. In particolare si evidenziano 2 zone [7]:

1. Zona interna delimitata dalla linea rossa: zona in cui non è possibile innescare la miscela (concentrazione di gas superiore all'UFL).
2. Zona compresa tra la linea blu e la linea rossa: porzione di spazio in cui la miscela gas naturale/aria è adatta all'innesco dell'incendio (compresa tra UFL e LFL).

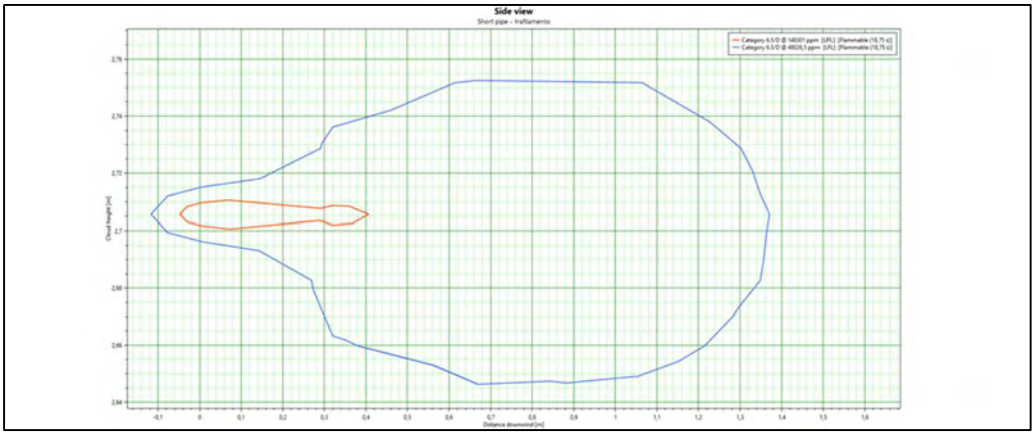


Figura 6. Inviluppo della zona di infiammabilità

Paragonando l'inviluppo della zona di infiammabilità con i dati relativi ai 4 frammenti più grandi, si nota che essi attraversano la zona di infiammabilità ed è quindi plausibile che anche le schegge rimosse per erosione abbiano attraversato questa zona. Da tale analisi risulta plausibile che il gas naturale rilasciato abbia trovato un innesco scaturito dalla presenza di schegge e frammenti con elevata energia di ignizione.

2.9 Confronto con i reperti ritrovati in campo dopo l'evento incidentale

Di seguito si propone il confronto tra alcuni reperti ritrovati sul luogo dell'incidente e le simulazioni condotte. In particolare sono stati analizzati i filetti degli oggetti in questione (vite e madrevite). Confrontando i reperti fotografici del filetto del dispositivo di tenuta ritrovato sul luogo dell'evento incidentale forniti dal laboratorio che si è occupato della *failure analysis* (Figura 7) con quello della simulazione (Figura 8), si nota una buona corrispondenza tra l'oggetto reale e quello simulato.



Figura 7. Filetto del dispositivo di tenuta espulso

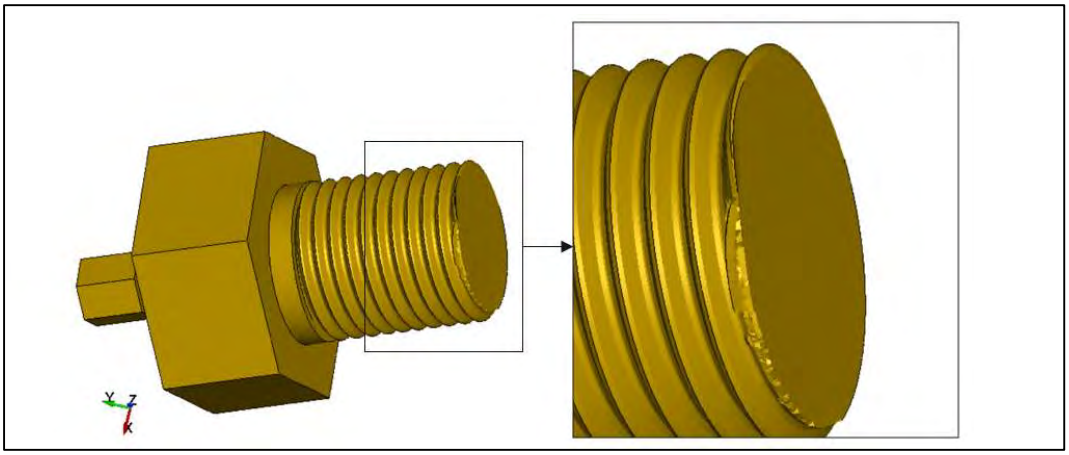


Figura 8. Filetto del dispositivo di tenuta a fine simulazione

Lo stesso confronto è stato eseguito tra il filetto della madrevite originale e il risultato delle simulazioni. Anche in questo caso si evidenzia una buona corrispondenza del danneggiamento del filetto.

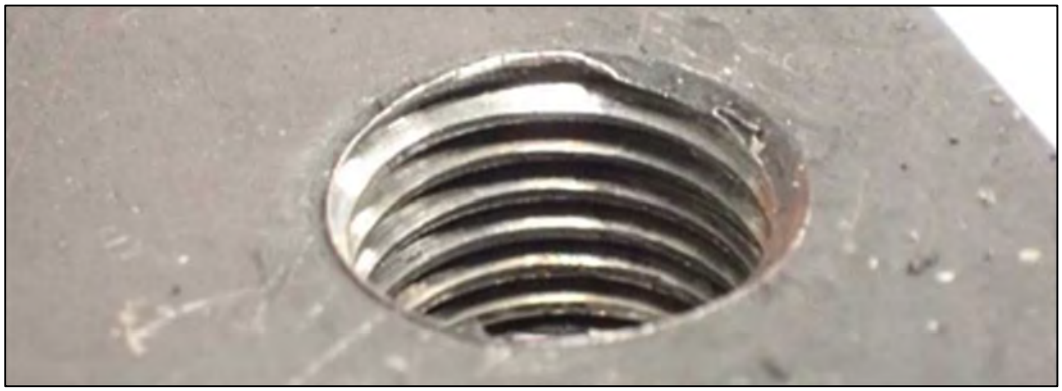


Figura 9. Filetto della madrevite

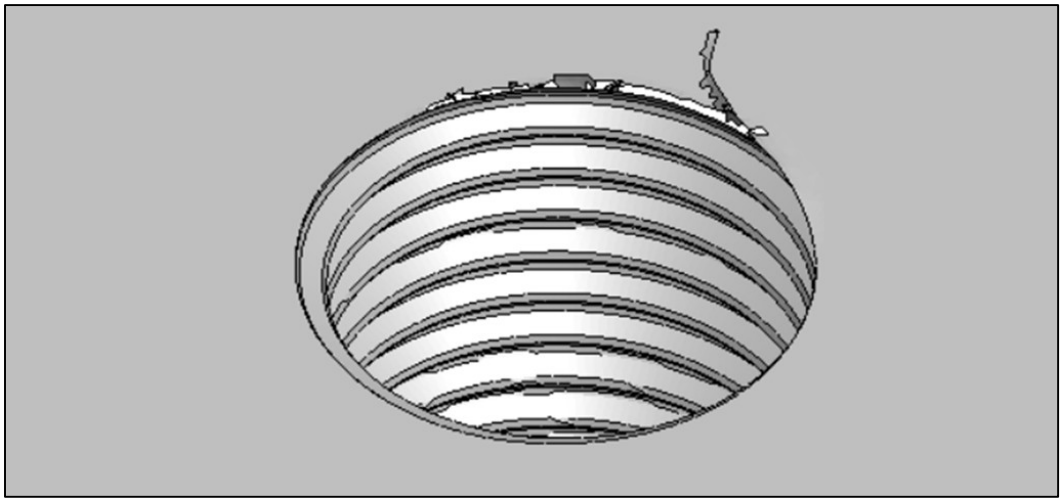


Figura 10. Filetto della madrevite simulato

La corrispondenza tra i reperti e le simulazioni è una conferma che la simulazione è in grado di rappresentare il fenomeno in oggetto con un'ottima approssimazione.

3. Conclusioni

Nel corso di un'indagine su un evento incidentale realmente avvenuto è stata condotta un'analisi con modelli agli elementi finiti al fine di approfondire le cause che hanno portato all'espulsione di un dispositivo di tenuta filettato dalla propria sede e al conseguente innesco del getto in pressione rilasciato. In particolare, lo studio si è composto di due fasi:

1. Valutazione dell'energia generata dallo strappo del dispositivo filettato in termini di attrito generato, temperatura raggiunta ed energia rilasciata.
2. Valutazione della traiettoria balistica per l'individuazione di possibili punti innesco.

A tale scopo sono state analizzate diverse configurazioni di avvitamento (da un filetto completamente in presa a ¾ di filetto in presa) al fine di trovare l'angolo massimo a cui il filetto non era più in grado di sopportare la pressione dell'impianto.

È stato inoltre svolto un approfondimento relativo al riscaldamento del dispositivo di tenuta, che può essere dovuto sia alla deformazione plastica del filetto stesso, che all'attrito che si genera nel momento dell'espulsione.

Infine, sono state condotte alcune considerazioni energetiche al fine di stabilire l'entità dell'energia trasferita a schegge e frammenti che si generano durante l'espulsione del dispositivo, per capire se queste avessero un'energia sufficiente ad innescare la miscela infiammabile presente nell'intorno del rilascio al momento dell'espulsione.
Per tali analisi è stato utilizzato il software ad elementi finiti LS-DYNA® ed è stato realizzato un accurato e dettagliato modello strutturale, con particolare attenzione al filetto del dispositivo. La simulazione ha tenuto conto di due tipologie di carichi: carichi permanenti (meccanici), dovuti alla gravità ed alla pressione dell'impianto, e carichi termici, derivanti dal fenomeno di espulsione del dispositivo (deformazione plastica del filetto e dall'attrito generato durante lo scorrimento relativo tra filetto e madrevite).
Dalle simulazioni condotte è emerso che il filetto si è rotto con un angolo di avvitamento pari a 280°. Ciò dimostra che presumibilmente il dispositivo non fosse completamente avvitato; è quindi ragionevole ipotizzare che ci fosse un trafilamento di gas naturale già prima dell'espulsione del dispositivo. Tuttavia, Il riscaldamento generato dalla sola deformazione plastica del filetto da o unitamente all'azione dell'attrito, non è sufficiente a raggiungere la temperatura di autoaccensione del gas.
Viceversa, le schegge ed i frammenti generati durante l'espulsione del dispositivo hanno generato un'energia interna complessiva superiore alla minima energia di ignizione del gas naturale, pertanto in presenza di miscela infiammabile è ragionevole ipotizzare che l'ignizione sia avvenuta per tale motivo.

Bibliografia

[1] Liu B.P., Finite Element Analysis for Failure Investigation, Elsevier.
[2] CCPS (Center for Chemical Process Safety), Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, AIChE.
[3] LS-DYNA® User manual.
[4] Glassman I., Yetter R., Combustion, Academic Press.
[5] PHAST® User manual.
[6] Lees F.P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth-Heinemann.
[7] Lewis B., von Elbe G., Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press.

Analisi del rischio e resilienza della Supply Chain dell'Idrogeno: un approccio integrato per la sicurezza dei sistemi energetici complessi

M. Di Nardo[1], L. Ricciardi[2], A. Tonti[2], D. Ingegneri[1]

[1]Università Telematica Pegaso
[2]Inail - Dit

Sommario
La transizione energetica e la decarbonizzazione delle economie industriali europee hanno posto l'idrogeno al centro delle strategie per la sostenibilità e la sicurezza energetica. In tale contesto, la realizzazione di una supply chain dell'idrogeno sicura, resiliente e sostenibile rappresenta una delle sfide più complesse nel percorso verso un'economia a basse emissioni di carbonio. Le peculiari proprietà fisico-chimiche dell'idrogeno, tra cui l'elevata infiammabilità, la bassa densità, la permeabilità ai materiali e l'ampio intervallo di esplosività, impongono un ripensamento profondo dei criteri di sicurezza, affidabilità e manutenzione delle infrastrutture coinvolte nelle fasi di produzione, stoccaggio, trasporto e distribuzione.
Il presente studio propone un approccio integrato di analisi del rischio e resilienza applicato alla catena di fornitura dell'idrogeno, volto a identificare le principali vulnerabilità sistemiche e a definire strategie di mitigazione e adattamento efficaci. L'approccio metodologico combina strumenti quantitativi di risk assessment, indicatori di resilienza operativa e principi di system thinking, al fine di modellare il comportamento della filiera in condizioni di stress e valutare la capacità del sistema di assorbire e recuperare da eventi perturbativi. Particolare attenzione è dedicata al ruolo delle tecnologie digitali emergenti, quali modelli predittivi, digital twin e analisi dei dati in tempo reale, come supporto alla pianificazione strategica e alla gestione proattiva del rischio. In definitiva, lo studio intende contribuire alla definizione di criteri operativi fondamentali per la progettazione di infrastrutture resilienti e sicure, promuovendo un modello energetico innovativo, sostenibile e adeguato alle sfide future.

1. Introduzione

La transizione verso sistemi energetici a basse emissioni di carbonio rappresenta una delle sfide centrali del XXI secolo. In tale contesto, l'idrogeno si configura come vettore energetico strategico per la decarbonizzazione di comparti industriali hard-to-abate, in particolare siderurgia, chimica e trasporto pesante. La sua versatilità e la capacità di integrarsi con fonti rinnovabili ne rafforzano il ruolo di abilitante per un'evoluzione sostenibile dei sistemi industriali.
A fronte di tale potenziale, la filiera dell'idrogeno (Hydrogen Supply Chain, HSC) presenta criticità intrinseche di sicurezza connesse alle proprietà fisico-chimiche

della sostanza e alle condizioni operative di produzione, stoccaggio, trasporto e distribuzione. Elevata infiammabilità, ampio campo di esplosività e ricorso a condizioni criogeniche richiedono approcci di analisi del rischio integrati, capaci di considerare in modo sistemico pericoli e misure di controllo lungo l'intera catena del valore.

Negli ultimi anni, la letteratura scientifica ha mostrato un crescente interesse per la gestione del rischio lungo la filiera dell'idrogeno. Numerosi studi hanno analizzato modelli di Analisi Quantitativa del Rischio (Quantitative Risk Analysis, QRA) applicati ai processi legati all'idrogeno, con particolare riferimento alla stima della probabilità di perdita di contenimento e alla modellazione delle conseguenze [5]. Tali contributi evidenziano l'importanza di considerare variabili operative quali pressione, temperatura e configurazione impiantistica nella determinazione delle soglie di danno.

Una linea di ricerca complementare riguarda lo studio degli effetti domino e degli eventi di tipo Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE), tipici delle condizioni criogeniche e dei sistemi di stoccaggio di fluidi liquefatti. Le analisi di Computational Fluid Dynamics (CFD), integrate con modelli probabilistici quali la QRA, consentono di stimare la propagazione della radiazione termica e degli effetti di sovrapressione, fornendo indicazioni rilevanti per la progettazione delle barriere di protezione [1].

Parallelamente, la letteratura più recente pone crescente enfasi sulla progettazione di barriere di sicurezza multilivello, sia fisiche sia organizzative, in grado di interrompere la catena causa–effetto degli eventi incidentali [2]. In tale contesto, approcci basati su diagrammi bow–tie e sulla valutazione dell'efficacia delle barriere hanno dimostrato come l'integrazione di misure preventive e mitigative possa determinare una riduzione significativa del rischio residuo.

Un ulteriore sviluppo rilevante è rappresentato dalla digitalizzazione della sicurezza industriale. Tecnologie quali l'Industrial Internet of Things (IIoT) e i sistemi avanzati di sensoristica permettono il monitoraggio continuo dei parametri critici di processo (pressione, temperatura, portata), supportando la transizione da una logica di sicurezza prevalentemente reattiva a un approccio predittivo. Studi recenti hanno evidenziato come l'integrazione dei dati di sensori con algoritmi di machine learning consenta di ridurre significativamente i tempi di risposta in condizioni critiche e di migliorare la diagnosi precoce delle anomalie operative [3] [4].

Un aspetto emergente riguarda l'integrazione tra analisi del rischio e tecnologie digitali. In particolare, il concetto di digital twin applicato alla sicurezza sta acquisendo crescente rilevanza: attraverso la simulazione in tempo reale e l'elaborazione dei dati raccolti dai sensori, diventa possibile valutare scenari di rischio dinamici e aggiornare in modo adattivo le strategie di mitigazione.

Il modello proposto nel presente lavoro si colloca in questa prospettiva, offrendo un approccio unificato che combina valutazione del rischio, progettazione delle barriere e monitoraggio intelligente, con l'obiettivo di ottimizzare la resilienza della filiera

dell'idrogeno. Il lavoro propone infatti una metodologia strutturata di analisi del rischio per la HSC, basata sulla combinazione di tecniche qualitative e quantitative e orientata alla progettazione e all'ottimizzazione di barriere di sicurezza fisiche e digitali. L'approccio integra strumenti consolidati (HAZOP, FTA e analisi bow-tie) con sensori IoT, piattaforme di monitoraggio in tempo reale e algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo, al fine di migliorare la performance delle barriere e ridurre il rischio residuo.
La metodologia è applicata a due casi di studio: una filiera di idrogeno verde e uno scenario incidentale di tipo BLEVE relativo a un serbatoio criogenico di idrogeno liquido (LH_2), evidenziando l'efficacia del framework integrato nel rafforzare i livelli di sicurezza e contenere il rischio residuo.

2. Il modello metodologico per l'analisi del rischio nella filiera dell'idrogeno

La metodologia proposta si fonda su un approccio integrato alla gestione del rischio, che combina strumenti qualitativi e quantitativi di analisi per la valutazione della sicurezza lungo l'intera filiera dell'idrogeno. L'obiettivo è fornire un supporto strutturato alla progettazione e all'ottimizzazione delle barriere di sicurezza, sia fisiche sia digitali, rafforzandone l'efficacia nel mitigare i rischi associati alle diverse fasi del ciclo operativo, dalla produzione allo stoccaggio, fino al trasporto e alla distribuzione.
Il modello è articolato in quattro fasi principali, progettate per la gestione del rischio nei sistemi a idrogeno lungo l'intera filiera:

- Fase 1 - Identificazione delle fasi critiche della filiera

Ogni segmento della filiera dell'idrogeno (elettrolisi, compressione, liquefazione, trasporto, distribuzione e utilizzo finale) è analizzato al fine di individuare i potenziali eventi incidentali. L'identificazione dei pericoli è condotta mediante tecniche consolidate di HAZOP e What-if Analysis, applicate ai principali nodi di processo e integrate con dati provenienti dalla letteratura tecnica e da banche dati di incidenti industriali (HIAD, eMARS).

- Fase 2 - Valutazione del rischio

Per ciascun evento individuato sono stimate la frequenza di accadimento e la magnitudo delle conseguenze, utilizzando un approccio combinato. Le matrici di rischio sono impiegate per una prima classificazione qualitativa, mentre strumenti quantitativi quali FTA ed ETA sono utilizzati per stimare le probabilità di guasto e per modellare la propagazione degli effetti. In questa fase sono anche definiti degli indicatori quantitativi di rischio e delle soglie di accettabilità, coerenti con i criteri di sicurezza adottati.

- Fase 3 - Progettazione delle barriere di sicurezza

La progettazione delle barriere di sicurezza si basa sull'analisi bow-tie che consente di collegare gli eventi iniziatori alle conseguenze, attraverso una struttura causale esplicita. Le barriere sono classificate in:

- barriere preventive (quali valvole di sicurezza, sistemi di isolamento, controlli di processo);
- barriere mitigative (sistemi antincendio, ventilazione, rilevatori di idrogeno, piani di emergenza).

Il modello considera l'integrazione di sensori avanzati (catalitici, ottici, in fibra ottica) con piattaforme digitali per il monitoraggio in tempo reale, finalizzata all'attivazione automatica delle barriere mitigative e alla limitazione degli effetti incidentali.

- Fase 4 - Ottimizzazione multi-obiettivo

La fase finale prevede l'applicazione di tecniche di ottimizzazione multi-obiettivo per individuare la configurazione delle barriere che garantisce il massimo livello di sicurezza compatibilmente con vincoli economici e operativi, riducendo i tempi di risposta e migliorando le prestazioni complessive del sistema.
La funzione obiettivo è definita come funzione del rischio residuo R(x), del costo C(x) e del tempo di attivazione T(x), per una assegnata configurazione di barriere x.
Per una data configurazione delle barriere di sicurezza $\mathrm{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, la funzione obiettivo multi-obiettivo può essere espressa come:

$$\min_{\mathrm{x}} \quad \mathrm{F(x)} = [R(\mathrm{x}),\, C(\mathrm{x}),\, T(\mathrm{x})] \qquad (1)$$

dove:

$R(\mathrm{x})$= rischio residuo, risultante dall'applicazione delle barriere preventive e mitigative;
$C(\mathrm{x})$= costo complessivo associato alla configurazione delle barriere (investimento, gestione, manutenzione);
$T(\mathrm{x})$= tempo di attivazione delle barriere, inteso come tempo necessario per l'intervento efficace a seguito di un evento iniziatore.
Questa formulazione evidenzia la natura multi-obiettivo del problema, in cui sicurezza, costi e prestazioni temporali rappresentano criteri potenzialmente in competizione. Le soluzioni individuate lungo la frontiera di Pareto esprimono differenti compromessi decisionali tra il livello di prestazione in termini di sicurezza e la fattibilità economica delle soluzioni adottate.
Il modello proposto integra strumenti di monitoraggio continuo dei processi basati su architetture Industrial Internet of Things (IoT), sistemi di Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) e reti di sensori distribuiti, progettati per l'acquisizione in tempo reale dei principali parametri critici di processo, quali pressione, temperatura, portata e concentrazione di idrogeno.
Le reti di sensori includono dispositivi eterogenei (sensori catalitici, ottici e in fibra ottica), distribuiti lungo i nodi critici della catena del valore dell'idrogeno e interconnessi tramite protocolli industriali standard. I dati di campo sono trasmessi ai sistemi SCADA che svolgono funzioni di supervisione, acquisizione, storicizzazione e prima elaborazione delle informazioni operative, garantendo la continuità del controllo di processo e l'interfaccia con gli operatori.

A un livello superiore, i dati acquisiti sono elaborati da algoritmi predittivi integrati nelle piattaforme di monitoraggio che consentono l'individuazione precoce di deviazioni dalle condizioni operative nominali e la previsione di scenari potenzialmente pericolosi. Tali algoritmi supportano sia l'attivazione automatica di contromisure tecniche (ad esempio l'isolamento di sezioni di impianto o l'attivazione di sistemi di ventilazione), sia l'attivazione assistita delle procedure di risposta, fornendo indicazioni operative agli addetti al controllo.
L'adozione di queste architetture abilita il passaggio da una logica di sicurezza prevalentemente reattiva, basata sulla risposta a eventi già in atto, a un approccio predittivo e proattivo, in cui l'analisi del rischio è integrata nel controllo di processo e aggiornata dinamicamente in funzione delle condizioni operative reali. In questo contesto, il sistema di monitoraggio costituisce un elemento chiave per il miglioramento delle prestazioni delle barriere di sicurezza e per la riduzione dei tempi di risposta agli eventi incidentali, contribuendo al rafforzamento complessivo della sicurezza dei sistemi a idrogeno.
Il modello è stato applicato a due casi di studio rappresentativi: (i) una catena di approvvigionamento di idrogeno verde destinata a settori industriali ad alta intensità energetica e (ii) uno scenario incidentale di tipo BLEVE che coinvolge un serbatoio criogenico di idrogeno liquido (LH_2), analizzato in termini di risposta delle barriere di sicurezza e mitigazione degli effetti di sovrapressione.
I risultati ottenuti dimostrano la capacità della metodologia di supportare l'analisi quantitativa degli scenari incidentali e di valutare in modo sistematico le prestazioni delle barriere preventive e mitigative. L'applicazione ai casi di studio conferma l'efficacia dell'approccio integrato nel ridurre il rischio residuo e nel fornire indicazioni operative utili alla progettazione e all'ottimizzazione delle misure di sicurezza, evidenziando il potenziale del modello come strumento di supporto alle decisioni ingegneristiche nei sistemi a idrogeno.

3. Caso studio 1: sistema di approvvigionamento di idrogeno verde

La metodologia è stata applicata alla catena di approvvigionamento di idrogeno verde, comprendente produzione mediante elettrolisi alcalina, compressione ad alta pressione (700 bar), stoccaggio intermedio, trasporto su strada mediante trailer ad alta pressione e rifornimento presso stazioni urbane.
Sono state considerate tre categorie di attori logistici: il produttore, il trasportatore e il distributore.
I principali rischi individuati attraverso l'analisi di identificazione dei pericoli (Hazard Identification, HAZID) sono i seguenti:

- perdita di contenimento in corrispondenza delle connessioni flangiate;
- sovrapressione durante la fase di compressione;
- guasto della valvola di sicurezza;
- danneggiamento meccanico dei sistemi in pressione dovuto a urti o collisioni durante il trasporto.

La Quantitative Risk Analysis (QRA) è stata condotta utilizzando i parametri di riferimento riportati in Tabella 1. Per ciascun evento sono stati associati una probabilità annua di accadimento P e una misura delle conseguenze C, espressa in termini di energia equivalente (MJ). L'indicatore di rischio R è quindi calcolato come prodotto tra probabilità e conseguenze, secondo la relazione R = P × C.

Tabella 1. Scenari incidentali con relativi indici di rischio

Evento	P[anno^{-1}]	C[MJ]	$R = P \times C$
Rilascio da flangia	2.3×10^{-3}	12	0.0276
Sovrapressione	1.1×10^{-3}	25	0.0275
Guasto valvola di sicurezza	8.0×10^{-4}	30	0.0240
Impatto meccanico in trasporto	4.0×10^{-4}	50	0.0200

Sulla base dei dati riportati in Tabella 1, il rischio totale del sistema di trasporto è stato calcolato come $R_{\text{tot}} = \sum_i P_i\, C_i$, ottenendo un valore pari a circa 9.9×10^{-2}.
Le connessioni flangiate e la fase di compressione emergono come i punti a maggiore criticità, contribuendo per circa il 45% al numero complessivo dei potenziali eventi di rilascio. L'analisi bow-tie indica che tali scenari sono prevalentemente riconducibili a sollecitazioni termiche e vibrazioni meccaniche che compromettono l'integrità dei raccordi.
Al fine di migliorare il livello di sicurezza del sistema, è stata introdotta una combinazione di barriere preventive e mitigative. Tra queste, sono stati installati sensori termici a risposta rapida RTD (Resistance Temperature Detectors) con tempo di campionamento pari a 0,5 s, nonché sensori di portata e di pressione integrati all'interno di una più ampia rete di monitoraggio basata su tecnologie IoT. Inoltre, nelle aree di carico e scarico sono state installate valvole di isolamento automatiche e unità di ventilazione forzata, con l'obiettivo di ridurre sia la probabilità di accadimento, sia la severità potenziale dei rilasci accidentali.
I dati acquisiti dalla rete di sensori sono stati elaborati mediante un algoritmo predittivo di rilevamento delle anomalie basato sulla regressione logistica. Tale approccio ha consentito di individuare condizioni operative anomale con un anticipo significativamente maggiore rispetto alla configurazione iniziale del sistema. In particolare, il tempo medio di rilevamento è stato ridotto da circa 30 s a circa 7 s, determinando una riduzione complessiva del livello di rischio pari a circa il 32%. La riduzione complessiva del rischio (≈32%) è dunque attribuibile sia alla diminuzione della probabilità di accadimento degli eventi, ottenuta mediante il miglioramento delle capacità di rilevamento precoce e intervento, sia alla riduzione della severità delle conseguenze, garantita dall'implementazione di barriere mitigative dedicate.

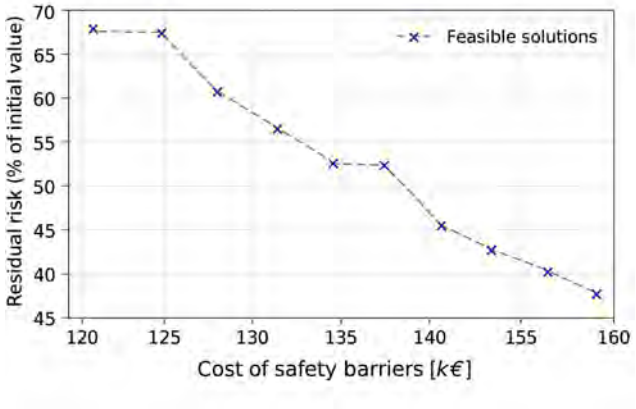


Figura 1. Frontiera di Pareto tra rischio residuo e costo delle barriere di sicurezza.

L'analisi della frontiera di Pareto dell'insieme delle soluzioni ottimali evidenzia che le configurazioni più promettenti si concentrano all'interno di un intervallo di costo relativamente ristretto, compreso approssimativamente tra 120 e 160 k€. All'interno di tale intervallo, diverse configurazioni consentono di ridurre il rischio residuo a valori inferiori al 70% rispetto allo scenario di riferimento. Questo risultato dimostra che miglioramenti significativi delle prestazioni di sicurezza possono essere ottenuti senza richiedere investimenti finanziari sproporzionati. Dal punto di vista delle decisioni ingegneristiche, tali configurazioni rappresentano pertanto un compromesso equilibrato e realistico tra efficacia tecnica e fattibilità economica.

4. Caso studio 2: Evento di tipo BLEVE associato a un serbatoio di idrogeno liquido (LH_2)

Il secondo caso studio analizza un evento di tipo BLEVE che si verifica in un serbatoio di stoccaggio di idrogeno liquido che si trova alla temperatura di 20 K e alla pressione di 5 bar. Il quadro di simulazione si basa su dati sperimentali riportati in letteratura e impiega modelli semplificati per la descrizione del rilascio di energia interna e della generazione di sovrapressione. In particolare, l'incremento di pressione è stimato mediante un bilancio termodinamico che correla l'energia immessa nel sistema, l'espansione della fase vapore e le condizioni di collasso strutturale della parete del serbatoio.
La dinamica del BLEVE è stata simulata considerando tre scenari distinti:

- S1 – Assenza di barriere: configurazione di riferimento priva di protezioni termiche o meccaniche;
- S2 – Barriere termiche passive: introduzione di schermature riflettenti in alluminio finalizzate a ritardare il trasferimento di calore e a rallentare la pressurizzazione del serbatoio;
- S3 – Barriere passive e attive combinate: schermature passive integrate con valvole di sfioro controllate, progettate per prevenire il raggiungimento di condizioni critiche di sovrapressione.

Questa impostazione consente un confronto sistematico dell'influenza delle diverse strategie di protezione sull'andamento della pressione interna, sui tempi di collasso strutturale e sulla severità dell'esplosione.
I risultati delle simulazioni per i tre scenari sono riassunti in Tabella 2. Gli indicatori considerati includono la pressione di picco, la temperatura della fiamma e il raggio di danno letale.

Scenario	Pressione di picco [bar]	Temperatura di fiamma [°C]	Raggio letale [m]
S1	3.2	2100	180
S2	2.4	1900	140
S3	1.8	1750	110

Tabella 2. Risultati di simulazione BLEVE per i tre scenari (S1, S2 e S3)

I risultati evidenziano una chiara e progressiva attenuazione della severità dell'evento BLEVE all'aumentare del livello di protezione adottato. In particolare, passando dalla configurazione non protetta (S1) al sistema combinato passivo–attivo (S3), la pressione di picco risulta ridotta di circa il 43%, mentre la temperatura della fiamma diminuisce di circa 350 °C. Un andamento analogo si osserva per il raggio di danno letale, che si riduce da 180 m a 110 m, corrispondente a una diminuzione di circa il 40%.
Tali risultati dimostrano l'efficacia della combinazione di barriere termiche passive e valvole di sfioro controllate. In particolare, l'integrazione di sensori criogenici e di sistemi di scarico attivamente gestiti consente una depressurizzazione anticipata del sistema, pari a circa 12 s prima del raggiungimento della soglia di collasso strutturale. Questa azione preventiva svolge un ruolo chiave nel limitare l'intensità dell'esplosione e nel ridurre l'estensione spaziale degli effetti pericolosi.

5. Discussione dei risultati

I due casi di studio dimostrano la versatilità e l'efficacia della metodologia integrata proposta, risultando applicabile sia a sistemi operativi continui sia a scenari incidentali acuti. La Tabella 3 riassume i principali risultati ottenuti, evidenziando come l'integrazione di analisi quantitativa del rischio, progettazione delle barriere e monitoraggio in tempo reale consenta una significativa riduzione del rischio residuo e un miglioramento della capacità di risposta operativa dei sistemi a idrogeno.
Nel caso della catena del valore dell'idrogeno verde, il rischio totale si riduce di circa il 32%, accompagnato da una drastica riduzione del tempo di rilevamento e da un incremento dell'affidabilità delle barriere preventive. Nel caso BLEVE su serbatoio di LH_2, l'adozione combinata di barriere passive e attive determina una marcata attenuazione della severità dell'evento, riducendo la pressione di picco, la temperatura di fiamma e l'estensione degli effetti dannosi.

Indicatore	Caso di studio 1: approvvigionamento H_2 verde	Caso di studio 2: BLEVE su LH_2
Riduzione complessiva del rischio	≈ 32%	≈ 43%
Tempo medio di rilevamento dei guasti	7 s (da 30 s nello scenario base)	Anticipo di 12 s rispetto al collasso strutturale
Tipologia di sensori	Termici, di portata e di pressione	Criogenici e di pressione
Tipologia di barriere	Barriere fisiche e digitali	Barriere termiche passive e valvole di sfioro
Riduzione del raggio di danno	–	≈ 40%
Approccio di ottimizzazione	NSGA-II	QRA integrata con simulazioni fisiche
Risultato finale	Rischio residuo < 70% dello scenario base	Pressione massima ridotta a 1.8 bar

Tabella 3. Confronto dei principali risultati dei due casi di studio

Complessivamente, l'ottimizzazione multi-obiettivo basata su NSGA-II dimostra che miglioramenti significativi delle prestazioni di sicurezza possono essere ottenuti mediante soluzioni tecnicamente efficaci ed economicamente sostenibili, rafforzando la resilienza delle infrastrutture a idrogeno.

L'analisi evidenzia inoltre che la combinazione di barriere fisiche e digitali consente di migliorare simultaneamente sicurezza e sostenibilità economica. In particolare, la sensoristica basata su tecnologie IoT, integrata con algoritmi predittivi, rappresenta un elemento chiave nella transizione da una gestione del rischio di tipo reattivo a un approccio proattivo fondato sul rilevamento precoce.

La riduzione dei tempi di risposta a valori inferiori a 10 s consente di limitare il rilascio di energia di oltre il 25% rispetto a sistemi non monitorati, mentre l'aumento dell'affidabilità delle barriere determina una significativa diminuzione della probabilità di eventi con conseguenze severe. Dal punto di vista economico, il rapporto medio benefici–costi raggiunge valori dell'ordine di 2,8, confermando la convenienza tecnica ed economica dell'approccio proposto.

Sebbene basati su simulazioni, i risultati indicano che la metodologia può costituire un valido strumento di supporto operativo per gestori di infrastrutture, autorità regolatorie e stakeholder industriali nella progettazione di sistemi a idrogeno sicuri e resilienti. La digitalizzazione del monitoraggio pone inoltre le basi per l'implementazione futura di un digital twin orientato alla sicurezza, integrabile in piattaforme SCADA o hub IoT.

Nel complesso, la metodologia integrata consente riduzioni del rischio nell'intervallo 30–40%, un incremento dell'affidabilità delle barriere fino a valori prossimi a 0,9 e

una razionalizzazione dei costi della sicurezza con risparmi medi del 10–15%. La capacità di rilevare e gestire eventi critici con un anticipo superiore a 20 s limita significativamente il potenziale di escalation degli incidenti. Tali risultati dimostrano che l'approccio proposto non è applicabile esclusivamente alla catena del valore dell'idrogeno, ma risulta sufficientemente flessibile da essere esteso ad altri contesti energetici ad alto rischio, quali infrastrutture per il biometano, l'ammoniaca verde e altre tecnologie emergenti della transizione energetica.

6. Conclusioni e prospettive

I risultati mostrano che l'integrazione di strumenti analitici consolidati (HAZOP, FTA e bow-tie) con sistemi digitali di sensing e monitoraggio in tempo reale rafforza in modo significativo la capacità di individuare precocemente condizioni potenzialmente pericolose e di supportare risposte tempestive agli eventi anomali. Tale integrazione contribuisce non solo alla riduzione del rischio residuo, ma anche al miglioramento della resilienza complessiva del sistema, favorendo il passaggio da una gestione della sicurezza di tipo prevalentemente reattivo a un approccio proattivo e adattivo.

L'applicazione della metodologia ai casi di studio selezionati evidenzia come le barriere di sicurezza possano essere configurate e adattate in funzione delle condizioni operative e della criticità dei singoli processi. In questo contesto, la digitalizzazione del monitoraggio consente di trasformare i dati operativi in informazioni significative a supporto del processo decisionale, rafforzando la capacità del sistema di apprendere e reagire alle deviazioni dal funzionamento nominale.

Dal punto di vista scientifico e applicativo, il lavoro fornisce una base per ulteriori sviluppi orientati a: (i) l'estensione del modello a dimensioni ambientali e socio-economiche, al fine di valutare in modo più ampio gli impatti delle strategie di mitigazione; (ii) l'integrazione di tecniche di machine learning per il supporto predittivo alle decisioni e la gestione dinamica delle barriere; (iii) l'applicazione del framework a contesti infrastrutturali complessi e su larga scala, in una prospettiva di safety-by-design e pianificazione della resilienza.

Nel complesso, la metodologia proposta si configura come uno strumento concettuale e operativo in grado di supportare una gestione del rischio più consapevole, adattiva e orientata alla resilienza nei sistemi energetici emergenti.

Bibliografia

[1] Abbasi, T., Abbasi S, The Hydrogen energy economy: A risk analysis perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 165: 112551, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112551.

[2] Catena, S., Rossi, L., Fabiano, M. Safety barriers design in hydrogen systems: A multi- level approach. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 89:105301, 2024. doi: 10.1016/j.jlp.2023.105301.

[3] Kim, J., Lee. S. Application of IoT and machine learning for early hazard detection in hydrogen facilities. Safety Science, 170:106487, 2024. doi: 10.1016/j.ssci.2023.106487.
[4] Li, Q., Zhou, C., He, Y. A review of hydrogen energy in the renewable energy supply chain. Sustainability, 17(5):2310, 2025. doi: 10.3390/ su17052310.
[5] Russo, A., Fabiano, M. Quantitative risk assessment of hydrogen supply chains. Process Safety and Environmental Protection, 174:383– 396, 2023. doi: 10.1016/j.psep.2023.01.015.
[6] Zhang, H., Li, J., Wang, Y. CFD and QRA coupling for hydrogen leak and dispersion scenarios. International Journal of Hydrogen Energy, 48(12):4712–4725, 2023. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.051.

.

Life Assessment di valvole del vapore surriscaldato soggette ad interazione creep-fatica attraverso analisi teoriche ed indagini metallurgiche

[1]L. Casiraghi
[1]RTM Breda s.r.l.

Sommario
Le valvole del vapore surriscaldato di turbina a vapore, nelle centrali a ciclo combinato, sono componenti eserciti in regime di scorrimento viscoso e soggetti ad esercizio ciclico, fattore molto rilevante per quelle valvole che hanno un elevato spessore di parete.
In questo lavoro vengono descritte alcune esperienze nella valutazione di consumo di vita di valvole in acciaio fuso bassolegato, in cui sono state eseguite valutazioni di danno e analisi di modifiche volte a prolungare la vita utile.
A calcoli teorici basati su simulazioni numeriche delle condizioni di esercizio, sono state affiancate analisi non distruttive e metallurgiche, utilizzate anche per definire il modello di materiale implementato nelle simulazioni.

1. Introduzione

In questo lavoro vengono presentate alcune esperienze nella valutazione di vita consumata e vita residua di valvole del vapore surriscaldato e risurriscaldato realizzate in acciaio fuso, in esercizio in centrali a ciclo combinato. Per questi componenti, eserciti in regime ciclico e ad alta temperatura, l'interazione tra creep e fatica è il meccanismo di danno principale.
La valutazione del danno combina esami difettoscopici e metallurgici con analisi numeriche termostrutturali ad elementi finiti, per il calcolo di sforzi e deformazioni in regime elastoplastico e a creep. L'integrazione dell'approccio teorico con esami sul materiale ha il duplice scopo di verificare la congruenza dei modelli teorici applicati e corroborare i risultati dei calcoli con evidenze sperimentali.

2. Calcolo teorico

Le valvole oggetto del lavoro sono componenti eserciti ad alta pressione, alta temperatura e in esercizio ciclico: i meccanismi di danno rilevanti sono quindi lo scorrimento viscoso, la fatica (oligociclica) e la loro interazione.
La base di sforzo e deformazione necessaria alla valutazione viene costruita mediante simulazioni non lineari ad elementi finiti in grado di calcolare deformazioni plastiche e a creep. Nella Figura 1 sono rappresentati alcuni dei modelli sviluppati, di cui questo lavoro riassume le esperienze svolte e descrive le analisi eseguite.
In tutti i casi analizzati, tutti i corpi sono stati modellati mediante elementi solidi. Quando sono stati usati elementi tetraedrici, sono stati scelti elementi a dieci nodi (a funzioni di forma paraboliche), per migliorare l'accuratezza del calcolo, e affinando la

dimensione degli elementi dove opportuno. Dovendo limitare il più possibile il numero di elementi, per non eccedere nel costo computazionale comunque molto alto, è stata inoltre curata, attraverso alcune iterazioni, la transizione della dimensione della *mesh* nelle zone lontane da concentrazioni di sforzo (elementi più grandi) alle zone di intaglio (mesh raffinata), per ridurre gli effetti spuri dovuti a bruschi cambi di massa locale e rigidezza. Come anticipato, le simulazioni eseguite sono di tipo non lineare: oltre al comportamento elastoplastico del materiale, viene considerata la non linearità dovuta al contatto tra i corpi. Ciò permette di valutare il contributo del serraggio dei tiranti o del rilassamento delle tensioni elastiche dovute all'accoppiamento per interferenza dei seggi.

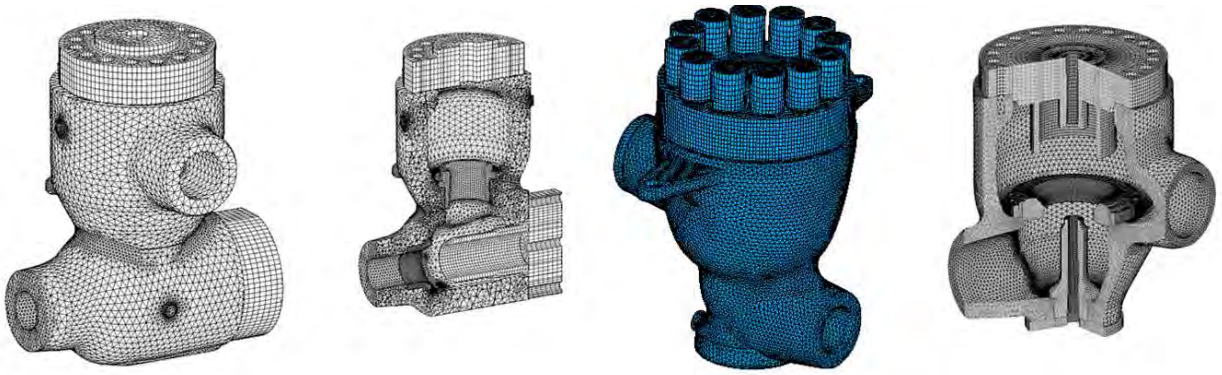


Figura 1. Alcuni modelli realizzati per le simulazioni termostrutturali

2.1 Calcolo del danno da interazione

,Uno degli approcci comunemente applicati per la valutazione teorica del danno da interazione creep-fatica, recepito anche dai codici di progettazione e per Fitness-for-Service, come ad esempio la norma API 579/ASME FFS-1 [1], è basato sul diagramma a due criteri in Figura 2, dove in ascissa si ha il danno da fatica e in ordinata il danno da creep. L'approccio prevede di calcolare indipendentemente la frazione di danno teorico da fatica D_f e da creep D_c: i valori risultanti definiscono ascissa e ordinata di un punto P che rappresenta lo stato del danno cumulato al momento della valutazione. L'interazione tra i meccanismi è valutata per confronto con il limite ammissibile, dato dalla linea spezzata: il danno complessivo è il rapporto tra la lunghezza del percorso OP e la lunghezza del percorso OPQ dove. Se il punto P esprime il danno allo stato attuale, le coordinate del punto Q($D_{f,amm}$, $D_{c,amm}$) esprimono il massimo danno ammissibile sulla base dell'ipotesi di esercizio futuro. Questi definiscono la pendenza del segmento PQ in base ai profili di servizio previsti per l'esercizio futuro: per esercizio stabile con preponderanza del danno da creep il segmento PQ tende ad essere verticale, per esercizio ciclico con preponderanza del danno da fatica il segmento PQ tende ad essere orizzontale, per regime misto la pendenza sarà intermedia tra i due casi precedenti.

Il calcolo delle frazioni di danno da creep e da fatica è svolto sulla base di sollecitazioni e deformazioni calcolate in campo non lineare: elastoplastico per la parte relativa alla

fatica, e tempo-dipendente per il calcolo a creep. Questo approccio corrisponde ad un'analisi di livello 2 nella norma API 579/ASME FFS-1. Nei prossimi capitoli viene descritto il metodo seguito per il calcolo dei contributi del danno.

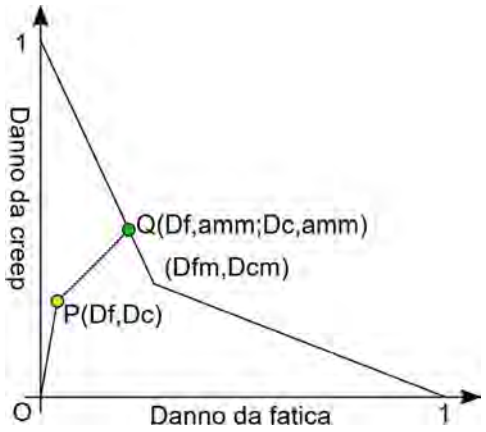


Figura 2. Diagramma due criteri per la valutazione del danno da interazione creep-fatica.

2.2 Danno da fatica

La frazione di vita consumata per fatica viene calcolata secondo la legge di Miner – equazione (1) – come rapporto tra il numero di cicli applicati e il numero di cicli ammissibili. Ad esempio, il numero di avviamenti da freddo, tiepido o caldo e il numero di cicli ammissibili per le rispettive variazioni di sollecitazione e temperatura.

$$D_f = \sum_{i=1}^{h} \frac{n_i}{N_{f,i}} = \sum_{i=1}^{h} \frac{n_{freddo}}{N_{f,freddo}} + \sum_{i=1}^{h} \frac{n_{tiepido}}{N_{f,tiepido}} + \sum_{i=1}^{h} \frac{n_{caldo}}{N_{f,caldo}} \qquad (1)$$

Le sollecitazioni cicliche cui le valvole sono soggette sono di natura prevalentemente termica, da dilatazione impedita, quindi il problema da studiare è un caso di fatica termomeccanica, per cui è opportuno seguire un approccio in deformazione con calcolo elastoplastico. Il calcolo poggia fondamentalmente su due proprietà del materiale: una curva di durata ε-N, che lega la componente alternata della deformazione al numero di cicli a nucleazione di cricca, e la curva ciclica σ_a-ε_a che, in una prova di fatica in controllo di deformazione, lega le componenti alternate di deformazione e sollecitazione al ciclo stabilizzato.

Uno dei modelli utilizzati nei casi oggetto di studio, in cui i cicli di carico presentano variazioni di deformazioni plastiche e sollecitazioni medie non nulle, è il modello di Morrow modificato – equazione (2) – in cui alla più nota curva di Coffin-Manson-Basquin (normalmente determinata a tensione media nulla) viene aggiunto un termine che tiene conto dell'effetto della sollecitazione media sulla parte elastica della curva di durata:

$$\varepsilon_a = \left(\frac{\sigma_f'}{E}\right) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f'}\right) \cdot \left(2N_f\right)^b + \varepsilon_f' \cdot \left(2N_f\right)^c \qquad (2)$$

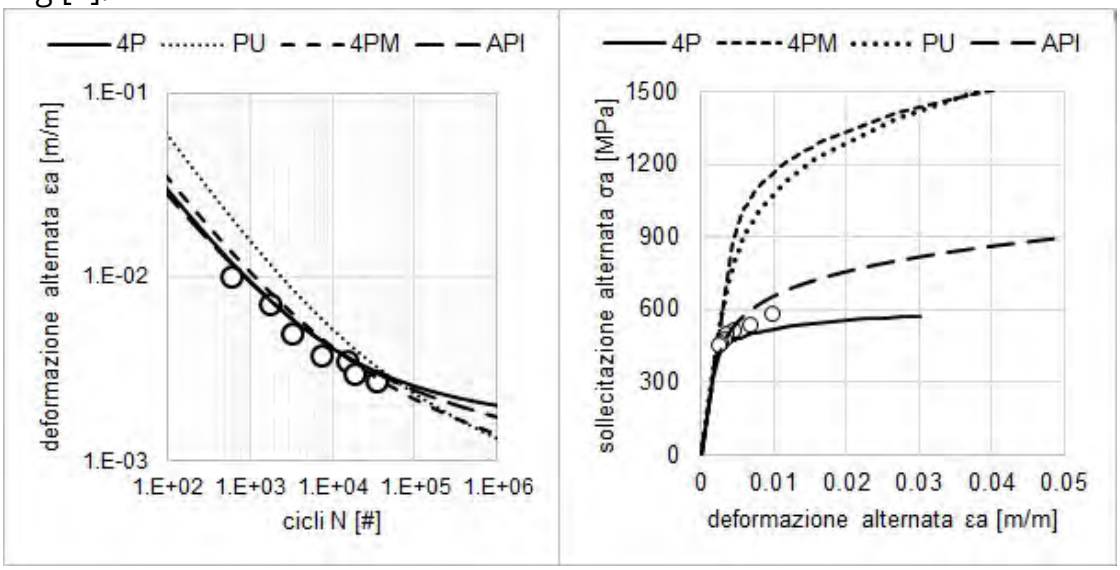
- ε_a è la componente alternata di deformazione
- σ_f' e b sono i parametri che descrivono la parte elastica della curva

- ε_f' e c sono i parametri che descrivono la parte plastica della curva
- E è il modulo elastico
- σ_m è la componente media della sollecitazione
- N_f è il numero di cicli a rottura

I parametri che descrivono la curva sono ricavati da prove sperimentali monoassiali, o stimati a partire dalle proprietà tensili del materiale attraverso metodi approssimati. In quest'ultimo caso, tipicamente vengono utilizzati: il metodo dei 4 Punti (4P), una sua versione elaborata da Manson (4PM), il metodo delle pendenze universali o il metodo proposto dalla norma API 579/ASME FFS-1

I metodi di stima delle curve di durata offrono generalmente risultati soddisfacenti: si veda il confronto in Figura 3 tra i dati sperimentali di prove di fatica in controllo di deformazione per un acciaio bassolegato 1CrMoV, con le curve di durata stimate secondo i metodi di letteratura appena citati. È importante considerare che nella costruzione delle curve stimate sono stati utilizzati i valori sperimentali delle proprietà tensili, anch'essi disponibili. Viceversa, l'utilizzo dei minimi di norma potrebbe portare a risultati meno soddisfacenti o anche non conservativi. Nella valutazione di componenti in esercizio sarà quindi importante avere un'idea quanto più accurata delle proprietà residue del materiale ed effettuare una scelta opportuna dei coefficienti di sicurezza.

Nella definizione delle curve di fatica viene in aiuto la durezza del materiale, che per correlazione fornisce indicazioni sulle proprietà tensili da cui partire per la stima della curva ε-N, e sul numero di cicli di transizione – punto D in Figura 5(a), all'incrocio delle rette della parte elastica e plastica della curva– attraverso la relazione proposta da Dowling [2].



(a) (b)

Figura 3. Confronto tra i dati sperimentali di fatica in controllo di deformazione per un acciaio bassolegato 1CrMov [3] con le curve ricavate secondo i metodi di predizione proposti nella letteratura tecnica: curve ε-N (a) e curve cicliche (b)

La curva ciclica, definita come la curva che interpola i vertici dei loop σ_a-ε_a al raggiungimento della risposta stabilizzata del materiale, ossia quando nella prova si

raggiunge la condizione di stabilità dell'ampiezza di sollecitazione, è normalmente espressa secondo una relazione del tipo Ramberg-Osgood – equazione (3). Essa è ricavabile da dati sperimentali o stimabile secondo l'ipotesi che i coefficienti della curva K' e n' dipendano dai coefficienti della curva ε-N secondo le relazioni $n' = b/c$ e $K' = \sigma_f' / \left(\varepsilon_f'\right)^{n'}$.

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} \qquad (3)$$

- ε_a è la componente alternata di deformazione
- σ_a è la componente alternata di sollecitazione
- K' e n' sono i parametri che descrivono la parte plastica della curva $\sigma_a - \varepsilon_a$

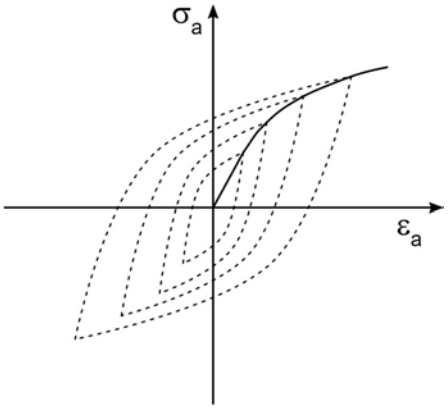
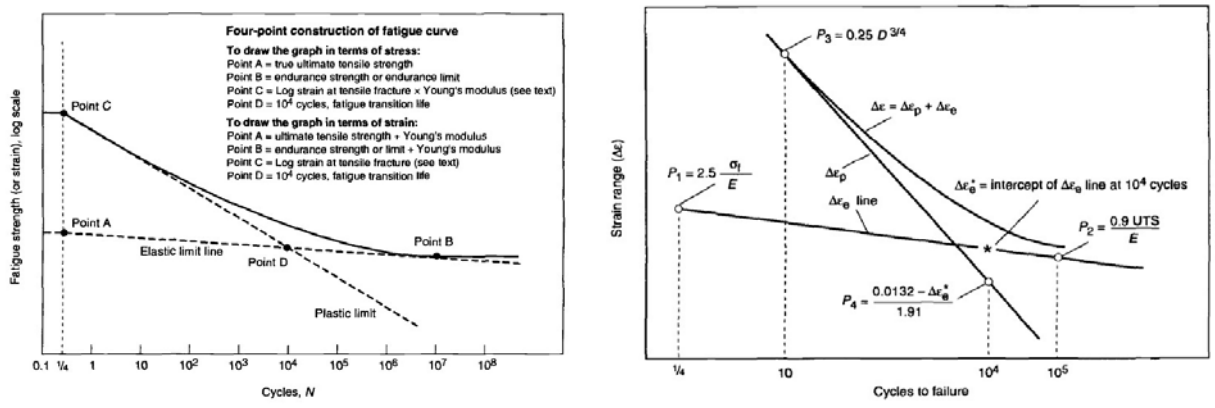


Figura 4. Costruzione della curva ciclica

È bene sottolineare che questa ipotesi non è sempre verificata, anche per il fatto che non è detto che tutti i materiali mostrino una stabilizzazione dell'ampiezza di sollecitazione durante una prova. In questi casi, ciò può portare a grossi errori di stima della curva ciclica, se svolta solo a partire dai coefficienti della curva di durata, a maggior ragione qualora anche questi siano stati determinati attraverso stime ed equivalenze. Questo caso è visibile nella Figura 3 (b), in cui la costruzione della curva ciclica dalle curve ricavate secondo il metodo dei 4 punti di Manson e delle pendenze universali non danno una correlazione soddisfacente con i dati del materiale considerato.



(a) (b)

Figura 5. Schema della costruzione delle curve di durata secondo il metodo dei 4 punti (a) e il metodo dei 4 punti nella versione di Manson (b)

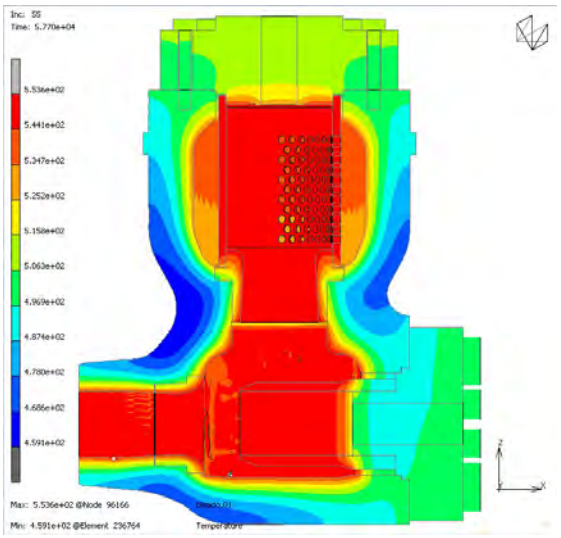


Figura 6. Distribuzione di temperatura in una valvola di alta pressione, in un istante significativo di un transitorio termico

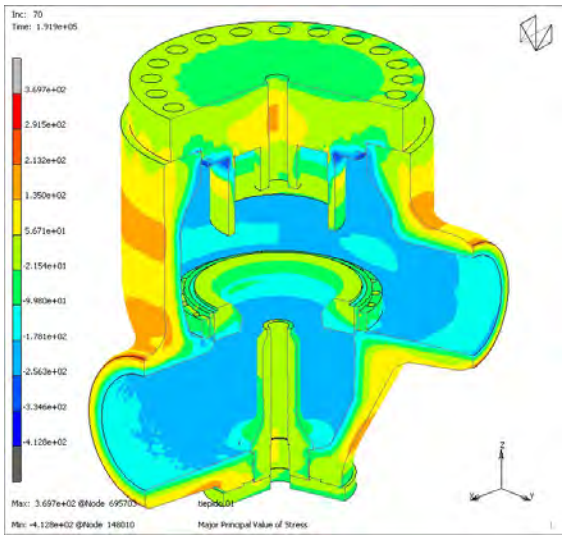


Figura 7. Distribuzione delle sollecitazioni durante un transitorio termico in una valvola di media pressione

La curva ciclica viene implementata nel modello numerico come curva elastoplastica del materiale, abbinata ad un modello di incrudimento. Infatti, la norma API 579 prevede l'uso del modello di incrudimento cinematico per il metodo di calcolo con analisi elastoplastica e deformazioni equivalenti. Inoltre, per calcolare sforzi e deformazioni triassiali sulla base di una curva ciclica σ-ε monoassiale, è prassi simulare la ripetizione di almeno 5 o 10 cicli di transitorio consecutivi, al fine di raggiungere la stabilizzazione delle ampiezze di sollecitazione e deformazione nei risultati della simulazione.

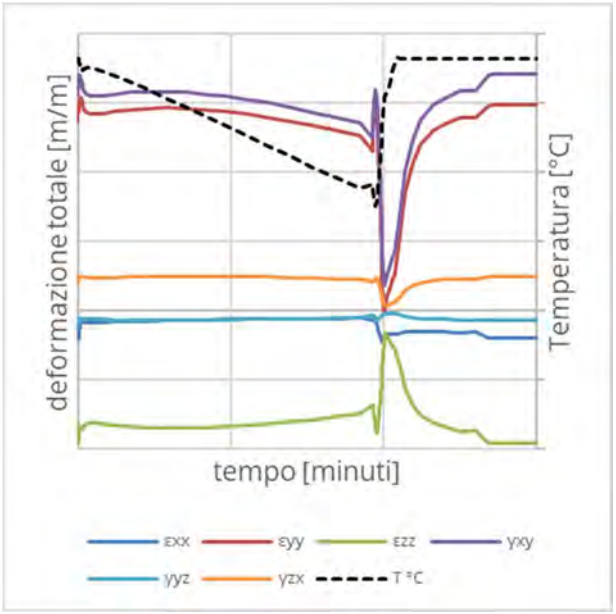


Figura 8. Storia di carico (componenti del tensore della deformazione totale) e temperatura locale (in linea tratteggiata) per un tipico transitorio da tiepido in una posizione oggetto di calcolo

Le curve delle componenti dei tensori di deformazione – Figura 8 – e sollecitazione sono elaborate per definire delle quantità scalari corrispondenti a un'ampiezza di deformazione equivalente $\varepsilon_{a,eq}$ e un valore di tensione media $\sigma_{m,eq}$ per ciascuna posizione di verifica significativa. Con queste è possibile entrare nella curva di Morrow – equazione (2) – e calcolare il numero di cicli ammissibili.

2.3 Calcolo del danno da creep

Analogamente al calcolo del danno da fatica, la frazione di via consumata per creep è calcolata – equazione (4) – come il rapporto tra il tempo di esercizio ad una data

combinazione di pressione e temperatura e il tempo a rottura nelle stesse condizioni, stimato attraverso una descrizione parametrica della resistenza a creep, come ad esempio la *master curve* secondo il parametro di Mason-Haferd – equazione (5) – in Figura 10.

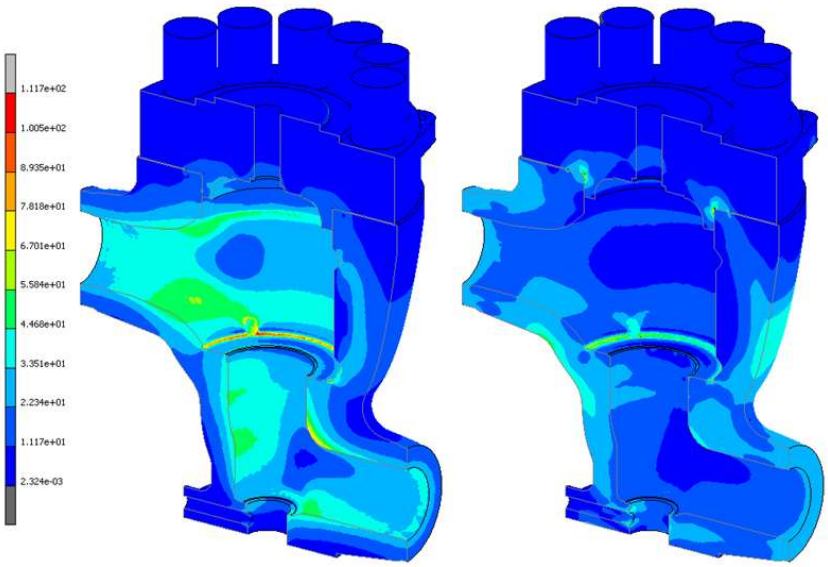
$$D_c = \sum_{j=1}^{k} \frac{\Delta t_j}{t_{u,j}} \qquad (4)$$

$$P_{MH} = \frac{\log t_u - \log t_a}{T - T_a} = \sum_{i=1}^{3} b_i \, log^i(\sigma) \qquad (5)$$

Il calcolo della frazione di danno da creep è approcciato in sollecitazione: la base di sforzo necessaria è generalmente ottenuta attraverso una simulazione in cui al materiale viene assegnata una legge di scorrimento – equazione (6) – secondo Bailey-Norton (velocità minima di scorrimento del regime secondario – Figura 11), potendo così calcolare il rilassamento delle sollecitazioni di picco e la sollecitazione stabilizzata in esercizio.

$$\dot{\varepsilon}_s = A(T)\sigma^{n(T)} \qquad (6)$$

Leggi di scorrimento che prevedono il regime primario della deformazione a creep sono meno utilizzate, principalmente per la più difficile reperibilità dei dati necessari, mentre per la definizione delle velocità di scorrimento del regime secondario possono essere sufficienti i dati della resistenza alla deformazione del 1% riportati sulle norme di prodotto.



(a) (b)

Figura 9. Comparazione grafica dello stato di sollecitazione su un corpo valvola all'istante iniziale della simualzione a creep (a) e dopo 100˙000 ore di tempo simulato (b), in cui è visibile la variazione delle sollecitazioni e il rilassamento dei picchi in seguito alla redistribuzione delle sollecitazioni

Nella Figura 12 sono rappresentate le curve della sollecitazione agente in più posizioni di verifica su un corpo valvola, durante 100˙000 ore di esercizio simulate. La deformazione a creep porta al rilassamento delle sollecitazioni di picco o all'aumento delle sollecitazioni di parete in seguito alla redistribuzione degli sforzi.

Discretizzando la curva in più intervalli di tempo Δt in cui si assume che la sollecitazione rimanga costante, come da Figura 13, si calcola il tempo a rottura per ciascun valore di σ, alla temperatura considerata per la simulazione, e il danno totale come somma del danno di ciascun intervallo.

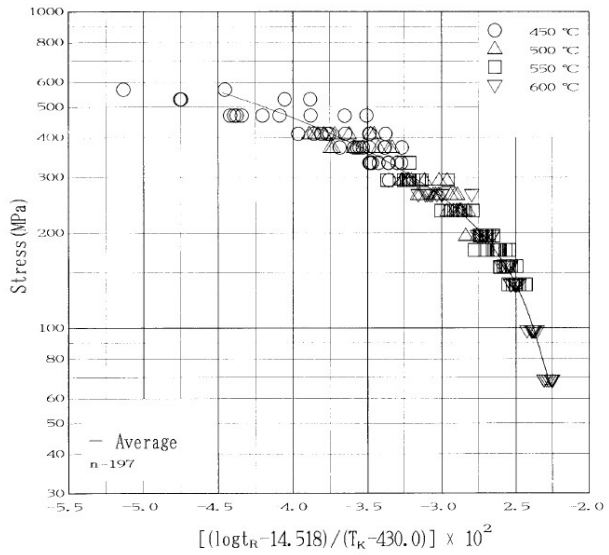


Figura 10. Master curve del parametro di Manson-Haferd per l'acciaio fusto 1Cr-1Mo-0.25V, da datasheet NIMS [4]

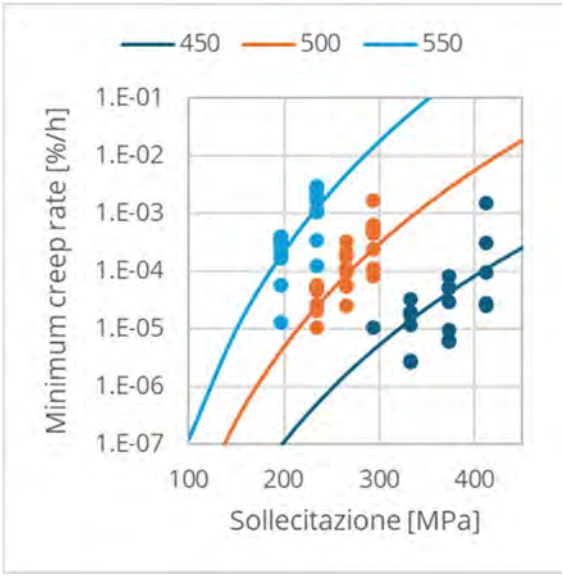


Figura 11. Velocità minima di scorrimento a creep (regime secondario) per l'acciaio [4]

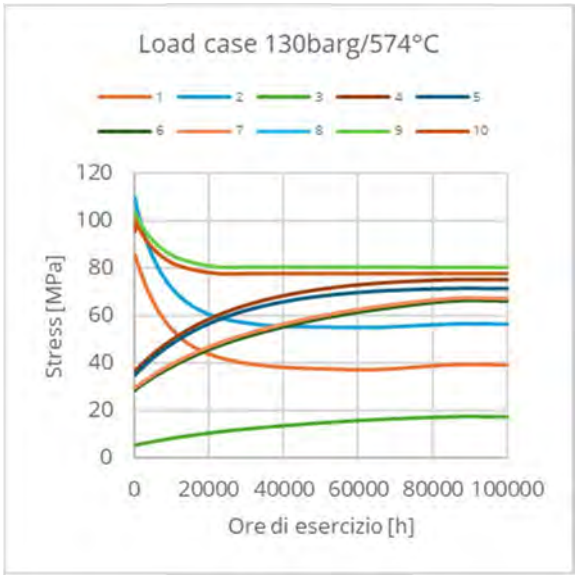


Figura 12. Andamento della sollecitazione in dieci posizioni di verifica (nodi) su un corpo valvola.

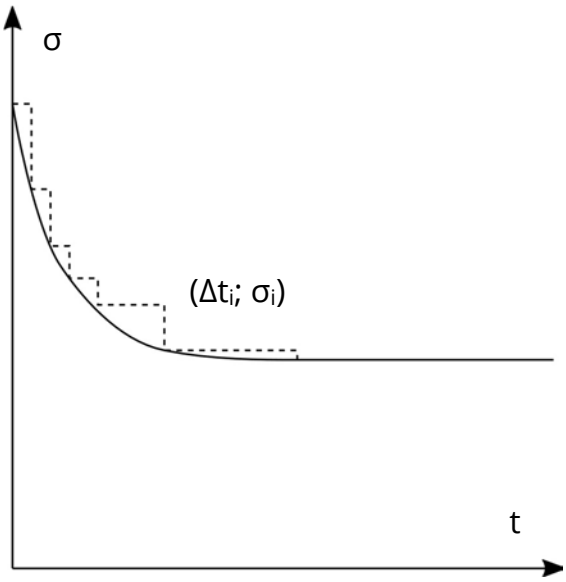
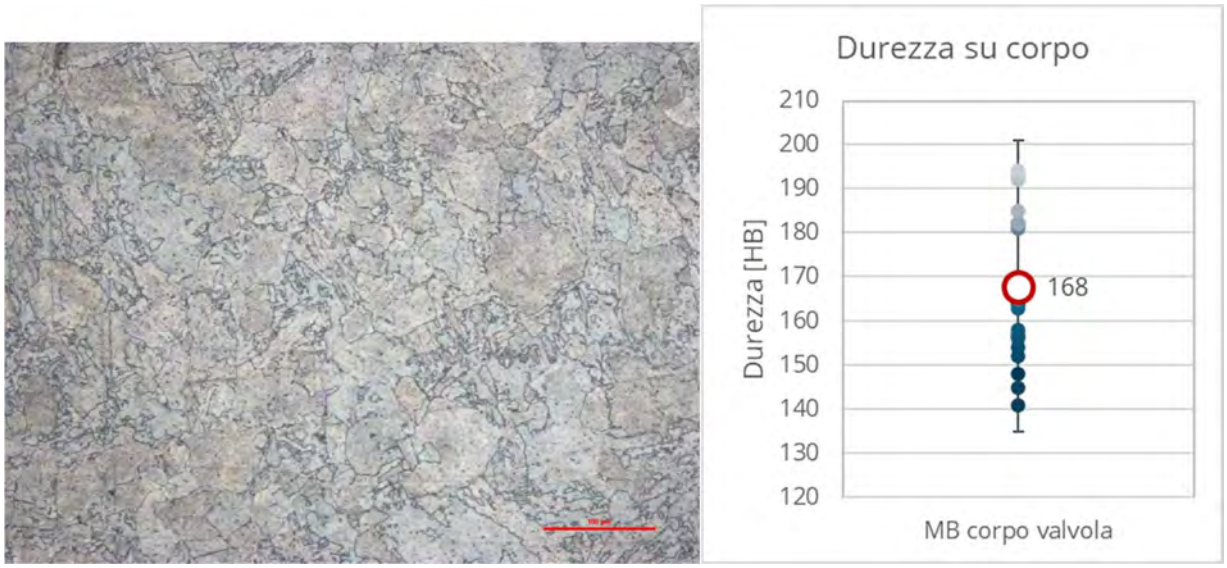


Figura 13. Scomposizione della curva tempo-sforzo in intervalli a sollecitazione costante per il calcolo della frazione di danno

3. Controlli metallurgici

Lo studio teorico del danno cumulato è stato accompagnato, come opportuno, dall'esecuzione di controlli difettoscopici e metallurgici. Per entrambi, vi è lo scopo duplice di verificare eventuali danneggiamenti pregressi e ottenere elementi con cui tarare il modello di calcolo, inteso in senso più generale come insieme della modellazione numerica e della trattazione dei risultati ai fini della stima di vita.



(a) (b)

Figura 14. Esempio di replica metallografica su un corpo valvola in acciaio basso-legato fuso (a), e risultati delle misure di durezza sul manufatto (b). Si osserva che la distribuzione delle durezze suggerisce l'esistenza di zone a diversa resistenza

Trattandosi di componenti soggetti a scorrimento viscoso, l'esame per replica è sicuramente fondamentale per verificare la presenza di incipiente cavitazione, alterazioni microstrutturali o, essendo spesso le valvole realizzate per fusione, eventuali criticità in zone interessate da riparazioni eseguite in fase di fabbricazione. Parallelamente all'esame per replica, la misura di durezza sulla piazzola di prelievo (o anche in posizioni distribuite sul corpo) permette di verificare che la microstruttura rilevata sia coerente con la durezza misurata o se ci sia un'eventuale alterazione rispetto ai valori di riferimento. In secondo luogo, misure di durezza diffuse identificano variazioni di resistenza locali, di cui sarà possibile tenere conto nella definizione delle curve del materiale da implementare nel modello FEM, specialmente per le verifiche a fatica. A titolo di esempio, nella Figura 14 sono rappresentati i risultati delle misure di durezza su un corpo valvola. Essendo un singolo componente, sembrerebbe corretto considerare il valore medio come valore di riferimento rispetto a cui tarare la stima delle curve di fatica. In realtà, nel grafico in Figura 14 (b) si osservano almeno 2 distribuzioni dei risultati: la prima nell'intervallo 140÷160HB, la seconda nell'intervallo 180÷195HB. Per la zona del corpo valvola con resistenza superiore può essere quindi valutato un modello di materiale specifico, sfruttando la

correlazione della durezza con le proprietà tensili e a fatica ed implementando ad esempio nel modello FEM una curva elastoplastica funzione della posizione.

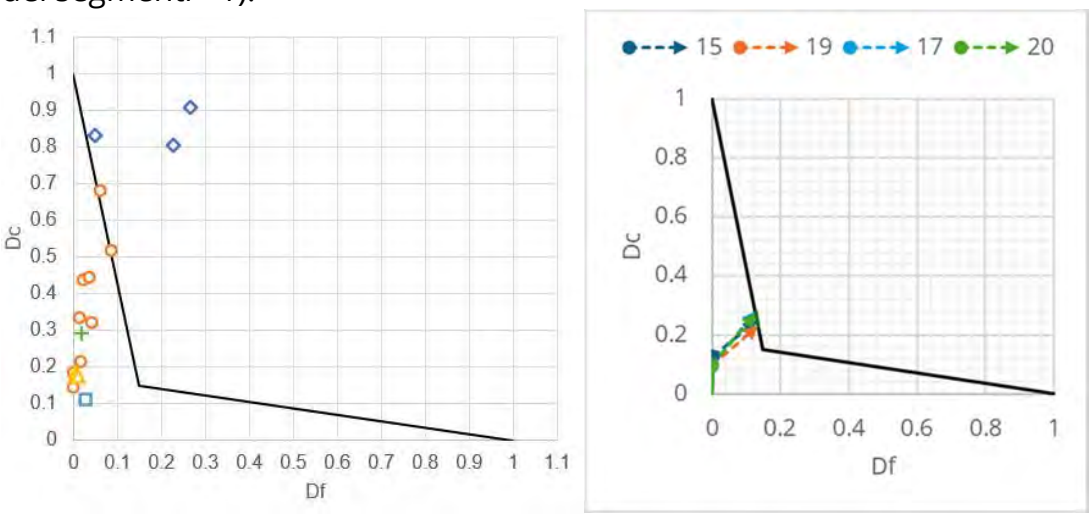
4. Calcolo della frazione di vita consumata e della vita residua

La valutazione della vita consumata si completa con il calcolo del danno combinato, basato sull'equazione di Miner-Robinson, che non fa altro che combinare le due equazioni del danno precedentemente illustrate – Equazione (7).

$$D_f + D_c = \sum_{i=1}^{h} \frac{n_i}{N_{i,i}} + \sum_{j=1}^{k} \frac{\Delta t_j}{t_{u,j}} \leq D_{amm} \qquad (7)$$

I diagrammi in Figura 15 mostrano la conclusione di due valutazioni di vita consumata. Nel diagramma in Figura 15 (a) è rappresentata la valutazione del danno combinato in diverse posizioni di un corpo valvola: ogni posizione è identificata da un simbolo, e per ciascuna posizione sono stati considerati più nodi sul modello. Il danno è inferiore al limite ammissibile per tutte le posizioni verificate, ad eccezione dei tre nodi identificati dal diamante blu, corrispondenti ad un bordo foro, e dei due nodi identificati dal cerchio arancio, corrispondenti ad un raccordo. In questo caso particolare, il foro si è rilevato essere effettivamente sede di cricche da fatica termica. Alla luce di questi esiti, è stato valutato di eseguire azioni di mitigazione sia sul foro sia sul raccordo, come descritto al successivo Capitolo 5.

Nel diagramma in Figura 15 (b) è invece rappresentata la valutazione della vita residua in 4 posizioni significative su un altro corpo valvola, eseguita considerando un esercizio futuro (segmento tratteggiato) caratterizzato da un contributo della fatica molto maggiore rispetto al periodo pregresso. I punti che indicano il danno cumulato giacciono quasi sull'asse delle ordinate, a danno da fatica quasi nullo e danno da creep pari a circa il 15%. La previsione del cumulo di danno per l'esercizio futuro mostra un rateo di cumulo di danno equivalente tra creep e fatica (pendenza dei segmenti ~1).



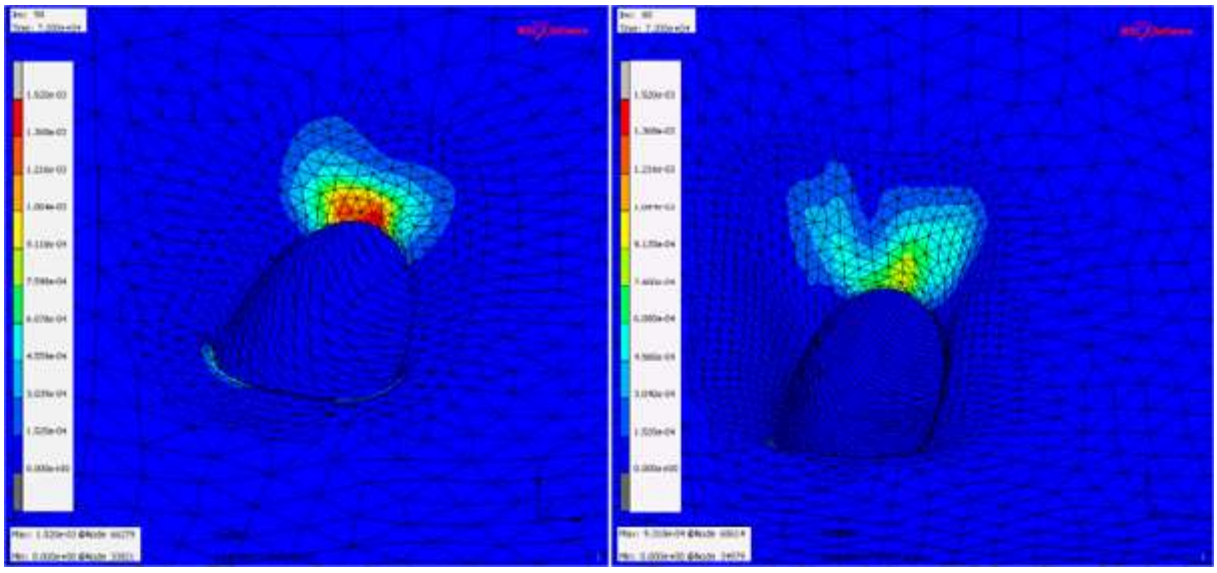
(a) (b)

Figura 15. Diagrammi a due criteri e valutazione del danno da interazione

5. Misure per la mitigazione del danno e controlli periodici

Oltre agli scopi di valutazione del danno e previsione di vita residua, la simulazione è stata utilizzata anche allo scopo di valutare misure di intervento, sia a valle di danni riscontrati durante le ispezioni sia preventive, al fine di rallentare il cumulo di danno nelle posizioni maggiormente sollecitate e a rischio di rottura.

Nella pratica, è stato valutato l'effetto di lavorazioni locali volte a mitigare il fattore di intaglio legato a fori, raccordi o transizioni (es. in Figura 16, relativa ad un foro dreno e Figura 17, dove si è analizzato un raggio di raccordo in corrispondenza di una transizione tra due diametri del condotto di uscita di una valvola). Nella Figura 16 sono comparate le distribuzioni della deformazione plastica cumulata al termine di un transitorio da freddo sul bordo del foro di un dreno, raccordato con raggio 5 mm nella geometria originale ed aumentato a circa 10 mm per mitigarne l'effetto di intaglio. I risultati ottenibili con una semplice lavorazione anche manuale sono molto promettenti: nella Figura 18 è rappresentato un riassunto del miglioramento della resistenza a fatica di una posizione su cui è stato eseguito un intervento di mitigazione dell'effetto di intaglio. Il grafico mostra il rapporto tra il numero di cicli ammissibile, calcolato per le geometrie proposte per la riparazione (01, 02, 03), e i risultati ottenuti per la geometria originale (00). In particolare, per i transitori da freddo, in cui le tensioni termiche sono molto gravose, si può ottenere un numero di cicli anche quattro volte più alto rispetto alla geometria iniziale, con forte beneficio sulla vita attesa.



(a) (b)

Figura 16. Confronto tra la deformazione plastica cumulata in corrispondenza di un foro di un dreno, in un transitorio di avviamento, con geometria originale (a) e con lavorazione locale per mitigare l'effetto di intaglio (b). Le due immagini hanno la stessa scala cromatica, per comparazione.

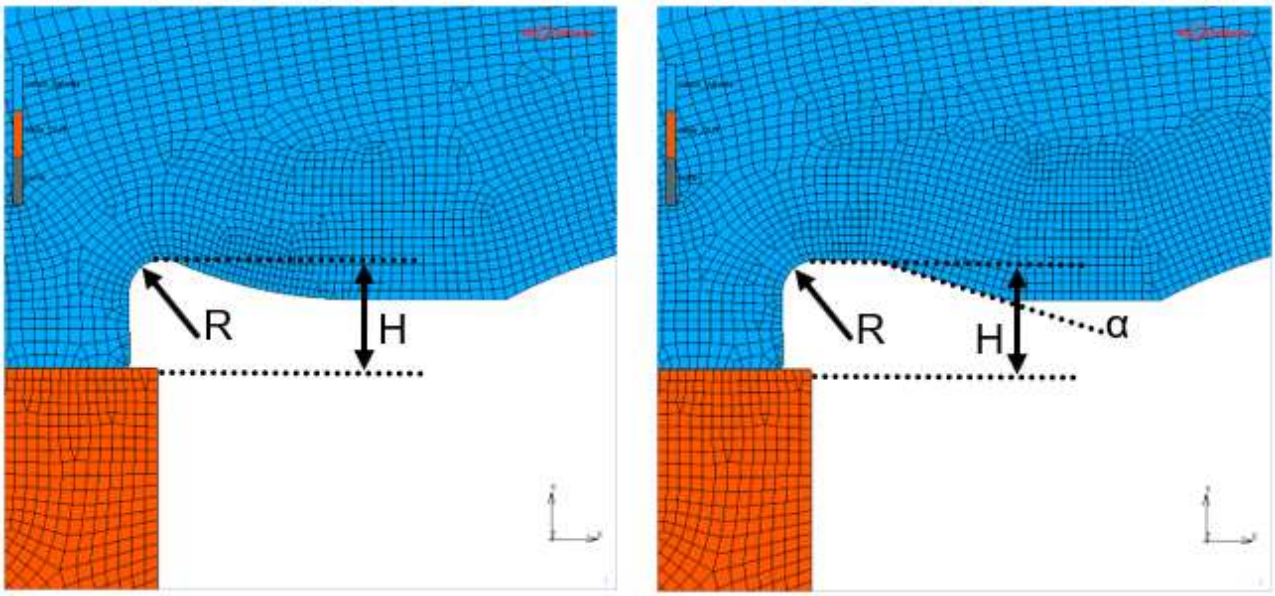


Figura 17. Esempio di geometrie analizzate e parametri studiati per la mitigazione dell'effetto di intaglio in un raccordo interno a un corpo valvola (azzurro) vicino alla sede di un seggio (arancio)

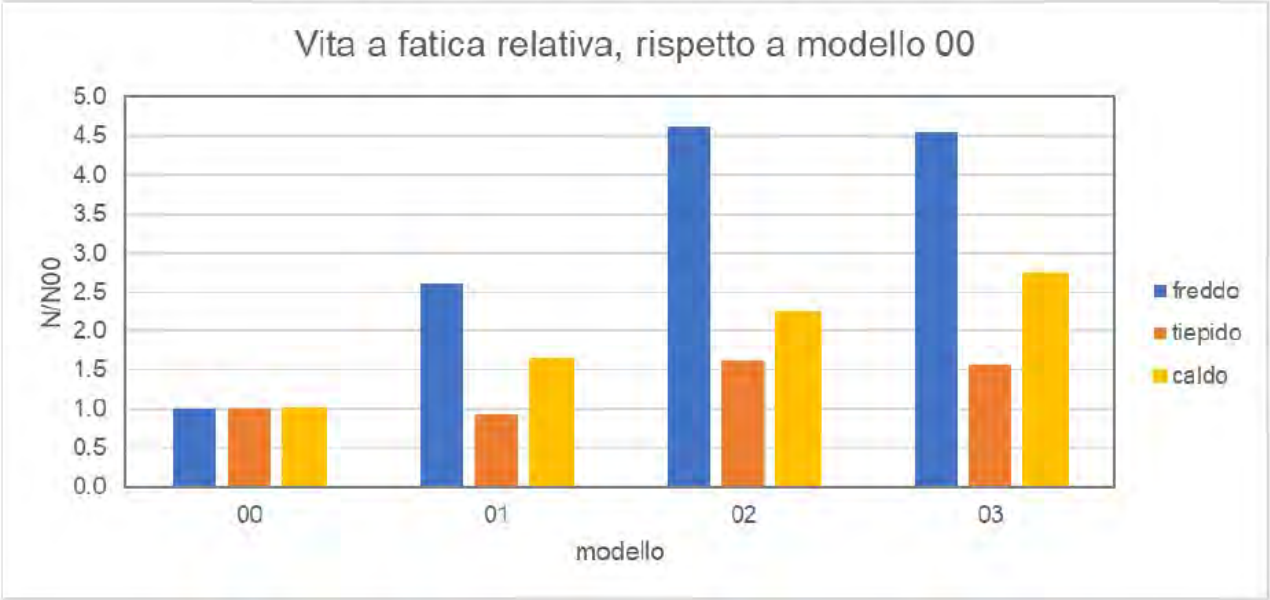


Figura 18. Rapporto tra il numero di transitori ammissibili per geometrie riparate con lavorazione mirata al prolungamento della vita teorica (casi 01, 02, 03) e geometria di partenza (00), per transitori da freddo, tiepido e caldo

6. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un riassunto delle esperienze fatte nella valutazione di vita consumata e vita residua di valvole del vapore surriscaldato e risurriscaldato realizzate in acciaio fuso, in esercizio in centrali a ciclo combinato.
Obiettivo dei lavori svolti è stata la valutazione della frazione di vita consumata complessiva da interazione creep-fatica, svolta attraverso simulazioni ad elementi

finiti in cui è stato implementato il comportamento elastoplastico e a creep dei materiali, combinate con i risultati di esami difettoscopici e metallurgici.
I risultati degli esami sui componenti hanno contribuito alla definizione delle proprietà dei materiali, in particolar modo le proprietà a fatica necessarie alla valutazione del danno dovuto ai numerosi transitori di avvio e fermata.
Per le posizioni in cui è stato riscontrato danno prematuro o per le quali è stata calcolata frazione di danno teorico superiore ai massimi valori ammissibili, lo strumento della simulazione è stato, inoltre, applicato per la valutazione di misure correttive per ridurre i coefficienti di concentrazione degli sforzi e mitigare il rischio di rotture premature.

Bibliografia

[1] American Petroleum Institute, API 579-1/ASME FFS-1 2021 Fitness-For-Service, December 2021, API Publishing, 2021.

N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Pearson Education Limited, 2013.

[3] NIMS, «NRIM Fatigue data sheet No.58 "Data sheet on Elevated-Temperature Time-Dependent Low-Cycle Fatigue Properties of ASTM A470-8 (1CrMo0.25V) Steel Forging for Turbine Rotors and Shafts",» 1987.

[4] NIMS, NRIM CREEP DATA SHEET 31B – DATA SHEETS ON THE ELEVATED-TEMPERATURE PROPERTIES OF 1Cr-1Mo-0.25V STEEL CASTINGS FOR STEAM TURBINE CASINGS (ASTM A356/A356M-9), Tokyo, Giappone: National Research Institute for Metals, 1994.

[5] NIMS, «NIMS Fatigue Data Sheet No.78 - Data Sheets on Elevated-Temperature, Time-Dependent Low-cycle Fatigue Properties of ASTM A387 Grade 91 (9Cr-1Mo),» NIMS, 1993.

6] NIMS, «NIMS Creep Data Sheet No.9B - ASTM A470-8 (1Cr-1Mo-0.25V) DATA SHEETS ON THE ELEVATED-TEMPERATURE PROPERTIES OF 1Cr-1Mo-0.25V STEEL FORGINGS FOR TURBINE ROTORS AND SHAFTS (ASTM A470-8),» 1990.

[7] ECCC, ECCC RECOMMENDATIONS vol. 6 "Residual Life Assessment and Microstructure", 2005

Valutazione della sicurezza di sistemi di isolamento multistrato (MLI) per serbatoi criogenici di idrogeno liquido (LH_2) esposti a incendio

D. Camplese[1], A. Schiaroli[1], G.E. Scarponi[1], A. Tugnoli[1], V. Cozzani[1]

[1]Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

Sommario
Nel contesto della transizione energetica, l'idrogeno liquido (LH2) rappresenta una soluzione promettente per lo stoccaggio grazie all'elevata densità energetica volumetrica. I serbatoi criogenici isolati con materiali multistrato (MLI) sono tra le tecnologie più efficaci, ma la perdita di integrità in caso di incendio può portare a cedimenti rapidi e pericolosi. Prove sperimentali dimostrano infatti che temperature elevate degradano in modo significativo gli MLI, riducendone la capacità protettiva.
Questo lavoro propone una metodologia per la valutazione della sicurezza dei sistemi MLI in serbatoi di LH2 sottoposti a fuoco. L'approccio introduce indicatori di prestazione specifici e un modello di simulazione della risposta termodinamica del serbatoio, che integra gli effetti della degradazione termica dell'isolamento. Validato su dati sperimentali, il modello consente di stimare il tempo al cedimento meccanico mediante analisi agli sforzi.
L'applicazione a diversi casi di studio mostra che, sebbene gli MLI a base di alluminio resistano più a lungo di quelli in poliestere, temperature superiori a 850 °C comportano la completa degradazione degli isolamenti entro 10 minuti, con conseguente rapido collasso del serbatoio. I risultati forniscono elementi utili per la progettazione sicura dei serbatoi LH2 e per la definizione di strategie di risposta in caso di incendio.

1. Introduzione

Il cambiamento climatico impone una transizione verso sistemi energetici a basse emissioni, nell'ambito dei quali l'idrogeno si configura come un promettente vettore [1]. Lo stoccaggio in forma liquida (LH2) a temperature criogeniche e pressione atmoferica consente di ottenere le elevate densità energetiche richieste dal trasporto su strada [2]. La sostenibilità del trasporto in tali condizioni è strettamente connessa alla disponibilità di sistemi di isolamento in grado di minimizzare il flusso termico dovuto all'esposizione atmosferica e le conseguenti perdite per evaporazione (gas di "boil-off"). Tra le tecnologie disponibili, gli isolanti multistrato (MLI) rappresentano una delle soluzioni più promettenti [3]. Questi si compongono di ultra-sottili di materiali alto riflettenti (fogli di allunimio o materiale polimerico con coating in alluminio) intervallati a strati spaziatori a bassa conducibilità termica (fibre di vetro o materiali polimerici a bassa densità) e vengono posizionati

nell'intercapedine tra guscio interno ed esterno dei serbatoi, in condizioni di alto vuoto. Questa particolare configurazione garantisce elevate proprietà isolanti e al contempo ridotti ingombri.
Nonostante i comprovati vantaggi delle tecnologie emergenti basate su LH2, la loro diffusione su larga scala è legata alla valutazione dei rischi connessi all'elevata infiammabilità dell'idrogeno [4]. Rilasci accidentali possono generare flash fire, esplosioni di nube e jet fire, con potenziali effetti domino.
Inoltre, prove sperimentali su serbatoi criogenici in scala reale hanno mostrato che l'esposizione a incendio può condurre a cedimenti catastrofici, con sviluppo di BLEVE [5] e fireball [6], nonostante la presenza degli MLI. Studi successivi hanno confermato che gli MLI sono soggetti ad una severa degradazione termica ad alte temperature [7], esponendo il serbatoio agli elevati flussi termici dell'incendio con conseguente rapida pressurizzazione e riduzione della resistenza meccanica.
Per studiare un tale scenario sono stati sviluppati numerosi modelli a parametri concentrati e distribuiti (attraverso l'utilizzo di software di fluidodinamica computazionale, CFD) [8]. Tuttavia, questi richiedono la modifica caso-specifica delle proprietà dell'MLI per adattarle alla risposta in condizioni di contatto con il fuoco. La loro applicazione è pertanto soggetta alla disponibilità di dati sperimentali di esposizione ad incendio riferiti allo specifico serbatoio sotto analisi, la cui produzione è onerosa oltre che di difficile realizzazione. Questo ne limita l'applicabilità su larga scala.
Recentemente sono stati introdotti modelli fisici per la simulazione predittiva della degradazione termica degli MLI e delle conseguenti prestazioni in caso di incendio [9-10]. Tuttavia, questi non includono una simulazione completa della risposta termo-meccanica del serbatoio.
Questo studio presenta una metodologia innovativa per la valutazione della sicurezza dei serbatoi criogenici esposti ad incendio, che integra la modellazione della degradazione dell'isolamento con la simulazione della pressurizzazione e della risposta strutturale al fine di stimare il tempo al cedimento in scenari realistici.
Nel seguito, il lavoro presenta la metodologia di valutazione sviluppata (Sezioni 2 e 3) e ne descrive l'applicazione a un caso studio rappresentativo di un serbatoio di trasporto di LH2 su veicolo esposto a scenari di incendio (Sezione 4), riportando i risultati e le principali implicazioni per la sicurezza e la progettazione (Sezione 5).

2. Metodologia

La metodologia proposta per la valutazione della sicurezza dei serbatoi criogenici esposti ad incendio è articolata in due fasi.
La prima riguarda la definizione dell'approccio integrato per la simulazione del comportamento del serbatoio esposto ad incendio, ottenuto combinando un modello dettagliato per lo scambio termico e la degradazione termica dell' MLI (Sezione 3.1) con un modello a parametri concentrati che descrive la risposta termo-meccanica del serbatoio (Sezione 3.2). Quest'ultimo consente di calcolare l'aumento

di pressione e temperatura all'interno del serbatoio, gli sforzi nel guscio, l'effetto dell'azione della valvola di sicurezza (PRV) e di stimare il tempo al cedimento attraverso un criterio di cedimento meccanico largamente utilizzato in letteratura (Sezione 3.3). Per la valutazione comparativa degli scenari, sono stati definiti degli indicatori di performance del serbatoio basati sui tempi caratteristici (RTs) della risposta del serbatoio e degli MLI.
La seconda fase riguarda la definizione del caso studio (Sezione 4). Questa comprende la descrizione geometrica e costruttiva del serbatoio, rappresentativo di un serbatoio di LH2 per applicazione su veicoli, la definizione del sistema di isolamento e dello scenario di incendio caratteristico,basato su curve di temperatura di fiamma standard.

3. Modellazione integrata del sistema serbatoio-MLI

3.1 Modello di degradazione dell'MLI

Il modello di degradazione termica dell'MLI adottato si basa sugli approcci sviluppati per sistemi a base poliestere e successivamente estesi a MLI non combustibili a base alluminio [9-10]. L'isolamento è rappresentato mediante una discretizzazione nodale monodimensionale costituita da N+2 nodi: uno per ciascuno dei N strati riflettenti e due nodi corrispondenti ai gusci esterno (Se) e interno (Si). Per ogni nodo è scritto un bilancio energetico transitorio; il flusso termico tra nodi adiacenti è calcolato come somma dei contributi di irraggiamento, conduzione solida negli spaziatori e trasferimento nel gas residuo.
Nel bilancio del guscio esterno è incluso il flusso termico imposto dall'incendio, mentre quello del guscio interno consente di determinare la temperatura della parete e il flusso verso il fluido criogenico. La degradazione è trattata in modo differenziato in funzione della tipologia di MLI.
Per gli MLI a base poliestere, la degradazione è descritta mediante un modello cinetico di tipo Arrhenius, in cui la frazione di massa residua evolve nel tempo in funzione della temperatura [9]. La riduzione di massa comporta la variazione delle proprietà geometriche e termiche degli strati; al raggiungimento di una soglia critica ($Y_{s,T}$ = 0,16 secondo [9]) lo strato è considerato completamente degradato e rimosso dal calcolo.
Per gli MLI a base alluminio, la degradazione è assunta istantanea al raggiungimento della temperatura di fusione dell'alluminio (660,3 °C). Fino a tale soglia, le proprietà termo-fisiche degli strati sono mantenute costanti. L'implementazione di tali criteri consente di descrivere l'incremento progressivo della conducibilità termica efficace dell'MLI in condizioni di incendio, fornendo il flusso termico verso il guscio interno necessario alla successiva modellazione termo-meccanica.
Le equazioni alla base del modello di degradazione sono riportate altrove [9-10].

3.2 Modello termodinamico del serbatoio

La pressurizzazione e l'incremento di temperatura all'interno del serbatoio sono calcolati mediante un modello lumped a zona singola. Il dominio fluido è rappresentato da un unico nodo termico (H2; Figura 1), per il quale sono scritti i bilanci di massa ed energia assumendo equilibrio termodinamico tra fase liquida e fase vapore. Le equazioni alla base del modello descritto in seguito sono riportate altrove [11].

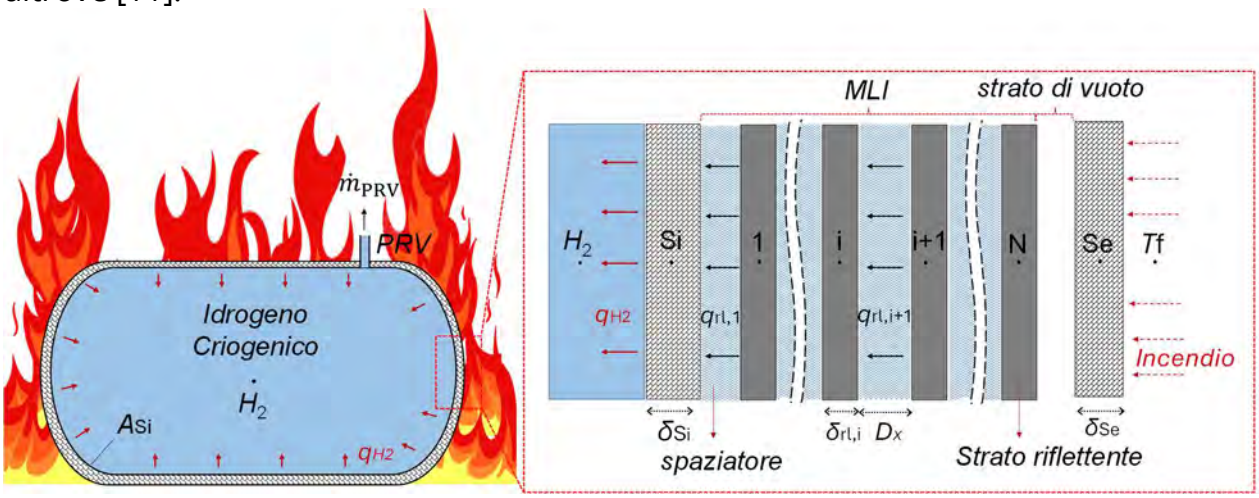


Figura 1. Schema descrittivo del modello lumped a zona singola e della sua integrazione con il modello di degradazione dell'MLI.

Entrambi i bilanci tengono conto dell'azione della valvola di sicurezza (PRV) tramite un fattore di attivazione ϕ (0 valvola chiusa; 1 valvola aperta). La portata e l'entalpia allo scarico sono calcolate secondo [12], assumendo frazione di vapore pari a 1 nel flusso uscente.

Il il flusso termico proveniente dal guscio interno ed è calcolato come prodotto tra area interna e coefficiente di scambio h, determinato come media pesata tra il coefficiente di ebollizione dell'idrogeno liquido e quello convettivo vapore-parete, ponderati rispetto alle aree bagnate. Le proprietà termodinamiche dell'idrogeno sono ottenute dal database CoolProp; la pressione è ricavata dall'equazione di stato implementata nel database.

La condizione al contorno d'incendio è assunta come avvolgimento completo. Il flusso termico entrante nel guscio esterno è calcolato come somma dei contributi radiativo e convettivo, in funzione di temperatura di fiamma, temperatura del guscio esterno, emissività della fiamma = 1, emissività esterna del guscio $\varepsilon_{Se,out}$ = 0,9, coefficiente convettivo h_f = 10 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ e costante di Stefan–Boltzmann σ = $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$.

3.3 Criterio di cedimento meccanico

L'integrità del serbatoio è verificata a ogni passo temporale mediante il criterio di snervamento di Von Mises. La rottura del guscio interno è assunta quando la tensione equivalente eguaglia la tensione di snervamento del materiale.

La tensione equivalente è calcolata in funzione delle tensioni principali longitudinale, circonferenziale e radiale, determinate in ipotesi di parete sottile in funzione della pressione interna, del raggio del serbatoio e dello spessore.

La tensione di snervamento varia con la temperatura del guscio secondo i coefficienti di riduzione previsti dalla EN 1993-1-2:2024. Ai fini della stima conservativa del tempo al cedimento, è utilizzata la temperatura massima del guscio interno $T_{Si,max}$, calcolata trascurando il flusso termico verso il fluido. Una descrizione dettragliata di questo approaccio è presentata altrove [11].

3.4 Definizione degli indicatori di performance

Per la valutazione sintetica della risposta del sistema in incendio è stato definito un insieme di tempi caratteristici (Reference Times, RTs), corrispondenti a eventi chiave che indicano il livello di minaccia all'integrità del serbatoio.

1. tempo di inizio degradazione (t_{od}), definito come il tempo necessario affinché lo strato riflettente più esterno raggiunga il 99% della perdita di massa per MLI a base poliestere o il 99% della temperatura di degradazione per MLI a base alluminio (923 K);
2. tempo di degradazione totale (t_{td}), corrispondente alla completa degradazione dell'intero sistema MLI;
3. tempo della prima apertura della valvola di sicurezza (t_{PRV});
4. tempo al cedimento (t_{tf}), calcolato secondo il criterio descritto in Sezione 3.3.

4. Caso studio

Il modello sviluppato è stato applicato a un serbatoio criogenico a doppia parete rappresentativo di applicazioni su veicolo e coerenti con configurazioni per mezzi pesanti. Il serbatoio è cilindrico orizzontale con fondi ellittici, con lunghezza del guscio interno pari a 2.1 m e diametro di 0.55 m. Questo è è progettato per operare a pressione atmosferica ed è equipaggiato con valvola di sicurezza (PRV). La pressione massima ammissibile (MAWP) è pari a 3,9 bar, Le pressioni di apertura e chiusura della PRV sono determinate secondo ISO 13985:2006 e ISO 21013-3:2016.

Il materiale del guscio interno è acciaio austenitico AISI 316L (codice 1.4404 secondo EN 10027-2:2015), con resistenza a snervamento a temperatura ambiente pari a 240 MPa e riduzione in funzione della temperatura secondo EN 1993-1-2:2024 .Gli spessori dei gusci interno ed esterno sono pari a 2 mm, nel rispetto dei requisiti minimi di ISO 21009-1:2022.

L'intercapedine tra i due gusci ha spessore pari a 0,035 m ed è mantenuta in alto vuoto (10^{-3} Pa). Per l'analisi vengono considerati due sistemi MLI rappresentativi delle categorie principali: i) MLI a base alluminio formati da strati riflettenti in

alluminio puro e spaziatori in fibra di vetro; ii) MLI a base poliestere formati da strati riflettenti in poliestere con coating in alluminio e spaziatori in rete polimerica. Per entrambi sono assunti 80 strati riflettenti intervallati da altrettanti strati spaziatori. Tutte le altre proprietà necessarie per risolvere il modello sono riportate altrove [9-10].
Lo scenario di incendio considerato è un pool fire di idrocarburi che avvolge completamente l'apparecchiatura. L'intensità del flusso termico è determinata a partire da curve standard di temperatura di fiamma (ISO 21009-1:2022), introducendo un fattore di intensità ψ_f per esplorare diversi livelli di severità:

$$T_f = 1080 \cdot \psi_f(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{2.5t}) + 293.15$$

La simulazione è condotta variando ψ_f tra 0.3 e 1 con passo 0.1.

5. Risultati

La Figura 2 riporta l'evoluzione temporale della pressione interna, della temperatura di fiamma e della temperatura massima del guscio interno del serbatoio equipaggiato con MLI a base alluminio (Figure 2a, c, e) e a base poliestere (Figure 2b, d, f) per differenti valori del fattore di intensità ψ_f (0.5, 0.7 e 1). Nel primo periodo di esposizione, la durata del quale dipende dalla severità dell'incendio e dal grado di deterioramento dell'MLI, pressione e temperatura del guscio rimangono prossime ai valori iniziali nonostante la rapida crescita della temperatura di fiamma.
Nel caso più severo (ψ_f = 1), tale fase si estende oltre il tempo di inizio degradazione (t_{od}), evidenziando l'effetto protettivo iniziale dell'isolamento. Al completamento della degradazione totale dell'MLI (t_{td}) si osserva un incremento brusco della pressione e della temperatura del guscio interno, con attivazione della PRV e cicli successivi di apertura e chiusura. Il cedimento del serbatoio (t_{tf}) avviene per effetto combinato della pressurizzazione e della riduzione della resistenza meccanica dovuta all'aumento di temperatura del materiale. Il confronto tra MLI a base alluminio e poliestere mostra tempi caratteristici maggiori per il primo, indicando una maggiore resistenza in condizioni di incendio severo.
In condizioni di incendio meno severe si osserva un ritardo significativo nella pressurizzazione e nell'aumento della temperatura del guscio interno. Per ψ_f = 0.7 il serbatoio sopravvive all'intera esposizione di 3600 s indipendentemente dal tipo di MLI considerato; tuttavia l'MLI a base poliestere risulta completamente degradato in meno di 840 s, mentre nel caso dell'MLI a base alluminio permane uno strato integro, determinando un incremento di pressione più lento e ritardato.
Riducendo ulteriormente l'intensità (ψ_f = 0.5), il sistema a base alluminio non mostra segni di degradazione, con variazioni trascurabili di pressione e temperatura del guscio; al contrario, l'MLI a base poliestere subisce una degradazione lenta ma completa, con conseguente pressurizzazione fino alla soglia di apertura della PRV.
La velocità di pressurizzazione varia sensibilmente in funzione sia del tipo di isolamento sia dell'intensità dell'incendio, coerentemente con i valori del flusso termico verso il serbatoio calcolati nei casi studio.

Nel complesso, i risultati evidenziano che l'MLI garantisce un intervallo di inerzia iniziale dipendente dalla severità dell'incendio e dal materiale, che la preservazione dell'integrità dell'isolamento consente la sopravvivenza a esposizioni prolungate, e che, anche in presenza di degradazione parziale, il sistema può rallentare la pressurizzazione evitando il cedimento qualora la PRV sia correttamente dimensionata.

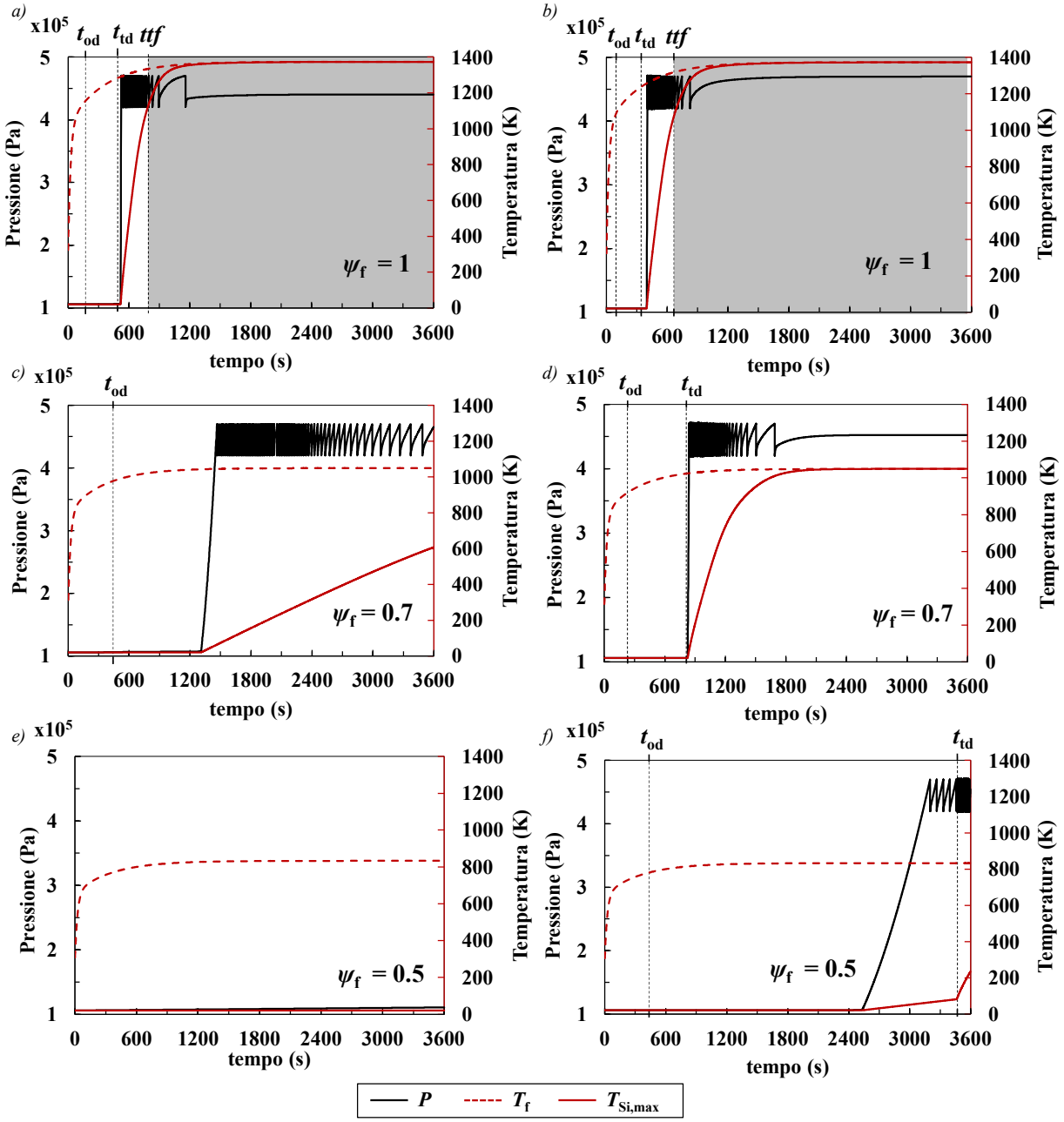


Figura 2. Evoluzione di pressione (curva nera continua), temperatura di fiamma (curva rossa tratteggiata) e temperatura massima del guscio interno (curva rossa continua) per diversi livelli di intensità dell'incendio, ψ_f. Panels a, c, e riportano si riferiscono a MLI a base alluminio; panels b, d , f ad MLI a base poliestere

La Figura 3 riporta l'andamento dei tempi caratteristici (t_{od}, t_{td}, t_{PRV} e t_{tf}) in funzione dell'intensità dell'incendio ψ_f. Per valori elevati ($\psi_f \geq 0{,}9$) la degradazione dell'MLI è rapida e completa, seguita dall'apertura della PRV e dal cedimento del serbatoio. Al diminuire dell'intensità, si osserva un ritardo progressivo dei tempi di degradazione e di apertura della PRV.
Per $\psi_f \leq 0{,}8$ la degradazione totale dell'MLI non implica necessariamente il cedimento del serbatoio entro il tempo di esposizione considerato, evidenziando l'esistenza di una soglia di intensità al di sotto della quale l'integrità strutturale può essere mantenuta. Nei casi intermedi, l'MLI parzialmente degradato è ancora in grado di rallentare la pressurizzazione, consentendo alla PRV di operare senza necessariamente condurre al collasso.

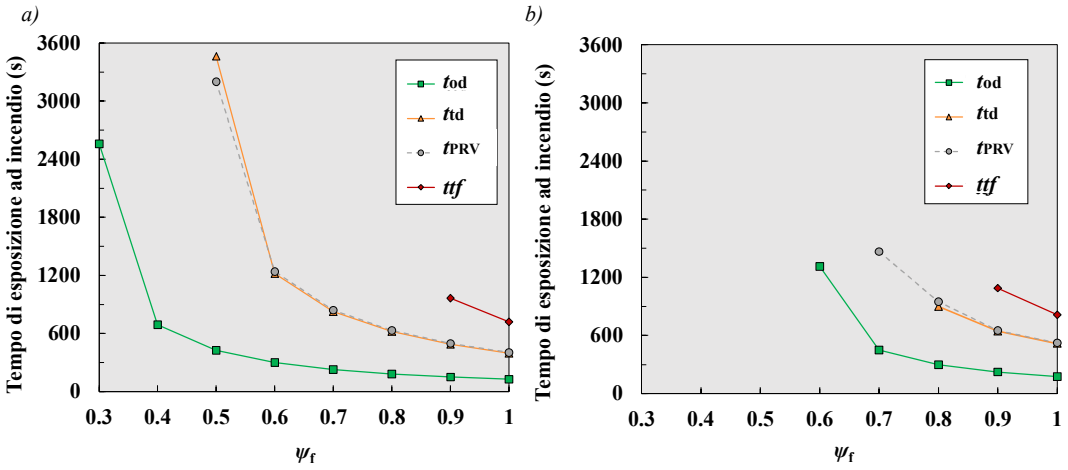


Figura 3. Tempi caratteristici (t_{od}, t_{td}, t_{PRV}, t_{tf}) dello scenario in funzione dell'intensità dell'incendio. Panel a si riferisce ad MLI a base poliestere; panel b a MLI a base alluminio

La Figura 4 analizza l'influenza della temperatura del guscio esterno T_Se sui tempi caratteristici. Per temperature superiori a circa 884 °C il cedimento si verifica in tempi inferiori a 20 minuti, in condizioni compatibili con incendi reali su larga scala. In tali condizioni l'MLI degrada completamente in pochi minuti, lasciando il serbatoio privo di protezione termica.
Al contrario, per temperature inferiori a 535 °C (MLI poliestere) e 820 °C (MLI alluminio) la degradazione è significativamente ritardata, mentre per temperature ancora inferiori la degradazione può essere evitata nell'intervallo temporale considerato. La rappresentazione consente di identificare regioni operative associate a condizioni sicure (S), pericolose (P) e altamente pericolose (PE) o di cedimento (C), fornendo un criterio sintetico per la valutazione della severità dello scenario di incendio e per il confronto tra differenti soluzioni di isolamento.

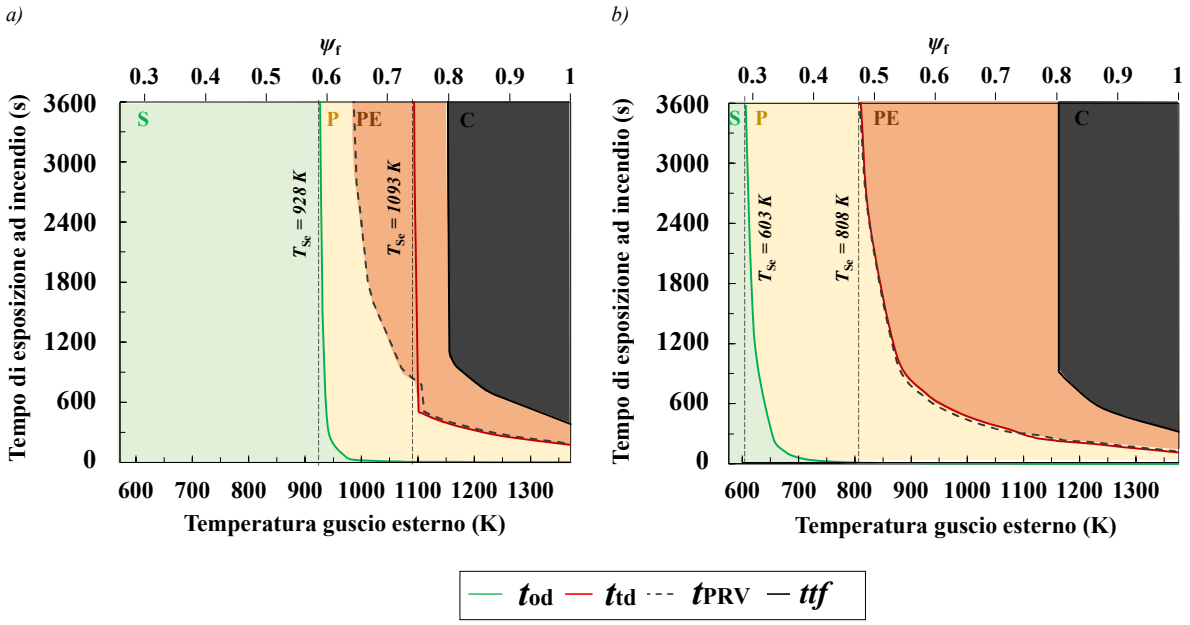


Figura 4. Tempi caratteristici in funzione della temperatura del guscio esterno T_{Se} e e del tempo di esposizione. Panel a si riferisce a MLI a base alluminio; panel b ad MLI a base poliestere

5. Conclusioni

Il presente studio ha sviluppato un approccio integrato per la valutazione della sicurezza di serbatoi criogenici di LH_2 equipaggiati con sistemi MLI in scenari di incendio con avvolgimento completo. L'accoppiamento tra modello di degradazione dell'MLI e modello a parametri concentrati termo-meccanico consente di stimare la pressurizzazione e il tempo al cedimento in funzione dell'intensità dell'incendio.

Per condizioni severe (ψ_f = 1) la degradazione completa dell'MLI è seguita da rapida pressurizzazione e possibile cedimento; per temperature del guscio esterno superiori a circa 884 °C il collasso può avvenire in meno di 20 minuti. In condizioni intermedie (ψ_f = 0.7) il serbatoio sopravvive a 3600 s di esposizione, ma l'MLI a base poliestere risulta completamente degradato in meno di 840 s, mentre quello a base alluminio mantiene uno strato integro, con pressurizzazione più lenta. Per ψ_f = 0.5 l'MLI in alluminio non mostra degradazione apprezzabile.

L'identificazione di regioni di pericolo e di cedimento ottenuta con questo approccio può supportare le fasi preliminari di progettazione nella selezione delle soluzioni più sicure e nell'individuazione di misure di protezione adeguate. I Reference Times definiti forniscono inoltre indicazioni utili per la pianificazione della risposta in emergenza. Nel complesso, il metodo proposto offre strumenti specifici a supporto della progettazione e della risk assessment di serbatoi criogenici per lo stoccaggio di idrogeno liquefatto.

Bibliografia

[1] Cipriani G, Di Dio V, Genduso F, La Cascia D, Liga R, Miceli R, et al. Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications. Int J Hydrogen Energy 2014;39:8482–94. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.174.

[2] Kunze K, Kircher O. Cryo-compressed hydrogen storage cryogenic cluster day. Oxford, Sept 2012;28:2012.

[3] Yin L, Yang H, Ju Y. Review on the key technologies and future development of insulation structure for liquid hydrogen storage tanks. Int J Hydrogen Energy 2024;57:1302–15. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.093.

[4] Edward L, Filip L. Influence of vacuum level on insulation thermal performance for LNG cryogenic road tankers. MATEC Web Conf., vol. 240, EDP Sciences; 2018, p. 1019.

[5] Abbasi T, Abbasi SA. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. J Hazard Mater 2007;141:489–519. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.056.

[6] Zalosh R, Weyandt N. Hydrogen fuel tank fire exposure burst test. SAE Trans 2005:2338–43.

[7] Eberwein R, Hajhariri A, Camplese D, Emrys Scarponi G, Cozzani V, Otremba F. Insulation Materials Used in Tanks for the Storage of Cryogenic Fluids in Fire Scenarios. Vol. 6 Oper. Appl. Components, American Society of Mechanical Engineers; 2023. https://doi.org/10.1115/PVP2023-105201.

[8] Scarponi GE, Landucci G, Ovidi F, Cozzani V. Lumped model for the assessment of the thermal and mechanical response of LNG tanks exposed to fire. Chem Eng Trans 2016;53:307–12. https://doi.org/10.3303/CET1653052.

[9] Camplese D, Scarponi GE, Chianese C, Hajhariri A, Eberwein R, Otremba F, et al. Modeling the performance of multilayer insulation in cryogenic tanks undergoing external fire scenarios. Process Saf Environ Prot 2024;186:1169–82. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.061.

[10] HAJHARIRI A, EBERWEIN R, CAMPLESE D, SCARPONI GE, COZZANI V, OTREMBA F, et al. Non-Combustible MLI Based Insulation Behavior Under Fire Condition - Experimental and Numerical Investigation. Process Saf Environ Prot 2024. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.037.

[11] Camplese D., Scarponi G.E., Eberwein R., Hajhariri A., Otremba F., Cozzani V. Comparative performance assessment of multilayer insulation (MLI) systems for liquid hydrogen vessels in fire scenarios (2025). International Journal of Hydrogen Energy, 135, pp. 537 – 552.

[12] Van Den Bosh, C.J.H., Weterings, R., 2005. TNO Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects, Sdu Uitgevers.

Sviluppo di un modello semplificato per la valutazione del rischio delle attrezzature in pressione

D. Franchi[1], O. Borgia[1], S. Bonvicini[2]

[1]SAIPEX S.r.l.
[2]ALMA MATER STUDIORUM - Università di Bologna – Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

Sommario
Gli obbiettivi del presente elaborato sono definire il livello di rischio associato ad una generica attrezzatura in pressione e proporre un metodo ad indici per quantificare tale livello di rischio, così da consentire la pianificazione delle attività ispettive e manutentive delle attrezzature a partire dal livello di rischio calcolato.
La memoria è organizzata in sezioni secondo la seguente struttura:

- La Sezione 1, di carattere introduttivo, riporta lo scopo dell'elaborato e lo stato dell'arte sui metodi e sugli standard di valutazione del rischio attualmente disponibili in letteratura, evidenziandone i principali limiti, aspetti negativi e positivi.
- La Sezione 2 riporta la proposta di un metodo ad indici per la valutazione del rischio rappresentato dalle attrezzature in pressione, in cui il livello di rischio calcolato viene visualizzato sotto forma di matrice di rischio.
- La Sezione 3 è dedicata alla gestione delle attività di ispezione e manutenzione. In particolare, sono suggerite le frequenze, le tipologie e l'estensione dei controlli non distruttivi da applicarsi alle attrezzature in pressione in funzione del rischio calcolato attraverso il metodo ad indici.
- La Sezione 4 riporta l'applicazione del metodo ad indici a 3 diversi casi di studio e la discussione dei risultati ottenuti nell'ottica di valutare la validità del metodo proposto.
- La Sezione 5 contiene, infine, le considerazioni conclusive ed i possibili miglioramenti da apportare alla metodologia presentata.

1. Introduzione

La rottura catastrofica di una attrezzatura in pressione, così come la perdita di contenimento dei fluidi che contengono, possono provocare gravi incidenti quali nubi tossiche, incendi ed esplosioni.
Per stabilimenti industriali non sottoposti al rischio di incidente rilevante non è attualmente presente una normativa specifica o una linea guida dedicata alla valutazione e gestione del rischio per questa tipologia di asset industriale. L'obiettivo del presente elaborato è pertanto quello di proporre un modello di valutazione sufficientemente semplice ed immediato da trovare ampia applicabilità ma al

contempo stesso il più possibile affidabile e completo in termini di valutazione del rischio stesso.
In particolare, il progetto è stato sviluppato in accordo alle seguenti fasi:

- analisi dello stato dell'arte e delle metodologie già presenti in letteratura;
- individuazione delle variabili e dei criteri per la valutazione del rischio;
- sviluppo del modello del modello matematico basato su indici;
- validazione tramite casi di studio.

Tra le normative a cui un'attrezzatura in pressione può essere soggetta, di seguito ne sono elencate le principali:

1. Decreto Legislativo n. 26 del 15 febbraio 2016 "Attuazione della direttiva 2014/68/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 maggio 2014, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relativa alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione (rifusione)" [1];
2. Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008 "Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro" [2];
3. Decreto Legislativo n. 105 del 26 giugno 2015 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose" [3].

Il Decreto Legislativo n. 26 del 15 febbraio 2016 si applica a tutte le attrezzature che operano ad una pressione relativa maggiore di 0,5 bar e che non siano oggetto di specifiche esclusioni. L'allegato I del decreto definisce i requisiti essenziali di sicurezza a cui le attrezzature in pressione devono rispondere per essere immesse sul mercato, tra i quali è richiesto al fabbricante che nel processo di analisi dei rischi sia valutato il rischio rappresentato dalla pressione.
Il Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008 impone, invece, l'obbligo di valutare i rischi che scaturiscono dall'impiego di attrezzature di lavoro, senza però fare specifico riferimento a quelle in pressione, se non per le verifiche di conformità richieste dall'articolo 71 e riportate nell'allegato VII.
Il Decreto Legislativo n. 105 del 26 giugno 2015 viene, infine, applicato agli stabilimenti a rischio di incidente rilevante (stabilimenti RIR, detti anche stabilimenti Seveso), ovvero a quegli stabilimenti in cui sono presenti sostanze pericolose in quantitativi tali da superare i valori soglia definiti dall'allegato 1 del decreto. In questi stabilimenti possono essere presenti attrezzature in pressione. I gestori degli stabilimenti RIR sono tenuti ad attuare un sistema di gestione della sicurezza (SGS-PIR) che integri tutti gli elementi definiti dall'Allegato B del decreto, tra cui: l'organizzazione e il personale, l'identificazione e la valutazione dei pericoli, il controllo operativo, la progettazione delle modifiche, la pianificazione delle emergenze, il monitoraggio delle prestazioni e, non ultimo, l'audit e il riesame della direzione, con particolare attenzione alla gestione del processo d'invecchiamento delle attrezzature.

Allo scopo di uniformare la valutazione dell'invecchiamento delle attrezzature in pressione presenti negli stabilimenti Seveso, l'INAIL (Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro) ha inoltre pubblicato nel 2021 la seconda edizione della linea guida "Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso" [4]. Questa linea guida prevede l'utilizzo di un metodo ad indici in cui il livello di rischio è funzione della differenza tra effetti acceleranti e frenanti del processo d'invecchiamento.

2. Sviluppo del Metodo ad Indici

All'interno di questa sezione è presentata la proposta di un metodo ad indici per valutare il rischio delle attrezzature in pressione operanti negli ambienti di lavoro. Il metodo si basa sull'assegnazione di punteggi numerici ai diversi fattori di rischio, ossia ai diversi aspetti che possono influenzare il rischio complessivo di un'attrezzatura. Tali fattori vengono suddivisi secondo scenari di gravità crescente, assegnando il massimo punteggio a quello che presenta il più elevato livello di pericolosità.

Innanzitutto, tra le principali metodologie di analisi del rischio delle attrezzature in pressione attualmente disponibili in letteratura tecnica si citano:

1) In primis, lo standard API Recommended Practice 581 [5], che fornisce una metodologia quantitativa per definire un piano di ispezione basato sull'analisi del rischio, da utilizzarsi in impianti chimici o petrolchimici, in raffinerie o in impianti di produzione di gas e idrocarburi.

2) La linea guida "Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso", proposta da INAIL nel 2021, che risponde alla necessità di gestire il rischio associato all'invecchiamento ed alla corrosione delle attrezzature presenti negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante.

3) Nel 2018 è stato inoltre proposto da Muratore et al. un metodo ad indici per la valutazione del rischio delle attrezzature in pressione, che prevede il calcolo di un indice relativo alle gravità e di un indice relativo alle probabilità [6].

4) Anche Baldissone et al. hanno infine presentato nel 2018 un metodo ad indici per la valutazione del rischio delle attrezzature in pressione [7]. In tale metodo l'analisi del rischio viene condotta in maniera semi-quantitativa, valutando l'impatto degli eventi indesiderati sia sulle persone che sui beni materiali.

2.1 Proposta di un Modello ad Indici per la Valutazione del Rischio di attrezzature in pressione

Il metodo ad indici proposto nell'ambito di questa memoria vuole prendere in considerazione tutti i principali fattori di rischio per le attrezzature in pressione, senza però tralasciare il fatto che debba essere applicabile anche in contesti poveri di dati ed informazioni sugli specifici meccanismi di danneggiamento. La metodologia

prevede che l'indice di rischio di un'attrezzatura sia funzione di frequenze e conseguenze degli eventi dannosi. Il suo calcolo avviene tramite l'Equazione 1:

$$I_r = f\,[I_{POF}(t), I_{COF}] \quad (1)$$

In base a quanto riportato dall'Equazione 1, l'indice delle frequenze varia in funzione del tempo. Qualora un'attrezzatura fosse costituita da più camere in pressione, la valutazione del rischio deve essere svolta singolarmente per ognuna delle camere. È inoltre opportuno ovvero possibile effettuare assunzioni conservative nel caso in cui manchino i dati oppure quando risulti particolarmente gravoso reperirli; quando questa situazione si verifica è possibile assegnare agli indici il punteggio più elevato tra quelli proposti. Nel seguito è presentata la procedura per il calcolo degli indici delle frequenze e delle conseguenze.

2.1.1 Indice delle Frequenze

Gli aspetti riguardanti le frequenze di guasto di un'attrezzatura in pressione sono stati considerati funzione dei seguenti fattori: frequenza di guasto standard, fattore dello stato gestionale ed ispettivo e fattore di danno. L'indice delle frequenze è, quindi, espresso dall'Equazione 2:

$$I_{POF}(t) = f\,[I_{fgs} \cdot I_{fd} \cdot I_{sgi}(t)] \quad (2)$$

dove:

- $I_{POF}(t)$, indice delle frequenze;
- I_{fgs}, indice della frequenza di guasto standard;
- I_{fd}, indice del fattore di danno;
- $I_{sgi}(t)$, indice dello stato gestionale ed ispettivo.

L'assegnazione del punteggio all'indice $I_{POF}(t)$ segue, poi, le condizioni riportate in Tabella 1.

Prodotto degli indici I_{fgs}, I_{fd} e I_{sgi}	I_{POF}
$1 \le I_{fgs} \cdot I_{fd} \cdot I_{sgi} \le 6{,}2$	1
$6{,}2 < I_{fgs} \cdot I_{fd} \cdot I_{sgi} \le 11{,}4$	2
$11{,}4 < I_{fgs} \cdot I_{fd} \cdot I_{sgi} \le 16{,}6$	3
$16{,}6 < I_{fgs} \cdot I_{fd} \cdot I_{sgi} \le 21{,}8$	4
$21{,}8 < I_{fgs} \cdot I_{fd} \cdot I_{sgi} \le 27$	5

Tabella 1. Criteri di assegnazione del punteggio all'indice delle frequenze

Per garantire l'applicabilità del metodo anche in contesti con scarsità di dati, è stata adottata una scala di punteggio uniforme 1-3 per i diversi sotto-indici (1 = rischio minimo, 3 = rischio massimo). I pesi, inizialmente considerati come equi-ponderali, sono stati ottimizzati tramite un processo di fine-tuning basato sull'esperienza tecnica e sui casi di studio analizzati.

Le frequenze di guasto standard sono calcolate a partire dagli eventi di guasto registrati dagli stabilimenti di una stessa società o di più società all'interno di un settore industriale, da fonti bibliografiche o da banche dati incidentali [5]. Sono dunque da intendersi come frequenze di guasto generiche, riferite solamente alla tipologia di attrezzatura. La scala di punteggio impiegata per questo indice è quindi riportata nella seguente tabella:

Frequenza di guasto standard (eventi / anno)	I_{fgs}
Frequenza di guasto standard ≤ 10^{-5}	1
10^{-5} < Frequenza di guasto standard < 10^{-3}	2
Frequenza di guasto standard ≥ 10^{-3}	3

Tabella 2. Criteri di assegnazione del punteggio all'indice I_{fgs}

L'indice dello stato gestionale ed ispettivo ha invece lo scopo di adattare le frequenze di guasto standard alle caratteristiche dei sistemi di gestione della sicurezza del processo. In particolare, è calcolato come media pesata di 4 diversi sotto-indici che tengono conto del sistema di gestione delle ispezioni, della formazione dei dipendenti e dello stato delle verifiche periodiche di legge, secondo i criteri riportati nella seguente tabella:

Sotto-indice	Descrizione scala (1-3)	Derivazione	Peso (ω)
Sistema di gestione delle ispezioni	Secondo metodologie presenti in letteratura = 1; Secondo il manuale di Uso e Manutenzione = 2; Secondo obblighi di legge = 3	Linea guida INAIL invecchiamento attrezzature (semplificata)	0,6
Verifiche di funzionamento	Attrezzatura non soggetta a verifiche o per la quale sia trascorso meno del 50% del tempo previsto per la successiva verifica = 1; Attrezzatura per la quale sia trascorso un tempo compreso tra il 50% e l'80% di quello previsto per la successiva verifica = 2; Attrezzatura per la quale sia trascorso più dell'80% del tempo previsto per la successiva verifica = 3	D. Lgs. 81/2008	0,15
Verifiche di integrità	Attrezzatura non soggetta a verifiche o per la quale sia trascorso meno del 50% del tempo previsto per la successiva verifica = 1; Attrezzatura per la quale sia trascorso un tempo compreso tra il 50% e l'80% di quello previsto per la successiva verifica = 2; Attrezzatura per la quale sia trascorso più dell'80% del tempo previsto per la successiva verifica = 3	D. Lgs. 81/2008	0,15
Formazione dei dipendenti	Ottima / Specifica = 1; Buona / Generale = 2; Secondo obblighi di legge = 3	Autonoma	0,10

Tabella 3. Criteri di assegnazione del punteggio all'indice dello stato gestionale ed ispettivo

Infine, il fattore di danno è calcolato come media pesata di 9 diversi sotto-indici che tengono conto dei principali fattori che possono accelerare/rallentare il processo di danneggiamento dell'attrezzatura, secondo i criteri riportati nella seguente tabella:

Sotto-indice	Descrizione scala (1-3)	Derivazione	Peso (ω)
Compatibilità Materiale / Fluido	Nessun meccanismo di danno significativo = 1; Corrosione generalizzata = 2; Corrosione localizzata = 3	API 581: 2025 (semplificato)	0,200
Modalità di lavoro	Discontinuo = 1; Semi-continuo = 2; Continuo = 3	Autonoma	0,175
Velocità di danneggiamento	Avanzamento del danno con una scala temporale maggiore di 10 anni = 1; Avanzamento del danno con una scala temporale compresa tra 5 e 10 anni = 2; Avanzamento del danno con una scala temporale minore di 5 anni = 3	Linea guida INAIL invecchiamento attrezzature (semplificata)	0,150
Agenti atmosferici	Attrezzatura all'interno di locali tecnici = 1; Attrezzatura situata all'esterno, ma lontano da zone costiere/industriali = 2; Attrezzatura situata all'esterno, vicino a zone costiere/industriali = 3	Autonoma, in base alle indicazioni dello standard API 581: 2025	0,100
Sistemi di Protezione	Attrezzatura autoprotetta = 1; Sistemi protettivi installati sull'attrezzatura = 2; Sistemi protettivi installati nell'impianto = 3	Baldissone et al. [7] (semplificato)	0,100
Rilevabilità dei danneggiamenti	Rilevazione facile: accesso totale all'attrezzatura = 1; Rilevazione difficile: accesso parziale = 2; Massima difficoltà di rilevamento: presenza di spazi confinati, attrezzature interrate o sopraelevate = 3	Autonoma, in base alle indicazioni dell'articolo di Muratore et al. [6]	0,075
Temperatura operativa	Rapporto $T_{Operativa}$ / $T_{s,max}$ < 0,7 = 1; 0,7 ≤ Rapporto $T_{Operativa}$ / $T_{s,max}$ ≤ 0,89 = 2; Rapporto $T_{Operativa}$ / $T_{s,max}$ > 0,89 = 3	API 581: 2000 (semplificato)	0,075
Pressione operativa	Rapporto $P_{Operativa}$ / $P_{s,max}$ < 0,7 = 1; 0,7 ≤ Rapporto $P_{Operativa}$ / $P_{s,max}$ ≤ 0,89 = 2; Rapporto $P_{Operativa}$ / $P_{s,max}$ > 0,89 = 3	API 581: 2000 (semplificato)	0,075
Coibentazione / Verniciatura	Attrezzatura non coibentata, ma verniciata = 1; Attrezzatura non coibentata e non verniciata = 2; Attrezzatura coibentata = 3	Autonoma, in base alle indicazioni dello standard API 581: 2025	0,050

Tabella 4. Criteri di assegnazione del punteggio all'indice del fattore di danno

2.1.2 Indice delle Conseguenze

Anche l'indice delle conseguenze provocate da un guasto dell'attrezzatura è funzione di più fattori: il fattore della tipologia di fluido ed il fattore della tipologia di

attrezzatura e di sistemi mitigativi. L'indice delle conseguenze è quindi calcolato in accordo all'Equazione 3:

$$I_{COF} = f(I_f \cdot I_{at}) \quad (3)$$

dove:

- I_{COF}, indice delle conseguenze;
- I_f, indice della tipologia di fluido;
- I_{at}, indice della tipologia di attrezzatura e di sistemi mitigativi.

Il punteggio dell'indice delle conseguenze segue, poi, i criteri riportati in Tabella 2.

Prodotto degli indici I_f e I_{at}	I_{COF}
$1 < I_f \cdot I_{at} \leq 2,6$	1
$2,6 < I_f \cdot I_{at} \leq 4,2$	2
$4,2 < I_f \cdot I_{at} \leq 5,8$	3
$5,8 < I_f \cdot I_{at} \leq 7,4$	4
$7,4 < I_f \cdot I_{at} \leq 9$	5

Tabella 5. Criteri di assegnazione del punteggio all'indice delle conseguenze

Il fattore della tipologia di fluido prende in considerazione le caratteristiche chimico-fisiche e di pericolosità della sostanza contenuta all'interno dell'attrezzatura in pressione ed è calcolato come media pesata di 6 diversi sotto-indici, secondo i criteri riportati nella tabella seguente:

Sotto-indice	Descrizione scala (1-3)	Derivazione	Peso (ω)
Livello di tossicità	Grado del rischio per la salute, secondo lo standard NFPA 704, pari a 0 o ad 1 = 1; Grado del rischio per la salute, secondo lo standard NFPA 704, pari a 2 = 2; Grado del rischio per la salute, secondo lo standard NFPA 704, pari a 3 o a 4 = 3	NFPA 704: 2022 [8]	0,275
Livello di infiammabilità	Grado del rischio d'infiammabilità, secondo lo standard NFPA 704, pari a 0 o ad 1 = 1; Grado di rischio d'infiammabilità, secondo lo standard NFPA 704, pari a 2 = 2; Grado del rischio d'infiammabilità, secondo lo standard NFPA 704, pari a 3 o a 4 = 3	NFPA 704: 2022 [8]	0,275
Instabilità del fluido	Grado del rischio d'instabilità, secondo lo standard NFPA 704, pari a 0 o ad 1 = 1; Grado del rischio d'instabilità, secondo lo standard NFPA 704, pari a 2 = 2; Grado del rischio d'instabilità, secondo lo standard NFPA 704, pari a 3 o a 4 = 3	NFPA 704: 2022 [8]	0,050
Fase del fluido	Il fluido fuoriuscito, in caso di perdite di contenimento, è allo stato liquido = 1; Il fluido fuoriuscito, in caso di perdite di contenimento, è allo stato gassoso = 3	Autonoma	0,350

Sotto-indice	Descrizione scala (1-3)	Derivazione	Peso (ω)
Fattore di dispersione	Sostanza non pericolosa oppure sostanza pericolosa con temperatura di ebollizione normale > 93 °C = 1; 27 °C ≤ Sostanza pericolosa con temperatura di ebollizione normale ≤ 93 °C = 2; Sostanza pericolosa con temperatura di ebollizione normale < 27 °C	API 581: 2000 (semplificato)	0,025
Livello di tossicità per l'ambiente	Nullo: i fluidi rilasciati non comportano danni all'ambiente acquatico = 1; Medio: i fluidi rilasciati nell'ambiente possono essere tossici o nocivi per gli organismi acquatici = 2; Critico: i fluidi rilasciati nell'ambiente possono essere molto tossici per gli organismi acquatici = 3	Autonoma	0,025

Tabella 6. Criteri di assegnazione del punteggio all'indice della tipologia di fluido

Il fattore della tipologia di attrezzatura e di sistemi mitigativi considera, invece, le principali caratteristiche costruttive dell'attrezzatura ed i sistemi di mitigazione disponibili, al fine di ridurre le gravità delle conseguenze derivanti dal guasto di un componente. I criteri impiegati per i 5 sotto-indici introdotti sono riportati nella seguente tabella:

Sotto-indice	Descrizione scala (1-3)	Derivazione	Peso (ω)
Categoria dell'attrezzatura	Attrezzatura in Categoria I = 1; Attrezzatura in Categoria II = 2; Attrezzatura in Categoria III o IV = 3	D. Lgs. 26/2016	0,65
Complessità dell'attrezzatura	Volume < 1 m^3 o DN < 80 = 1; 1 m^3 ≤ Volume ≤ 10 m^3 o 80 ≤ DN ≤ 800 = 2; Volume > 10 m^3 o DN > 800 = 3	API 581: 2000 (semplificato) + esclusioni DM 329/2004 [9]	0,10
Sistemi di isolamento	Assenza di sostanze pericolose o presenza di sistemi d'isolamento attivati direttamente dalla strumentazione di processo o dai rilevatori = 1; Sistemi d'isolamento attivati da operatori in sala controllo = 2; Sistemi d'isolamento attivati da valvole manuali = 3	API 581: 2025 (semplificato)	0,10
Sistemi di rilevamento	Assenza di sostanze pericolose o presenza di strumentazione specifica per la rilevazione di perdite = 1; Presenza di rivelatori di fiamma e/o di gas tossici = 2; Presenza di telecamere per la rilevazione visiva delle perdite = 3	API 581: 2025 (semplificato)	0,10
Conseguenze sulla produzione	Nessun impatto = 1; Riparazione dell'attrezzatura che potrebbe comportare il fermo dell'unità operativa = 2; Riparazione dell'attrezzatura che potrebbe comportare il fermo dell'impianto = 3	Baldissone et al. [7] (semplificato)	0,05

Tabella 7. Criteri di assegnazione del punteggio all'indice della tipologia di attrezzatura

2.1.3 Ricomposizione del rischio

Una volta stimati l'indice delle frequenze e l'indice delle conseguenze, è dunque possibile calcolare il livello di rischio come funzione dei due indici. In particolare, si propone la sua rappresentazione all'interno di una matrice di rischio, avente come ascissa l'indice delle conseguenze e come ordinata l'indice delle frequenze. In figura 1 è riportata la matrice proposta per la rappresentazione dei risultati ottenuti.

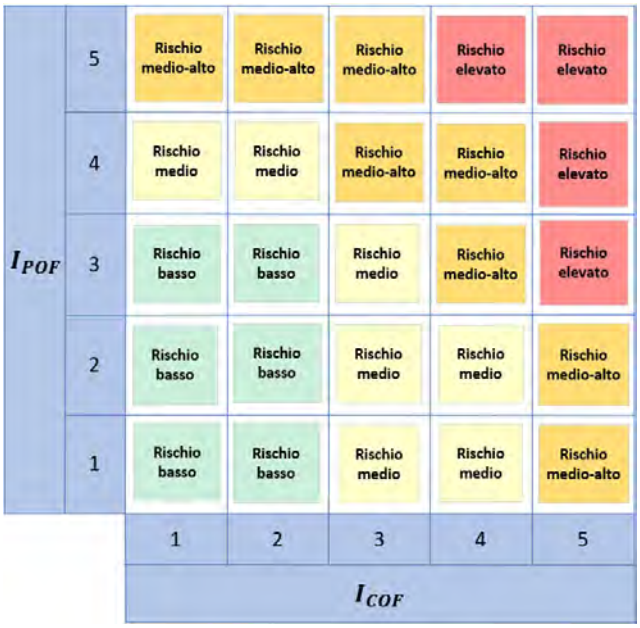


Figura 1. Matrice di rischio del metodo ad indici

Come si evince dalla Figura 1, il rischio è suddiviso in 4 livelli: alto, medio-alto, medio e basso. Ai fini della valutazione dell'accettabilità del rischio, quest'ultimo deve essere calcolato, conservativamente, subito prima delle attività di ispezione e manutenzione, individuando sul valore di rischio così ottenuto la necessità di azione correttive. In primis, un rischio di livello basso è da considerarsi pienamente accettabile. Nel caso in cui ci si ritrovi in una zona di rischio alto, il rischio è invece considerato inaccettabile e sono da identificare le azioni correttive da mettere subito in atto per ridurlo. Anche un rischio di livello medio-alto è da considerarsi inaccettabile, ma le azioni correttive sono implementabili nel medio-lungo termine. Infine, un rischio medio è considerato tollerabile se la riduzione del rischio è impraticabile o se un'analisi costi-benefici dimostra che sono maggiori i costi da intraprendere rispetto ai benefici conseguibili; in caso contrario, sono da monitorare le condizioni di funzionamento dell'attrezzatura e sono da individuare possibili azioni correttive da attuare nel medio-lungo termine.

2.1.4 Punti di forza del nuovo metodo ad indici

Le metodologie di analisi del rischio richiamate nella sezione 2 presentano diversi limiti di applicazione, tra i quali si evidenzia la difficoltà nel reperire alcuni dati legati al funzionamento dell'attrezzatura e la mancanza di una valutazione completa di tutti

gli aspetti che possono influenzarne il livello di rischio. Il metodo ad indici proposto tenta di colmare queste lacune, in parte selezionando gli aspetti positivi dei metodi già presenti in letteratura ed in parte introducendo nuovi criteri di valutazione. Il presente metodo ad indici permette, infatti, una valutazione rapida e sintetica del livello di rischio delle attrezzature in pressione, senza che si entri nel merito degli specifici meccanismi di danno presenti o dei singoli aspetti relativi al sistema di gestione dell'impianto, la cui valutazione è invece richiesta dallo standard API 581 [5]. Un altro vantaggio del nuovo metodo ad indici rispetto alla metodologia prevista dallo standard API 581 è la possibilità di scegliere la fonte di dati per la stima delle frequenze di guasto standard. Un ulteriore punto di forza del nuovo metodo ad indici risiede nell'attribuzione di punteggi uniformi a tutti gli indici introdotti, a differenza dei metodi proposti da Baldissone et al., 2018 [6] e da Muratore et al., 2018 [7] in cui per diversi indici erano previste scale di punteggio differenti. Infine, nel presente metodo ad indici sono stati introdotti dei pesi da attribuire ai diversi indici in modo da poter effettuare una valutazione del rischio che tenga conto del differente impatto dei fattori di rischio.

3. La gestione delle ispezioni basata sui risultati del metodo ad indici

Nella presente proposta di sistema di gestione delle ispezioni, la periodicità massima delle attività di ispezione e manutenzione per le attrezzature in pressione è stabilita in funzione del valore dell'indice delle conseguenze I_{COF}. Tale scelta deriva dalla considerazione che, per attrezzature in pressione caratterizzate da elevate conseguenze in caso di guasto, risulta opportuno ridurre la periodicità con la quale si effettuano i controlli ispettivi e manutentivi, al fine di limitare la possibilità che si verifichi un incidente. Nello specifico, la periodicità massima delle attività ispettive e manutentive segue i criteri riportati in Tabella 3.

I_{COF}	Periodicità massima delle attività di ispezione e manutenzione
1	10 anni (periodicità delle verifiche periodiche d'integrità)
2	80% rispetto ai 10 anni = 8 anni
3	60% rispetto ai 10 anni = 6 anni
4	40% rispetto ai 10 anni = 4 anni
5	20% rispetto ai 10 anni = 2 anni

Tabella 8. Criteri per stabilire le periodicità massime delle attività di ispezione e manutenzione

In base alla Tabella 3, le periodicità massime delle attività di ispezione e manutenzione sono definite come frazioni percentuali della periodicità con cui si svolgono le verifiche d'integrità, pari a 10 anni secondo quanto riportato dal D.M. 329/2004 [9]. La periodicità massima delle attività ispettive e manutentive diminuisce all'aumentare del valore assunto dall'indice delle conseguenze I_{COF}.
Per l'estensione minima dei controlli, si è invece proposto un criterio di valutazione che è funzione del valore dell'indice delle frequenze I_{POF}. Tale scelta deriva dalla considerazione che, per attrezzature in pressione caratterizzate da un'elevata

frequenza di guasto, risulta opportuno incrementare l'estensione dei controlli, allo scopo di innalzare il livello di conoscenza dello stato dell'attrezzatura. L'estensione minima dei controlli segue quindi i criteri riportati in Tabella 4.

I_{POF}	Estensione minima dei controlli di screening (S_{min})	Estensione minima dei controlli di dettaglio (D_{min})
1	15%	5%
2	30%	10%
3	45%	15%
4	50%	20%
5	60%	25%

Tabella 9. Criteri per stabilire l'estensione minima dei controlli di screening e di dettaglio

I criteri utilizzati in Tabella 4 fanno parziale riferimento alle indicazioni della norma UNI 11325-7 [10]. In particolare, i criteri di suddivisione dell'estensione minima dei controlli sono stati qui adattati alla scala di punteggio prevista per l'indice I_{POF}. I valori proposti per le estensioni minime dei controlli rientrano anche all'interno dei limiti definiti dalle norme UNI 13480-5 [11] e UNI 13445-5 [12]. Detto ciò, l'estensione minima dei controlli di screening e di dettaglio aumenta all'aumentare dell'indice delle frequenze di guasto I_{POF}.

4. Applicazione del metodo ad indici ad alcuni casi di studio

Il metodo ad indici proposto nella Sezione 2 è stato applicato a 3 diversi casi di studio (denominati A, B e C) ed i risultati ottenuti sono stati poi utilizzati per discutere la validità del metodo stesso. Ai casi di studio si sono inoltre applicati i criteri di gestione delle ispezioni (presentati nella Sezione 3).

Il metodo ad indici considera il rischio variabile in funzione del tempo, a causa della variazione nel tempo dell'indice delle frequenze (I_{POF}), a sua volta dovuto alla variazione nel tempo degli indici relativi alle verifiche periodiche di funzionamento e di integrità. Per questa ragione, il rischio delle attrezzature è stato calcolato sia subito prima che subito dopo le attività di ispezione e manutenzione.

Il caso di studio A riguarda l'applicazione del metodo ad indici ad un generatore di vapore, che alimenta le utenze di uno stabilimento con un ciclo di produzione continuo. Il generatore di vapore è costituito da 1 sola camera in pressione ovvero dal circuito lato vapore del generatore, che è del tipo a serpentino monotubolare a 3 giri di fumo e presenta un bruciatore alimentato con gas naturale e con aria.

Il caso di studio B riguarda l'applicazione del metodo ad indici ad un insieme in pressione che fa parte un impianto di refrigerazione che ha lo scopo di raffreddare il glicole etilenico destinato alle utenze di uno stabilimento. L'insieme è composto da 63 attrezzature, corrispondenti a 95 camere in pressione, che hanno lo scopo di far condensare ed evaporare ciclicamente il fluido refrigerante (ammoniaca).

Il caso di studio C riguarda l'applicazione del metodo ad indici ad un insieme ad idrogeno, composto da attrezzature destinate alla ricezione, allo stoccaggio ed al

trasferimento del fluido ad una turbina situata su un banco di prova. L'insieme ad idrogeno è composto da 127 camere in pressione, corrispondenti a 125 attrezzature. In Figura 2 sono mostrati i livelli di rischio delle camere in pressione dei casi di studio A, B e C subito dopo le attività di ispezione e manutenzione, mentre in Figura 3 sono riportati quelli subito prima delle attività di ispezione e manutenzione.

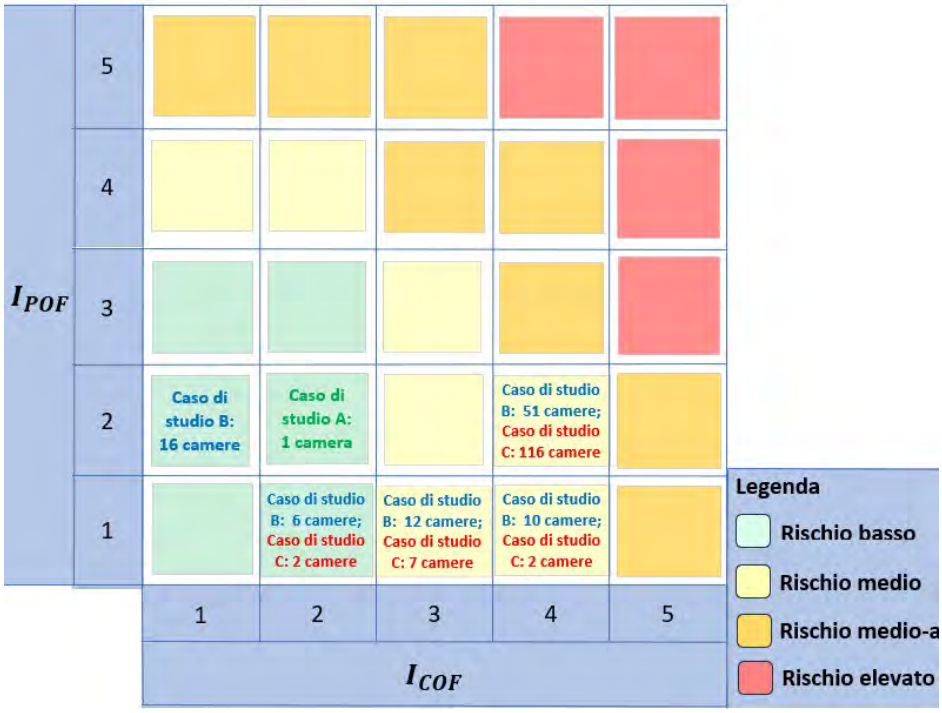


Figura 2. Rappresentazione in forma matriciale dei livelli di rischio ottenuti per le camere in pressione dei casi di studio A, B e C subito dopo le attività di ispezione e manutenzione

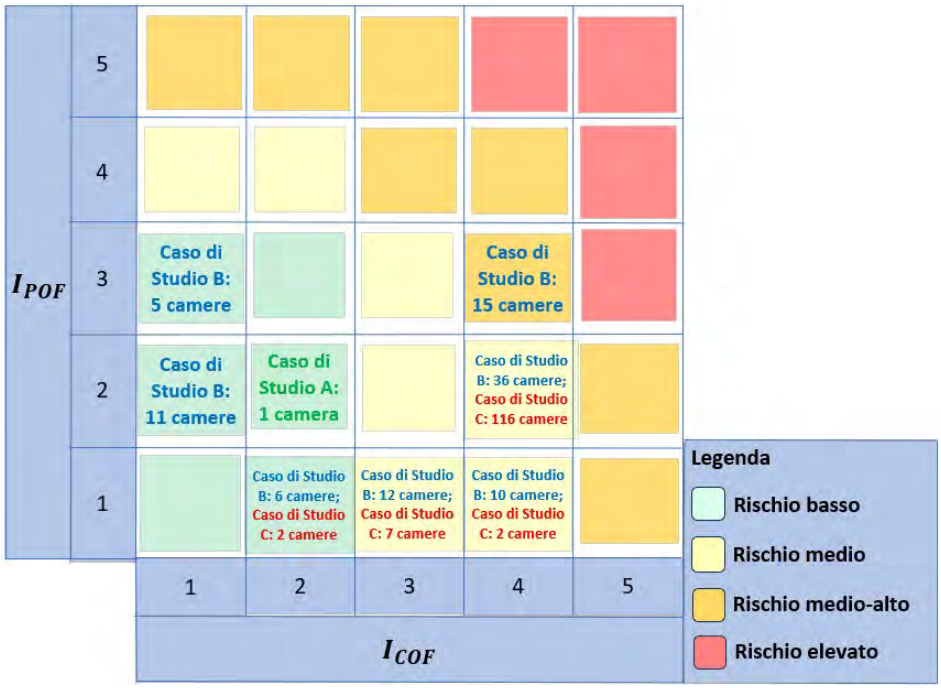


Figura 3. Rappresentazione in forma matriciale dei livelli di rischio ottenuti per le camere in pressione dei casi di studio A, B e C subito prima delle attività di ispezione e manutenzione

I casi di studio B e C presentano livelli di rischio generalmente più elevati rispetto al caso A, soprattutto in termini di conseguenze da guasto, a causa dell'impiego di sostanze pericolose. In particolare, il caso C utilizza idrogeno, altamente infiammabile, mentre il caso B impiega ammoniaca, sostanza tossica ed eco-tossica. I livelli di rischio più bassi sono associati a tubazioni di prima categoria o a circuiti con fluidi non pericolosi. I livelli di rischio più elevati dipendono invece dall'alta categoria di rischio delle attrezzature, dalle modalità operative, dalla presenza di coibentazione e dal posizionamento dei sistemi di protezione. Nel complesso, i risultati confermano la validità e la coerenza della metodologia proposta, sulla base della quale sono stati definiti i piani ispettivi riportati in Tabella 5.

Caso di studio	Camere con livello di rischio	Estensione minima dei controlli di screening (S_{min})	Estensione minima dei controlli di dettaglio (D_{min})	Periodicità massima delle attività di ispezione e manutenzione
A	Basso 2-2	30%	10%	8 anni
B	Basso 1-2	15%	5%	8 anni
	Basso 2-1	30%	10%	10 anni
	Basso 3-1	45%	15%	10 anni
	Medio 1-3	15%	5%	6 anni
	Medio 1-4	15%	5%	4 anni
	Medio 2-4	30%	10%	4 anni
	Medio-alto 3-4	45%	15%	4 anni
C	Basso 1-2	15%	5%	8 anni
	Medio 1-3	15%	5%	6 anni
	Medio 1-4	15%	5%	4 anni
	Medio 2-4	30%	10%	4 anni

Tabella 10. Piani ispettivi risultanti dai livelli di rischio calcolati per i casi di studio A, B e C

5. Conclusioni

In questa memoria si è voluto proporre una metodologia per valutare il rischio di una generica attrezzatura in pressione, in funzione del quale si è poi stabilito un criterio per definire un piano ispettivo adeguato a prevenire l'incremento del rischio nel tempo. In particolare, il metodo ad indici prevede, per ognuna delle camere in pressione, che siano calcolati l'andamento nel tempo della frequenza di guasto e le conseguenze derivanti da un guasto della camera, attraverso l'assegnazione di punteggi numerici ad un insieme di indici, ciascuno relativo ad un fattore di rischio. L'applicazione del metodo ad alcuni casi di studio ha confermato come il rischio calcolato possa variare nel tempo, diminuendo dopo le attività ispettive. I risultati ottenuti hanno evidenziato come i livelli di rischio più elevati siano associati alle camere in pressione caratterizzate da un'elevata suscettibilità al danneggiamento, da un'elevata categoria di rischio e contenenti fluidi di elevata pericolosità. La metodologia proposta ha dunque prodotto in prima analisi risultati coerenti con il reale rischio rappresentato dalle camere in pressione, consentendo al contempo di considerare la molteplicità dei fattori che influenzano tale livello di rischio. Il metodo

ad indici presentato può infatti essere un valido strumento per ottenere una prima stima del livello di rischio delle camere in pressione, nonché per una definizione di massima del piano ispettivo da adottare per gestirne l'invecchiamento.
Nonostante il metodo ad indici proposto abbia dimostrato coerenza nei risultati ottenuti durante la sua applicazione, un possibile sviluppo futuro della metodologia presentata potrebbe riguardare la ricomposizione del rischio delle camere facenti parte di una stessa attrezzatura, così da quantificare il rischio dell'attrezzatura; nonché la ricomposizione del rischio delle attrezzature di un insieme in pressione, così da quantificare il rischio dell'insieme. Nel metodo ad indici proposto non sono inoltre considerati gli effetti domino, per cui lo scoppio di una camera potrebbe danneggiare camere ed attrezzature contigue, aggravando l'incidente. Oltre a ciò, nella presente metodologia, il pericolo derivante dalla pressione è considerato solamente all'interno del fattore relativo alla categoria di rischio dell'attrezzatura, ma più è alta la pressione in temini assoluti maggiore è la forza spingente in caso di foro e maggiore è l'energia meccanica liberata in caso di scoppio. Per questo, potrebbe essere introdotto un fattore di rischio che tenga conto esclusivamente del pericolo legato alla pressione.
Infine, l'affidabilità del metodo potrà essere ulteriormente incrementata attraverso un progressivo fine-tuning dei pesi associati ai diversi indici, reso possibile dall'applicazione dello strumento a un numero sempre maggiore e più diversificato di casistiche. Un utilizzo esteso del metodo consentirà infatti di calibrare i pesi sulla base dell'esperienza maturata, migliorandone la robustezza e l'attendibilità anche in contesti differenti da quelli inizialmente considerati.

Bibliografia

[1] Decreto Legislativo n. 26 del 15 febbraio 2016: Attuazione della direttiva 2014/68/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 maggio 2014, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relativa alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione (rifusione)

[2] Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008: Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro

[3] Decreto Legislativo n. 105 del 26 giugno 2015: Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose

[4] INAIL, 2021 Valutazione sintetica dell'adeguatezza del programma di gestione dell'invecchiamento delle attrezzature negli stabilimenti Seveso. Linea guida

[5] Risk-Based Inspection Methodology API Recommended Practice 581, 4rd ed., American Petroleum Institute, Washington, API 2025, USA

[6] Muratore A., Nastasi V., Di Rocco F., 2018, Metodo ad indici per la valutazione dei rischi in fase di esercizio delle attrezzature e/o insiemi a pressione, INAIL - Uot di Piacenza, Palermo e Verona

[7] Baldissone G., Demichela M., 2018, Proposta metodologica per la valutazione dei rischi per gli assiemi PED. Esplicitazione del fattore umano, Politecnico di Torino, DISAT
[8] NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response, National Fire Protection Association, USA
[9] Decreto Ministeriale n. 329 dell'1 dicembre 2004: Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93
[10] UNI 11325-7: Attrezzature a pressione – Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione – Parte 7: Valutazione dello stato di conservazione delle tubazioni in esercizio ai fini della verifica periodica d'integrità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 2023
[11] Linea guida UNI EN 13480-5: Tubazioni industriali metalliche - Parte 5: Collaudo e prove, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 2022
[12] Linea guida UNI EN 13445-5: Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 5: Controlli e prove, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 2021

Le opportunità di sviluppo e il rischio pressione per le stazioni di rifornimento a idrogeno

A. Muratore[1], G. Grillone[2], A. Tonti[3], G. Giannelli[1], V. Nastasi[2]

[1]Inail - UOT di Como
[2]Inail - UOT di Palermo
[3]Inail - Dit

Sommario
Lo sviluppo delle stazioni di rifornimento a idrogeno (Hydrogen Refueling Stations, HRS) sta accelerando a livello globale, trainato dall'obiettivo di passare da fonti energetiche inquinanti ed esauribili a nuove fonti rinnovabili. A fine 2024, nel mondo erano operative oltre 1.160 HRS, con l'Asia in posizione dominante (circa 65% del totale) grazie a Cina, Giappone e Corea del Sud, seguita da Europa e Nord America. In Europa, il numero di impianti ha raggiunto le 294 unità, con Germania e Francia come Paesi leader, sostenuti da strategie nazionali e piani infrastrutturali coordinati. L'Italia, invece, presenta una rete ancora embrionale, con sole tre stazioni operative (Bolzano, Mestre e Carugate) ad oggi e progetti di espansione legati al PNRR, che prevedono circa 40 nuovi impianti entro il 2026. L'attuale divario con i Paesi leader è attribuibile a ritardi normativi, limitata domanda di veicoli a idrogeno e complessità autorizzative. Tuttavia, l'integrazione delle HRS nella rete stradale e il sostegno degli investimenti europei potrebbero favorire un rapido recupero, trasformando l'attuale divario in un'opportunità di sviluppo.
L'articolo si pone il duplice obbiettivo di rappresentare i dati dello sviluppo di tale tecnologia in Italia confrontandoli con il resto del mondo e al tempo stesso di mettere in evidenza la gestione del rischio pressione delle attrezzature/insiemi contenenti idrogeno presenti nelle HRS alla luce della legislazione europea ed italiana. Il tutto al fine di evitare incidenti, con possibili conseguenze per la sicurezza, la salute umana, l'operatività degli impianti.

1. Proprietà fisico-chimiche dell'idrogeno ai fini della sicurezza e della salute

Dal punto di vista della sicurezza, l'idrogeno non è né più né meno pericoloso di altri gas, ma è diverso. Tale differenza risiede nelle sue specifiche proprietà fisico-chimiche. Ai fini della progettazione, costruzione e utilizzo in sicurezza dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno (fissi o trasportabili), tenendo conto del rischio pressione, è necessario considerare le principali caratteristiche fisico-chimiche riportate di seguito.

1. L'idrogeno è un gas incolore e inodore, non percepibile dai sensi umani, classificato come "estremamente infiammabile" dalla normativa sulle sostanze pericolose. È in grado di formare miscele potenzialmente esplosive con l'aria.

Purtroppo, composti quali i mercaptani (normalmente utilizzati come odorizzanti per individuare perdite di gas naturale) non possono essere aggiunti ai sistemi a idrogeno, in quanto contaminerebbero le celle a combustibile. L'idrogeno non è né tossico né nocivo e non ha effetti fisiologici; tuttavia, se inalato ad alte concentrazioni, può causare asfissia per sostituzione dell'ossigeno presente nell'aria.

2. È il gas con la molecola più piccola e più leggera (densità: 84 g/m³ a 15 °C e 1 bar); si muove molto rapidamente verso l'alto ed è in grado di penetrare materiali normalmente impermeabili ai gas. L'idrogeno è inoltre molto leggero anche allo stato liquido (densità: 70 g/L a −253 °C e 1 bar); evapora rapidamente e forma circa 845 litri di gas per ogni litro di liquido. Il gas appena evaporato, freddo, ha una densità simile a quella dell'aria e tende a diffondersi orizzontalmente; tuttavia, all'aumentare della temperatura, la sua densità diminuisce e il gas si muove verso l'alto.

3. L'infiammabilità rappresenta la più importante proprietà chimica dell'idrogeno. L'idrogeno reagisce con tutti gli agenti ossidanti, quali ossigeno, cloro, protossido di azoto, ecc., e in tutti i casi le reazioni sono accompagnate da un elevato sviluppo di calore. In presenza di una sorgente di innesco, le reazioni possono diventare esplosive, soprattutto se avvengono in ambienti confinati. L'energia minima di innesco dell'idrogeno in aria è molto bassa (MIE = 0,019 mJ), pari a circa 1/10 di quella necessaria per il GPL (Gas di Petrolio Liquefatti); è, ad esempio, equivalente a quella di una scintilla generata dall'impatto contro un oggetto di una particella di polvere trasportata dallo stesso idrogeno. La fiamma dell'idrogeno è molto calda e pallida e, alla luce del giorno, può non essere visibile. Di conseguenza, il calore non viene percepito fisicamente fino al contatto diretto con la fiamma. Un incendio di idrogeno può quindi passare inosservato e propagarsi anche in presenza di un monitoraggio diretto da parte delle persone presenti nelle aree in cui possono verificarsi perdite di idrogeno. I limiti di infiammabilità in aria sono compresi tra il 4,0% e il 75,6% in volume. All'interno di tale intervallo, l'idrogeno presenta un campo di detonazione in aria più ampio rispetto ad altri combustibili, compreso tra il 18% e il 59% in volume. La temperatura di autoaccensione dell'idrogeno è superiore a 510 °C.

4. L'idrogeno è generalmente un gas non corrosivo. Tuttavia, alcuni materiali metallici, quando entrano in contatto con l'idrogeno in determinate condizioni, possono essere soggetti a fenomeni di infragilimento e/o corrosione sotto sforzo. In entrambi i casi, l'effetto è una riduzione della duttilità e della resistenza a trazione del materiale. I fattori da considerare sono i seguenti: – temperatura, pressione e contaminanti dell'idrogeno; – tipologia del materiale metallico e sua struttura (discontinuità, porosità, ecc.); – distribuzione degli sforzi nel materiale.

Per tali ragioni, gli acciai per idrogeno compresso sono realizzati con leghe speciali (HY Responders, 2023, [3]).

2. Situazione Globale delle Stazioni di Rifornimento di Idrogeno

Alla fine del 2024, risultano circa 1.160 stazioni H_2 operative nel mondo secondo il database annuale di H2stations.org, con un forte incremento rispetto agli anni precedenti. Queste infrastrutture sono distribuite in circa 45 Paesi, ma la rete rimane molto concentrata in poche nazioni: Cina, Corea del Sud, Giappone, Germania e Francia insieme rappresentano circa oltre il 75–80% delle stazioni esistenti.

Distribuzione regionale:

- **Asia**: circa 748 stazioni, con la Cina che guida con circa 384 stazioni, seguita da Corea del Sud (~198) e Giappone (~161).
- **Europa**: circa 294 stazioni operative, con la Germania (circa 113) e la Francia (circa 65) come principali mercati europei.
- **Nord America**: circa 89 stazioni negli Stati Uniti e 12 in Canada (dati variabili per chiusure e aperture nel 2024).

In **Italia** le stazioni di rifornimento di idrogeno operative al pubblico sono attualmente molto poche: solo 3 stazioni aperte al pubblico sono operative sul territorio italiano (es. Bolzano, Mestre e Carugate), vedi Tab. 1.

Storicamente, fino a poco tempo fa erano due stazioni operative (Bolzano e Mestre) prima dell'apertura di Carugate. Il numero globale di stazioni cresce di anno in anno, ma resta ancora basso rispetto alla diffusione dei veicoli convenzionali o delle infrastrutture di ricarica elettrica. Grazie a progetti finanziati dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) e normative comunitarie, sono stati approvati circa 36 nuovi progetti di stazioni H_2, che dovrebbero portare a circa 40 stazioni entro il 2026. Secondo gli obiettivi di regolamenti europei AFIR, per soddisfare i target di infrastrutture alternative al 2030, l'Italia dovrà più che raddoppiare le sue stazioni di idrogeno oltre a quelle attualmente previste.

Tabella 1. Schema di sintesi delle HRS nel Mondo

Area geografica	Stazioni operative (HRS)	Note principali
Italia IT	~3 operative (con ~40 previste entro 2026)	Rete molto limitata, forte espansione prevista, ancora insufficiente per domanda attuale.
Europa EU	~294 operative	In crescita, Germania e Francia in testa.
Mondo 🌍	~1.160 operative	Dominata da Asia (soprattutto Cina, Corea, Giappone).

3. Stoccaggio e trasporto dell'idrogeno

L'idrogeno può essere utilizzato in numerosi settori industriali, quali: a) materia prima per la produzione di sostanze chimiche e materiali; b) combustibile per la generazione di energia e calore; c) combustibile nel settore dei trasporti. Una delle principali sfide del settore dell'idrogeno consiste nel suo stoccaggio e trasporto in condizioni di sicurezza (Nastasi et al., 2025, [6]), aspetto fondamentale per garantirne

la disponibilità come risorsa energetica. In primo luogo, l'idrogeno può essere stoccato e trasportato sotto forma di: 1) gas compresso; 2) liquido a bassa temperatura (al di sotto del suo punto di ebollizione normale, pari a −252,8 °C); 3) stato solido, ad esempio sotto forma di idruri metallici. Nel presente articolo gli autori si concentrano sulle modalità di stoccaggio e trasporto indicate ai punti 1) e 2). Nella Fig. 1 è riportato uno schema semplificato della produzione di idrogeno da fonti rinnovabili, nel quale sono evidenziati i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno (fissi e trasportabili).



Figura 1. Schema della filiera dell'idrogeno

Sono stati sviluppati e impiegati quattro tipi di contenitori per il trasporto e lo stoccaggio dell'idrogeno:

- Tipo I: contenitore metallico con o senza saldature.
- Tipo II: contenitore metallico senza saldature avvolto da una struttura in fibra composita impregnata in resina.
- Tipo III: rivestimento metallico completamente avvolto con materiale composito in fibra e resina.
- Tipo IV: rivestimento polimerico completamente avvolto con materiale composito in fibra e resina.

Rispetto ad altri settori economici, quali l'industria e l'agricoltura, il settore dei trasporti risulta essere il principale contributore alle emissioni di gas a effetto serra (GHG) (Kazancoglu et al., 2021, [4]).

3.1. Stoccaggio di idrogeno gassoso (GH_2)

Attualmente, il metodo più comune di stoccaggio dell'idrogeno è sotto forma di gas compresso (GH_2) in bombole metalliche e composite a diversi livelli di pressione. Il processo di compressione dell'idrogeno ne aumenta la densità volumetrica. L'idrogeno destinato ad usi industriali o di laboratorio è generalmente compresso a pressioni comprese tra 15 e 20 MPa (150÷200 bar).

Nei veicoli, l'idrogeno pressurizzato a 35÷70 MPa viene immagazzinato in serbatoi di stoccaggio installati a bordo. Presso le stazioni di rifornimento, il gas idrogeno viene pressurizzato per stadi (fino a 100 MPa) e stoccato in contenitori. Ad esempio, in una stazione di rifornimento con stoccaggio in fase gassosa possono essere utilizzati tre diversi livelli di pressione: stoccaggio a bassa pressione (in serbatoi "a sigaro", P = 4,5 MPa), stoccaggio a media pressione (in gruppi di bombole/insiemi di cilindri, P =

20÷50 MPa) e stoccaggio ad alta pressione (in serbatoi/bombole composite, P = 70÷100 MPa).
Le principali criticità associate al GH_2 sono:

- Elevato fabbisogno energetico richiesto per la compressione.
- Sollecitazioni sui materiali dei contenitori dovute ai cicli ripetuti da basse ad alte pressioni.
- Problematiche intrinseche di sicurezza legate all'impiego di pressioni così elevate nei serbatoi.

Di seguito per i serbatoi di Tipo I verranno fornite indicazioni sulla loro costruzione e sul loro utilizzo in sicurezza. Generalmente, i processi di stoccaggio dell'idrogeno prevedono l'installazione di un compressore a monte del serbatoio di accumulo. Tuttavia, nel caso di serbatoi (con saldature) in grado di immagazzinare idrogeno a una pressione di 35 bar (Fig. 2A), ad esempio, non è necessario comprimere l'idrogeno prima dello stoccaggio; infatti, 35 bar corrispondono generalmente al valore della pressione dell'idrogeno in uscita da un elettrolizzatore. Di conseguenza, alcuni serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno possono essere installati direttamente tra l'elettrolizzatore, o un altro sistema di produzione di idrogeno, e la macchina che lo utilizza o lo trasporta, consentendo così l'eliminazione del compressore dal sistema.
La Fig. 2 mostra alcuni esempi di serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno in applicazioni stazionarie. L'impiego di serbatoi di Tipo I, saldati, in sistemi con pressioni superiori a 100 bar può risultare inappropriato: all'aumentare della pressione, infatti, è necessario incrementare lo spessore delle pareti del serbatoio, con conseguente aumento della quantità di acciaio, tempi di saldatura molto lunghi, maggiore peso e, soprattutto, costi più elevati. Tenendo conto di tali aspetti, per pressioni superiori a 70 bar generalmente si utilizzano serbatoi monoblocco (privi di saldature), come mostrato nelle Fig. 2B e 2C.



A) Serbatoi saldati con pressione di progetto 35÷70 bar



B) Cilindri senza saldatura con pressione di progetto 150÷200 bar



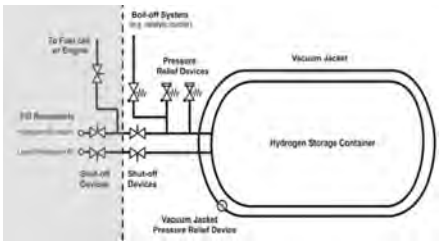
C) Cilindri senza saldatura con pressione di progetto 200÷500 bar

Fig. 2: Esempi di serbatoi di stoccaggio di idrogeno

3.2. Stoccaggio e trasporto di idrogeno liquefatto (LH_2)

I serbatoi di stoccaggio per LH_2 possono contenere una quantità di idrogeno superiore rispetto a quelli per GH_2: la capacità volumetrica dell'LH_2 è pari a 0,070 kg/L, contro 0,030 kg/L dei serbatoi di GH_2 a 70 MPa. Tuttavia, il processo di liquefazione richiede un considerevole apporto energetico, pari a circa il 30% dell'energia contenuta nell'idrogeno. L'idrogeno può essere liquefatto al fine di

semplificarne il trasporto o lo stoccaggio. Tutti i principali fornitori industriali di gas dispongono di autocisterne criogeniche. La Fig. 3A riporta uno schema di stoccaggio dell'LH_2 che evidenzia i principali componenti del sistema, mentre la Fig. 3B mostra un serbatoio di LH_2 dotato di uno speciale vaporizzatore ad aria per l'erogazione di idrogeno in fase gassosa. Uno degli scenari incidentali più gravosi può essere rappresentato dalla rottura catastrofica di un serbatoio di LH_2 (Ustolin et al., 2022, [7]).



A) Serbatorio di stoccaggio di LH_2 nel quale sono evidenziati i componenti principali



B) Serbatoio fisso di LH_2 con vaporizzatore



C) Rimorchio per il trasporto su strada di LH_2

Figura 3. Esempi di serbatoi di idrogeno

4. Apparecchiature a pressione e insiemi in installazioni fisse

Si osserva che, nella quasi totalità dei casi, gli eventi incidentali che coinvolgono apparecchiature o insiemi a pressione contenenti idrogeno hanno origine da una perdita di contenimento e/o da un rilascio di H_2. In funzione delle modalità con cui avviene la perdita o il rilascio, delle apparecchiature coinvolte e delle condizioni ambientali circostanti, l'evento può evolvere secondo tre principali fenomeni: incendio, esplosione e rilascio di H_2 (sostanza infiammabile). Pertanto, la prima misura di prevenzione consiste nell'evitare perdite dalle apparecchiature e dagli insiemi contenenti idrogeno. È quindi essenziale garantire l'integrità delle apparecchiature stesse, nonché l'efficienza e l'adeguatezza dei dispositivi di sicurezza e di controllo affinché possano svolgere correttamente la loro funzione. Inoltre, qualora l'idrogeno venga rilasciato attraverso aperture dedicate (ad esempio valvole di sicurezza, dischi di rottura, ecc.), nonostante tutte le precauzioni adottate, il flusso deve essere opportunamente convogliato al fine di evitare danni alle persone, alle strutture e all'ambiente.

In Europa, i fabbricanti di apparecchiature e insiemi a pressione installati in postazioni fisse devono adottare la Direttiva di prodotto 2014/68/UE (PED), che dal 2016 ha sostituito la precedente Direttiva 97/23/CE. Tale direttiva stabilisce i requisiti che devono essere soddisfatti dalle apparecchiature e dagli insiemi a pressione operanti a una pressione superiore a 0,5 bar per poter essere marcati CE e immessi sul mercato europeo. Il fabbricante è il principale soggetto destinatario della direttiva ed è responsabile della sicurezza delle apparecchiature e degli insiemi a pressione. Egli ha inoltre l'onere della marcatura CE dei prodotti realizzati e la piena responsabilità della progettazione, costruzione e commercializzazione. Il fabbricante

deve pertanto garantire la conformità a tutti i Requisiti Essenziali di Sicurezza e di Tutela della Salute previsti dalla Direttiva PED. È innanzitutto necessario introdurre la distinzione tra attrezzature a pressione e insiemi:

- Per attrezzature a pressione si intendono: recipienti, tubazioni, accessori di sicurezza e accessori a pressione, compresi, ove applicabile, gli elementi collegati alle parti in pressione, quali flange, raccordi, manicotti, supporti e alette mobili.
- Per insiemi si intendono: combinazioni di diverse attrezzature a pressione assemblate da un fabbricante per costituire un tutt'uno integrato e funzionale.

In generale, le attrezzature e gli insiemi soggetti a una pressione massima ammissibile PS superiore a 0,5 bar rientrano nel campo di applicazione della PED, mentre quelli con pressione pari o inferiore a 0,5 bar ne sono esclusi. Una volta stabilito che l'apparecchiatura rientra nel campo di applicazione della Direttiva 2014/68/UE, il passo successivo consiste nella definizione della categoria di rischio PED di appartenenza, mediante le tabelle riportate nell'Allegato II della direttiva, tenendo conto dei seguenti parametri:

- Dimensioni dell'attrezzatura (volume V per i recipienti, diametro nominale DN per le tubazioni).
- Pressione massima ammissibile (PS);
- Tipo di fluido: gruppo 1 (pericoloso; l'idrogeno rientra in questo gruppo in quanto infiammabile) o gruppo 2 (non pericoloso).

In generale, le attrezzature a pressione possono essere classificate nelle categorie di rischio PED I, II, III e IV, con un livello di rischio crescente dalla categoria I alla IV. Considerata la pressione di stoccaggio, i serbatoi o gli insiemi contenenti idrogeno ricadono normalmente nella categoria di rischio PED IV. L'Analisi dei Rischi che il fabbricante è tenuto ad effettuare si basa sulla categoria di rischio PED di appartenenza ed è finalizzata alla verifica e alla tracciabilità della conformità ai Requisiti Essenziali di Sicurezza definiti nell'Allegato I della PED. L'ultimo passaggio, prima dell'immissione sul mercato dell'Unione Europea, riguarda la marcatura CE dell'apparecchiatura e l'eventuale ricorso a un Organismo Notificato (obbligatorio per le categorie di rischio PED dalla II alla IV). Il numero di identificazione dell'Organismo Notificato deve essere indicato sia sul certificato sia sulla targhetta apposta sull'attrezzatura o sull'insieme a pressione.

In sintesi, per poter immettere sul mercato europeo un'attrezzatura o un insieme a pressione, il fabbricante deve: apporre la marcatura CE sull' attrezzatura/insieme mediante apposita targhetta; redigere la Dichiarazione UE di Conformità ai sensi della Direttiva 2014/68/UE (PED); predisporre le "Istruzioni per l'uso", ai fini della sicurezza, relative a:

- Assemblaggio dell'insieme, inclusa l'installazione delle singole attrezzature a pressione.
- Messa in servizio.
- Utilizzo.
- Manutenzione e controlli da parte dell'utilizzatore.

Si evidenzia che il Fascicolo Tecnico, che costituisce la base degli elementi sopra citati, deve essere conservato dal fabbricante. Per lo stoccaggio di idrogeno sia liquido che gassoso, oltre alla manutenzione e ai controlli a carico del datore di lavoro, sono previste anche verifiche obbligatorie. Per quanto riguarda la messa in servizio dei serbatoi di idrogeno, nonché i controlli interni e le verifiche di legge, in Italia, la materia è disciplinata dal D.Lgs. 81/08, dal D.M. 329/2004 e dal D.M. 11/04/2011. In particolare, ai sensi dell'art. 6 del D.M. 329/2004, il datore di lavoro/utilizzatore deve comunicare la messa in servizio delle attrezzature o degli insiemi a pressione all'INAIL. La sede INAIL territorialmente competente provvede quindi all'assegnazione di un apposito numero di matricola. Infine, poiché si tratta di apparecchiature o insiemi a pressione rientranti nella categoria di rischio PED IV e contenenti un fluido pericoloso (infiammabile, quale l'idrogeno), devono essere effettuate, su richiesta del datore di lavoro, una verifica di funzionamento con periodicità biennale e una verifica di integrità con periodicità decennale.

5. Impianti di stoccaggio dell'idrogeno rientranti nel campo di applicazione della Direttiva Seveso

Quando le quantità di H_2 immagazzinate superano determinate soglie, deve essere considerata la Direttiva Europea 2012/18/UE (Seveso III) relativa al controllo dei rischi di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. Un "incidente rilevante" è un evento che comporta il rilascio di sostanze pericolose e che può causare gravi danni alle persone, all'ambiente o ai beni materiali. Gli incidenti rilevanti possono includere esplosioni, incendi o rilasci incontrollati di sostanze chimiche pericolose nell'ambiente. Nel caso di quantità di H_2 superiori a 5 tonnellate, occorre fare riferimento ai requisiti della Direttiva Seveso relativi agli stabilimenti di soglia inferiore. Qualora la quantità di H_2 superi le 50 tonnellate, si applicano gli obblighi previsti per gli stabilimenti di soglia superiore. In tali casi, i gestori degli stabilimenti devono identificare, descrivere, analizzare e caratterizzare le sequenze di incidente che possono portare a un incidente rilevante. Ciascuno scenario di incidente identificato deve essere correlato a un riepilogo degli eventi che possono avere un ruolo nell'innesco, con cause interne o esterne allo stabilimento:

- Cause operative.
- Cause esterne, come quelle legate a effetti domino.
- Cause naturali, come terremoti o alluvioni (Muratore et al., 2024, [5]).

Inoltre, occorre descrivere: a) il comportamento dello stabilimento in caso di indisponibilità parziale o totale delle reti di servizio quali elettricità, acqua o aria compressa; b) le misure per garantire il funzionamento delle apparecchiature critiche anche in condizioni di emergenza. Per apparecchiature critiche si intendono gli impianti, gli stoccaggi e attrezzature a pressione, ecc., che a seguito di guasto, errore umano o catastrofe naturali possono innescare un incidente rilevante.

Anche negli impianti di stoccaggio dell'H_2 che rientrano nel campo di applicazione della Direttiva Seveso III, occorre procedere ad un'analisi preliminare per

l'individuazione delle unità critiche. Un punto centrale della Direttiva Europea "Seveso III" prevede l'obbligo, per il datore di lavoro/gestore dello stabilimento, di:

- Dotarsi di una propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti attuata tramiti mezzi e strutture idonee, nonché tramite un Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS-PIR) orientato alla prevenzione degli incidenti rilevanti (aggiornato almeno ogni due anni).
- Dotarsi di "Piani di Emergenza Interna" (PEI) per rispondere rapidamente a eventuali incidenti, riesaminato, sperimentato e se necessario aggiornato ogni tre anni.
- Collaborare con le autorità locali alla redazione di "Piani di Emergenza Esterna" (PEE), descrivendo le azioni da intraprendere in caso di incidente con ricadute al di fuori dello stabilimento. Inoltre, il PEE è riesaminato, sperimentato e se necessario aggiornato previa consultazione della popolazione, dal Prefetto ad intervalli non superiori a tre anni.

In base al quantitativo di H_2, gli stabilimenti vengono classificati come di soglia inferiore (SSI) o di soglia superiore (SSS), con obblighi crescenti di sicurezza, monitoraggio e informazione. In particolare, se lo stabilimento in esame è di soglia superiore, il datore di lavoro/gestore dello stabilimento dovrà redigere un "Rapporto di Sicurezza", documento che contiene una valutazione tecnica ed approfondita dei rischi, le misure di prevenzione adottate, le misure di protezione in caso di incidente e l'analisi delle possibili conseguenze.

La Direttiva Seveso III ha inoltre implicazioni per la popolazione residente nelle vicinanze di tali stabilimenti, prevedendo apposita consultazione pubblica e partecipazione ai processi decisionali. Gli strumenti urbanistici devono comprendere un "elaborato tecnico rischio di incidenti rilevanti" denominato ERIR relativo al controllo dell'urbanizzazione nelle aree in cui sono presenti depositi di H_2 rientranti nel campo di applicazione della Direttiva Seveso III.

6. Conclusioni

Una delle sfide chiave nel settore dell'idrogeno è il suo stoccaggio e trasporto in sicurezza. Questa memoria, partendo dalle principali caratteristiche fisico-chimiche dell'idrogeno, si propone di evidenziare la situazione globale delle Stazioni di Rifornimento di Idrogeno e di fornire le indicazioni essenziali per una progettazione, costruzione, messa in servizio e utilizzo in sicurezza di serbatoi di stoccaggio di idrogeno fissi che tengano conto del rischio pressione nel rispetto delle direttive europee e con riferimento anche alla normativa italiana.

Solo con una gestione organica del rischio pressione si possono evitare perdite e rilasci di idrogeno, fonti di incendi ed esplosioni con gravi ripercussioni sui lavoratori e sulle persone che casualmente potrebbero trovarsi in prossimità di questi depositi, oltre a gravi danni economici agli impianti. Il lavoro affronta lo stoccaggio dell'idrogeno come gas pressurizzato (GH_2) e come liquido a bassa temperatura (LH_2).

Infine, quando la quantità di H_2 è superiore a determinate quantità, viene fatto un breve cenno sugli obblighi del gestore per lo stoccaggio dell'idrogeno che rientra nell'ambito di applicazione della Direttiva Europea 2012/18/UE (Seveso III) sul controllo degli incidenti rilevanti connessi a sostanze pericolose. Si precisa che il presente lavoro trae origine dall'esperienza istituzionale degli autori in materia di sicurezza delle attrezzature a pressione fisse, con riferimento alle norme dell'Unione Europea e dello Stato italiano, che sia i fabbricanti che gli utilizzatori devono applicare, rispettivamente per immetterle sul mercato e per utilizzarle.

Bibliografia e sitografia

[1] European Union, 2012, Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC (SEVESO III), Official Journal of the European Union, L197, p.1-37.

[2] European Union, 2014, Directive 2014/68/EU of the European Parliament and of the Council of 15 May 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment (recast), Official Journal of the European Union, N. 189, 27.6.2014, p. 164–259.

[3] HY Responders, 2023, European Train the Trainer Programme for Responders, Safety of liquid hydrogen, Level IV.

[4] Kazancoglu Y, Ozbiltekin-Pala M., Ozkan-Ozen Y.D., 2021, Prediction and evaluation of greenhouse gas emissions for sustainable road transport within Europe, Sustainable Cities and Society, Vol 70, 102924.

[5] Muratore A., Grillone G., Delle Site C., Giannelli G., Nastasi V., 2024, Natech Risk from Floods. Vulnerability of Critical Technical Systems Containing Hazardous Substances, Chemical Engineering Transactions, 111, 559-564 DOI:10.3303/CET24111094.

[6] Nastasi V., Grillone G., Tonti A., Muratore A., 2025, Pressure Risk Management in Accumulation and Transport Phases of Tanks Containing Hydrogen, Chemical Engineering Transactions, 119, 79-84 DOI:10.3303/CET25119014.

[7] Ustolin F., Giannini L., Pio G., Salzano E., Paltrinieri N., 2022, On the Mechanical Energy Involved in the Catastrophic Rupture of Liquid Hydrogen Tanks, Chemical Engineering Transactions, 91, 421-426 DOI:10.3303/CET2291071.

Realizzazione di un impianto di recupero e compressione di Syngas da pirolisi di pneumatici fuori uso: studio delle problematiche legate all'interazione del fluido con i materiali utilizzati per i componenti dell'impianto.

R. Iovene[1], A. Carro[2], G. Vaccaro[3], E. Bemporad[4]

[1]Inail – UOT di Pescara
[2]Inail – UOT di Forlì
[3]Inail – UOT di Palermo
[4]Inail – Dit

Sommario
La pirolisi rappresenta una delle principali tecnologie di riciclo chimico dei rifiuti, offrendo potenziali benefici in termini di recupero energetico e di valorizzazione dei materiali. Tra i prodotti ottenuti, il gas di sintesi (syngas) può contenere, anche a seguito di trattamenti di purificazione, tracce significative di elementi potenzialmente critici, quali idrogeno, composti acidi e contaminanti solforati. Tali componenti possono interagire con i materiali metallici impiegati negli impianti di recupero, in particolare con gli acciai al carbonio comunemente utilizzati per tubazioni e serbatoi, inducendo meccanismi di degrado accelerato e danneggiamenti strutturali. Ciò risulta particolarmente rilevante in condizioni operative caratterizzata da variazioni di pressione e temperatura tipiche delle applicazioni industriali e pone sfide significative per la sicurezza degli impianti. Il presente lavoro analizza le caratteristiche del syngas derivante dalla pirolisi di pneumatici fuori uso (PFU) e analizza i principali rischi associati alla compatibilità tra fluido di processo e materiali di costruzione nel corso del ciclo di vita dell'impianto. Vengono approfonditi i fenomeni di corrosione "sour" e di fragilizzazione da idrogeno, con particolare attenzione all'Hydrogen Induced Cracking (HIC), evidenziando le condizioni operative che ne favoriscono l'insorgenza, mostrando come una gestione non adeguata del syngas possa compromettere la sicurezza degli operatori e dell'ambiente. Infine, sono illustrate le principali strategie di mitigazione del rischio, che includono scelte progettuali adeguate, selezione e qualificazione dei materiali secondo standard NACE/ISO, nonché l'adozione di sistemi di monitoraggio e manutenzione predittiva volti a prevenire l'insorgere e/o mitigare la propagazione dei meccanismi di danneggiamento.

1. Introduzione

Il syngas generato dalla pirolisi dei PFU è un sottoprodotto gassoso del processo di decomposizione termica della gomma in assenza di ossigeno, che avviene tipicamente a temperature comprese tra 400 e 700 °C. In tali condizioni, la materia organica si decompone in tre frazioni principali: una fase gassosa, un olio pirolitico e

un residuo solido carbonioso (char). La distribuzione tra le tre frazioni dipende da numerosi parametri di processo, tra cui temperatura, tempo di residenza, velocità di riscaldamento, pressione operativa, tipologia di reattore e composizione del rifiuto di partenza. Ulteriori fattori rilevanti sono la dimensione delle particelle di gomma, l'eventuale presenza di catalizzatori e la configurazione dell'impianto [1]
Nel caso degli pneumatici, il materiale è generalmente sottoposto a una fase di triturazione preliminare, al fine di ridurre la pezzatura e migliorare l'efficienza del riscaldamento. Il processo avviene in un reattore sigillato, in cui la temperatura è accuratamente controllata per evitare fenomeni di combustione. A temperature elevate, si verificano diverse reazioni chimiche che rompono i legami delle molecole complesse.
Alcune delle reazioni principali sono:

- Cracking termico: frammentazione delle catene polimeriche.
- Deidrogenazione: rilascio di idrogeno.
- Reforming secondario: i composti più leggeri reagiscono ulteriormente tra di loro, producendo nuovi gas.

Tali reazioni portano alla formazione di idrocarburi leggeri, ossidi di carbonio, idrogeno, e, in quantità minori, composti contenenti zolfo e azoto.

2. La composizione del gas di sintesi da pirolisi

Il gas di sintesi ottenuto dalla pirolisi dei PFU è quindi un gas non condensabile costituito principalmente da idrogeno (H_2), monossido di carbonio (CO), diossido di carbonio (CO_2), metano (CH_4), idrocarburi C_2–C_4 saturi e insaturi, nonché da composti solforati e azotati in concentrazioni generalmente basse. Tra i composti dello zolfo, il solfuro di idrogeno (H_2S) riveste un ruolo particolarmente critico dal punto di vista della compatibilità con i materiali. La composizione del syngas assume un'importanza rilevante negli impianti destinati al suo utilizzo energetico o stoccaggio in pressione, in quanto alcuni componenti, in particolare H_2, CO_2 e H_2S, possono attivare meccanismi di corrosione e fragilizzazione negli acciai al carbonio.
In tabella 1 ai valori di composizione del syngas prodotto dalla pirolisi di PFU sono affiancati i valori di composizione post-trattamento, riferiti all'alimentazione di un impianto di compressione e stoccaggio del syngas di PFU. Il pretrattamento consente di ridurre il contenuto dei composti potenzialmente responsabili dei meccanismi di danno di materiali metallici, di seguito descritti, consentendo l'uso energetico del syngas che, in virtù della sua composizione risulta caratterizzato da un potere calorifico superiore che può raggiungere 75,5 MJ/Nm^3.
I dati sperimentali sono riferiti a reattori di pirolisi di vario tipo, a letto fluidizzato bollente, a letto fisso, a letto conico a beccuccio, a coclea, e a temperature variabili da 350°C a 900°C, con rese di gas generalmente di poche unità percentuali, ma nel complesso variabili da 2,18 a 29% in peso. Il gas rappresenta infatti il prodotto minoritario del processo di pirolisi [2], [3], [4], [5]

Componente	Concentrazione nel gas (% vol)		
	Min	Max	Post trattamento
H_2	0 / n.r.	40,00	9.1
CO	t / n.r.	9,00	2,0
CO_2	t	26,20	4,0
CH_4	0,19	44,50	20,1
C_2H_6	n.r.	29,00	8,2
C_2H_4	0,40	17,30	5,6
C_2H_2	0 / n.r.	-	<0,1
C_3	0,67	12,56	10,7
C_4	0,20	38,10	20,6
C_5	0,021	12,20	5,8
C_6	n.r.	2,80	2,6
H_2S	0,01	4,18	<0,05

n.r.: non riportato; t: tracce

Tabella 1. Composizione chimica del syngas ottenuto dalla pirolisi dei PFU

3. Interazione del syngas con gli acciai al carbonio

In ambienti contenenti H_2S o altri gas riducenti e umidità, gli acciai al carbonio possono essere soggetti a corrosione “sour”, un meccanismo ben noto nell’industria petrolifera e del gas. Tale fenomeno si manifesta tipicamente quando la pressione parziale di H_2S supera quella della CO_2 e può portare all’innesco di criccatura da tensione da solfuro (Sulfide Stress Cracking, SSC).

La norma NACE MR0175 / ISO 15156 definisce i limiti di pressione parziale di H_2S al di sopra dei quali è necessario adottare misure specifiche di prevenzione. In particolare, la corrosione “sour” diventa critica quando la pressione parziale di H_2S supera 0,30 kPa. La norma fornisce inoltre linee guida per la selezione dei materiali e per le condizioni di applicabilità delle leghe resistenti alla corrosione, in funzione di temperatura, pH e composizione del fluido.

Il meccanismo corrosivo è complesso e coinvolge la formazione di prodotti di corrosione, come la mackinawite (FeS), la cui evoluzione dipende dalle condizioni operative e dal tempo di esposizione, dalla concentrazione dei gas acidi e dalla temperatura [6].

Altro fenomeno particolarmente critico associato all’interazione del gas di sintesi con gli acciai al carbonio è l’Hydrogen Induced Cracking (HIC). Il cracking indotto dall'idrogeno è una categoria di modalità di guasto HAC (hydrogen-assisted cracking) in cui non vi è alcun carico sull'acciaio delle tubazioni ed è un danno meccanico da idrogeno innescato da un processo corrosivo interno causato, in ambienti “sour”, dall’assorbimento e accumulo dell’idrogeno atomico nel reticolo metallico dell’acciaio, che porta alla formazione di cricche.

L’assorbimento dell’idrogeno generato dalla corrosione dell’acciaio in ambiente umido contenente acido solfidrico (H_2S) può causare diversi effetti, che dipendono dalle proprietà dell’acciaio, dalle modalità di fabbricazione e dei processi di formatura, dalle caratteristiche dell’ambiente e da altre variabili. Uno di questi effetti negativi osservati è lo sviluppo di fessure lungo la direzione di laminazione dell’acciaio, che possono collegarsi tra di loro formando scanalature lungo lo spessore. L’idrogeno, generato per reazioni elettrochimiche in presenza di H_2S, CO o H_2O, diffonde nel materiale e si accumula all’interno di difetti microstrutturali come inclusioni o vuoti di laminazione. L’accumulo di gas causa elevate pressioni interne che portano alla formazione di cricche planari parallele alla superficie laminata, note come stepwise cracking. Queste cricche possono ridurre lo spessore delle pareti di tubazioni o recipienti a pressione fino a quando la sollecitazione cui sono sottoposti diventa eccessiva, portando alla rottura. Questo fenomeno è talvolta accompagnato da vesciche di superficie. L’HIC si manifesta tipicamente in acciai con elevato contenuto di zolfo o inclusioni non metalliche, in ambienti riducenti e a temperature medio-basse (20–150 °C).
La mitigazione del fenomeno si ottiene, in generale, mediante:

- l’impiego di acciai HIC-resistenti,
- la riduzione della pressione parziale di H_2S e H_2, e con la desolforazione del gas,
- trattamenti di distensione delle tensioni residue,
- il controllo microstrutturale mediante rifusione o aggiunta di calcio per la modifica delle inclusioni.

Un adeguato monitoraggio mediante ultrasuoni non convenzionali con la tecnica avanzata Time of Flight Diffraction (TOFD) consente di individuare precocemente le cricche planari interne.

4. Strategie di mitigazione e controllo dei fenomeni di danneggiamento

La prevenzione e il monitoraggio continuo sono essenziali per garantire la sicurezza delle infrastrutture. La prevenzione dei danni da HIC include l’uso di materiali resistenti, il monitoraggio continuo e l’adozione di standard di prova come il NACE TM 0284. Lo standard NACE TM 0284 offre un metodo standardizzato per valutare e confrontare la resistenza degli acciai a corrosione da HIC.
Creato originariamente nel 1984, lo standard NACE TM 0284 (“Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking”) è stato progettato per fornire un protocollo di test per valutare la resistenza degli acciai utilizzati nelle pipeline. Nel corso del tempo, il campo di applicazione dello standard si è esteso includendo anche raccordi e flange, rendendolo uno strumento fondamentale per garantire la sicurezza in diverse tipologie di infrastrutture.
Il metodo di prova di laboratorio definito dalla norma NACE TM0284 è in particolare finalizzato alla valutazione della resistenza degli acciai al carbonio e basso-legati al fenomeno HIC, in ambienti contenenti H_2S. Si tratta di una qualificazione sperimentale del materiale, non di una certificazione formale, ma il superamento

delle prove secondo TM0284 costituisce un requisito tecnico per l'impiego dei materiali in ambienti "sour".
Il metodo prevede la preparazione di provini piani ricavati dal materiale in esame, successivamente immersi per 96 ore in soluzioni sintetiche saturate di H_2S (soluzioni A, B o C, a diversa composizione salina e acidità). Durante l'esposizione, l'idrogeno atomico penetra nel reticolo cristallino e può generare cricche interne o fenomeni di blistering. Dopo il test, i provini vengono sezionati e sottoposti ad analisi metallografiche per determinare tre indicatori di danno: CLR (Crack Length Ratio), CTR (Crack Thickness Ratio) e CSR (Crack Sensitivity Ratio).
Il Crack Length Ratio (CLR) è un rapporto che descrive la lunghezza della fessura rispetto a una misura critica, come la lunghezza complessiva del campione o un'altra misura caratteristica del componente;

- Formula tipica:

$$\text{CLR} = \frac{\text{Lunghezza della fessura (crack lenght)}}{\text{Lunghezza totale del componente o del campione}}$$

Il Crack Thickness Ratio (CTR) è un altro rapporto che descrive lo spessore della fessura rispetto a una misura di riferimento. Questo indice viene usato per esaminare l'evoluzione del collo di bottiglia o della sezione critica della fessura.

- Formula tipica:

$$\text{CTR} = \frac{\text{Spessore della fessura (crack thickness)}}{\text{Spessore originale del materiale o spessore della sezione critica}}$$

Il Crack Sensitivity Ratio (CSR) è un indice che misura la sensibilità di un materiale alla formazione e all'espansione delle fessure in risposta a specifiche condizioni di carico e ambiente (ad esempio, presenza di corrosione, temperature elevate, ecc.).

- Formula tipica:

$$\text{CSR} = \frac{\text{Velocità di crescita della fessura (crack growth rate)}}{\text{Livello di stress applicato o parametro di stress}}$$

Il metodo non definisce criteri di accettazione univoci, ma i valori comunemente adottati per considerare un materiale resistente all'HIC sono:

- CLR ≤ 15 %, CTR ≤ 5 %, CSR ≤ 2 %.

L'uso di soluzioni aggressive per permettere test brevi (96 h) comporta l'incertezza dell'applicabilità di queste condizioni di prova a condizioni più blande per cui i tempi di prova sarebbero troppo lunghi, considerato che non esiste un limite inferiore definito di concentrazione di H_2S al di sotto del quale la valutazione della resistenza all'HIC non sia necessaria, inoltre non esiste un metodo consolidato per valutare l'effetto della tensione applicata ed in definitiva manca una mappa dei regimi a causa dell'assenza di studi sistematici [7].
L'esito positivo del test consente comunque di qualificare il materiale come "HIC tested per NACE TM0284", indicazione che garantisce un'elevata affidabilità in ambienti di processo contenenti syngas acido o H_2S. Tale prova è spesso richiesta per

tubazioni, flange, scambiatori e serbatoi destinati a impianti di pirolisi o processi petrolchimici.

5. Un'applicazione impiantistica

L'insieme considerato come caso d'esame è un impianto industriale di recupero e compressione di Syngas derivante dalla pirolisi degli pneumatici.
L'impianto è costituito essenzialmente da un serbatoio in acciaio al carbonio di capacità geometrica di 10 m^3 con funzione di smorzatore "buffer" per il gas in transito, dal filtro in ingresso, dai compressori impiegati per il recupero e la compressione del gas, con relativa strumentazione di controllo e sicurezza, dai condensatori Joule-Thomson di raffreddamento del gas in uscita e dalle tubazioni di collegamento. Il serbatoio è avvolto da un cavo scaldante per il mantenimento dello stesso alla temperatura costante di 25°C, coibentato con lana di roccia, ed ha un rivestimento in alluminio di protezione.
Tutte le attrezzature a pressione sono installate all'interno di una struttura metallica di supporto, comunemente denominata "Skid", schematicamente rappresentata in fig. 1.

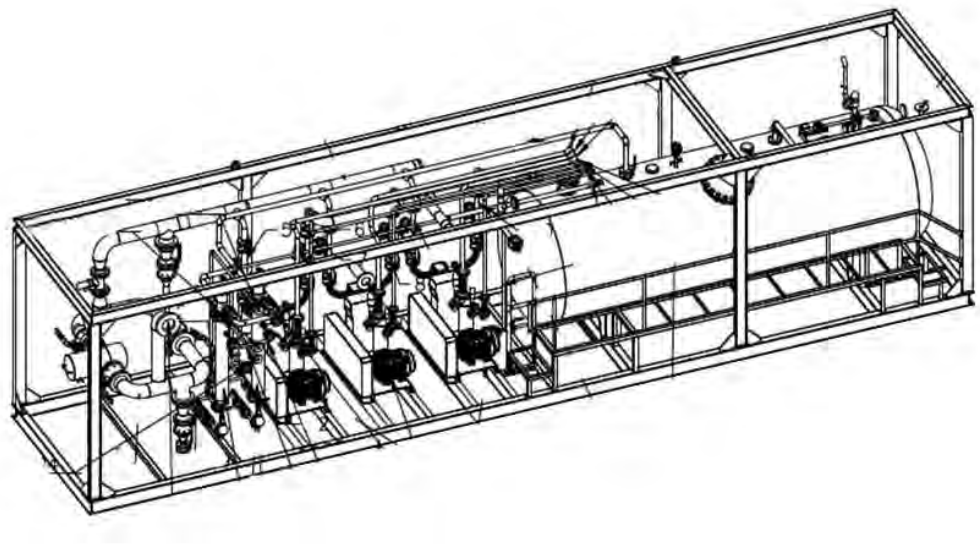


Figura 1. Rappresentazione dell'impianto in skid

Le condizioni operative sono le seguenti:
• Pressione minima di aspirazione Syngas: PA = -0,1barg
• Pressione massima di mandata Syngas: PM = 3 barg
• Temperatura minima di aspirazione Syngas: Tm = 50 °C
• Temperatura massima mandata Syngas: TM = 130 ° C

I componenti principali dell'impianto sono realizzati in acciaio al carbonio di grado P265 GH. Tuttavia, la tipologia di fluido di processo non consente di considerare tale materiale automaticamente idoneo al servizio, in quanto il syngas derivante dalla pirolisi dei PFU può contenere elevate concentrazioni di idrogeno, H_2S, umidità e contaminanti organici. In particolare, il range di temperature di esercizio potrebbe favorire la permanenza dell'idrogeno all'interno del reticolo cristallino del materiale, aumentando il rischio di fenomeni HIC.
Un acciaio P265 GH che non è stato valutato secondo standard NACE tipicamente presenta inclusioni di solfuro di manganese allungate orientate nel senso di laminazione che possono diventare critiche in ambienti sour, lungo tali inclusioni infatti potrebbero formarsi microcavità, l'idrogeno si ricombina in H2 e aumenta la pressione interna, nascono così blister (bolle interne), microcricche parallele alla superficie. L'evoluzione tipica dell'HIC nel tempo sta nel collegamento di più blister, formazione di cricche a gradini (stepwise cracking), e tutto ciò può non palesarsi all'esterno ma indurre danni estesi all'interno.
Per un impianto esistente, le principali misure di mitigazione del rischio includono:

- il mantenimento del gas al di sopra del punto di rugiada,
- l'esecuzione di drenaggi frequenti,
- ispezioni ultrasonore mirate (preferibilmente mediante tecnica TOFD),
- la limitazione di fermate prolungate
- la valutazione dell'adozione di rivestimenti interni (cladding).

La tecnica di controllo TOFD, utilizzata per l'individuazione e la caratterizzazione dimensionale delle discontinuità interne nei materiali metallici, in particolare cricche, mancanze di fusione e difetti planari, risulta particolarmente efficace proprio per:

- cricche da HIC
- stepwise cracking
- difetti paralleli alla superficie
- danni non affioranti

6. Conclusioni

Nell'impianto preso in considerazione in riferimento al fenomeno HIC, oltre a limitare la pressione parziale di H_2S (per limitare il fenomeno della corrosione "sour") e H_2, si è scelto un materiale con basso contenuto di zolfo, idealmente inferiore a 0.005%, al fine di evitare che si formino inclusioni di manganese di forma allungata che guiderebbero la formazione della cricca.
Inoltre è stato scelto un materiale caratterizzato da una microstruttura uniforme e poco bandificata, al fine di allontanarsi il più possibile da configurazioni in grado di guidare la propagazione delle cricche. Questo risultato è stato raggiunto scegliendo una colata con un basso contenuto di manganese, evitando così la forte bandificazione di ferrite e perlite.
La colata ha anche subito un trattamento con Calcio. Infatti, un alto rapporto Calcio/Zolfo favorisce la formazione di solfuri di calcio invece che di manganese. La

loro forma non risulta allungata e quindi propagano meno le cricche rispetto alla loro controparte.
La scelta di un buon acciaio insieme all'utilizzo di un test dedicato, standardizzato nel corso degli anni da NACE (ora AMPP: Association for Materials Protection and Performance), e descritto nel documento NACE TM0284, possono essere considerati un valido strumento per assicurare la resistenza dell'impianto all'HIC.

Bibliografia

[1] Han, W.; Han, D.; Chen, H. Pyrolysis of Waste Tires: A Review. Polymers 2023, 15, 1604. https://doi.org/10.3390/polym15071604

[2] Mouneir S.M., El-Shamy A.M. A review on harnessing the energy potential of pyrolysis gas from scrap tires: Challenges and opportunities for sustainable energy recovery, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2024, 177, 106302, https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106302

[3] Han, W.; Han, D.; Chen, H. Pyrolysis of Waste Tires: A Review. Polymers 2023, 15, 1604. https://doi.org/10.3390/

[4] Martinez J.D., Puy N., Murillo R., Garcia T., Navarro M.V., Mastral A.M., Waste tire pyrolysis - a review, Renew. Sustain Energy Rev., 2013, 23,179–213, https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038

[5] Caspani F., Manenti S., Hydrogen recovery from end-of-life tire pyrolysis gas via H_2S splitting, International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 144, 1292–1298, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.059

[6] Obot I.B., Sorour A.A., Verma C., Al-Khaldi T.A., Rushaid A.S. Key parameters affecting sweet and sour corrosion: Impact on corrosion risk assessment and inhibition, Engineering Failure Analysis, 2023, 145 107008 https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.107008

[7] Martin M.L., Sofronis P. Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: A review, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 101, 104547 https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104547

[8] NACE TM0284:2016. Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking

[9] NACE MR0175-2021/ISO15156:2020. Petroleum and Natural Gas Industries-Materials for Use in H2S-Containing Environments in Oil and Gas Production

Rischi lavorativi nei lavori di revamping delle centrali idroelettriche

M. Del Gaudio[1], C. Piccolo[1], P. Infortuna[2], S. Spinoso[2], G. Conta[3]

[1]Inail - UOT di Avellino
[2]Inail - UOT di Torino
[3]Inail - UOT di Alessandria

Sommario
Le centrali idroelettriche rappresentano una significativa fonte di energia rinnovabile per la nostra nazione. Nel 2022 il numero di centrali per la produzione di energia idroelettrica era di 4702.
Stando ai dati Terna riferiti a febbraio 2024, in Italia sono presenti 4860 impianti.
Molte centrali sono state realizzate all'inizio del secolo scorso ed anche prima. Per molte di esse si rende necessario un revamping per aggiornare le tecnologie ormai obsolete e sostituire le parti di impianto ormai usurate.
Adattare nuove tecnologie a strutture progettate molto tempo fa può comportare grosse difficoltà e soprattutto può esporre i lavoratori a rischi per la salute e la sicurezza.
Le UOT CVR Inail di Avellino e di Aosta ed i tecnici impegnati sul territorio, in collaborazione con il DIT Inail, stanno lavorando da alcuni anni ad un obiettivo di ricerca per la valutazione dei rischi durante i lavori di manutenzione straordinarie delle centrali idroelettriche. Nello studio sono state coinvolte anche importanti aziende che gestiscono centrali idroelettriche nel territorio nazionale.
L'attività di ricerca spera di fornire degli utili riferimenti a quanti sono impegnati nei lavori di revamping delle centrali idroelettriche provando a scongiurare infortuni.



Figura 1. Centrale idroelettrica. Fonte IA Gemini

1. Le centrali idroelettriche

Nelle centrali idroelettriche si produce l'energia elettrica sfruttando l'energia cinetica dell'acqua accumulata in un bacino montano e convogliata a valle attraverso condotte forzate oppure sfruttando nelle valli il flusso di corsi d'acqua.
Al punto di arrivo nella centrale idroelettrica, il flusso d'acqua, aziona delle turbine collegate ad un alternatore che produce l'energia che viene opportunamente trasformata ed immessa nella rete di distribuzione.
In alcune centrali è possibile ripompare l'acqua nel bacino montano nelle ore in cui c'è minore richiesta di energia in modo da riutilizzare la risorsa idrica.
Rispetto alle centrali termoelettriche, che utilizzano fonti fossili, le centrali idroelettriche hanno un minore impatto sull'ambiente limitato alla costruzione della struttura.
Le centrali idroelettriche sono anche più efficienti con un rendimento che può raggiungere l'80% contro un 55% massimo delle centrali termoelettriche.

2. I rischi nelle centrali idroelettriche

Le centrali idroelettriche presentano rischi per i lavoratori simili a quelli di grosse attività industriali ed altri specificamente legati all'attività.
In particolare costituiscono elementi critici gli impianti a pressione installati per comandare i sistemi di regolazione e di manovra, gli impianti elettrici e relativi impianti di messa a terra e di protezione dalle scariche atmosferiche a protezione diegli apparati elettrici e le strutture, gli apparecchi di sollevamento fissi e mobili necessari a movimentare le voluminose attrezzature e gli eventuali impianti per il raffreddamento delle parti di impianto che producono calore o di riscaldamento degli ambienti e dei fluidi nelle centrali in quota..
Queste centrali sono ubicate prevalentemente in zone impervie e più raramente in zone abitate quando sfruttano direttamente il flusso di corsi d'acqua. È importante quindi evidenziare i rischi tipici di attività all'aperto ed in particolare l'esposizione alle basse temperature nella stagione invernale, ed a causa dei cambiamenti climatici, anche di temperature elevate nella stagione estiva.
Le attività lungo il bacino e la condotta forzata espongono anche a rischi legati alla praticabilità dei luoghi.
Negli ambienti al chiuso sono pur presenti i rischi termici ed è sempre da monitorare la stabilità delle strutture, la presenza di luoghi idonei per permanenza dei lavoratori (refettori, dormitori, servizi igienici ecc.) e le vie di fuga per i casi di emergenza.
Anche il rischio di esposizione a rumore non è da sottovalutare, in prossimità delle turbine, si registrano normamente valori superiori a 70 dB di livello equivalente ma possono variare a causa della geometria degli ambienti esoprattutto dello stato di usura delle parti in movimento.
Durante le fasi di manutenzione i lavoratori sono esposti a rischi specifici:

■ caduta dall'alto nell'uso di scale o di trabattelli o piattaforme o comunque da zone in quota con presenza o meno di parapetti;
■ scivolamento per superfici sconnesse o con presenza di liquidi scivolosi;
■ caduta di oggetti più o meno voluminosi durante le operazioni di sollevamento di parti delle attrezzature.
■ traumi legati all'uso di utensili manuali.
■ rischio chimico connesso all'utilizzo di lubrificanti, vernici ecc. e all'inalazione di polveri;
■ rischi connessi all'uso di attrezzature a pressione;
■ rischio elettrico.
Gli spostamenti per raggiungere gli invasi e le centrali idroelettriche possono essere occasione d'infortunio perché le vie di comunicazione sono spesso difficili da percorrere ed in alcuni casi è addirittura necessario l'utilizzo di mezzi speciali come l'elicottero. Le condizioni di percorribilità possono inoltre risentire fortemente delle condizioni climatiche: nebbia, pioggia, gelo, neve.
In occasioni di attività di revamping è necessario integrare la valutazione dei rischi con quanto si può verificare utilizzando, anche se temporaneamente, attrezzature di sollevamento speciali, impianti elettrici di supporto, compressori, trabattelli scale ecc. Qualora previsto occorrerà denunciare ad Inail i nuovi impianti e prevedere le verifiche periodiche necessarie. E' importante assicurare al personale la necessaria formazione per l'utilizzo delle nuove attrezzature o comunque sulle interferenze delle attività qualora affidate a ditte esterne.

3. I rischi per i lavoratori nelle attività di Revamping.

In ogni sito produttivo arriva un momento in cui non è più possibile eseguire una efficace manutenzione a causa della difficolta di riparare le parti invecchiate e spesso per l'impossibilità di reperire i pezzi di ricambio oppure si sceglie di sostituire gli impianti con altri più moderni.
Per le centrali idroelettriche questo momento, rappresenta una occasione per migliorare la produttività ma anche e soprattutto per migliorare la sicurezza dell'impianto e quindi salvaguardare la salute e sicurezza dei lavoratori e delle popolazioni del territorio circostante.
Le vecchie centrali utilizzano soprattutto acqua fluente e normalmente non prevedono un riutilizzo, inoltre sono dotate di turbine a minor efficienza (Pelton, Francis) e di dispositivi di controllo di tipo analogico. In molti casi è inoltre difficile regolare la produzione in base alla richiesta della rete.
Le nuove centrali permettono di sfruttare anche risorse idriche di minore entità e sono dotate di sistemi digitali di automazione e monitoraggio. Le risorse idriche vengono sfruttate meglio ed è più facile adattare la produzione alla richiesta della rete.
Le attività di revamping possono interessare solo parte degli impianti o ridisegnare completamente la centrale. E' importante procedere preliminarmente al

coordinamento con le imprese che accedono occasionalmente alla centrale, si creano nuovi rischi e chi opera non conosce bene i luoghi.
Quando i miglioramenti prevedono solo l'adeguamento di impianti elettrici e degli impianti tecnologici con minimi lavori strutturali i rischi a cui sono esposti i lavoratori sono quelli tipicamente presenti nei cantieri e quindi rischi di caduta dall'alto, contatto con materiali, elettrocuzione ma non per questo meno importanti. Si svolgono attività diverse dall'ordinario ed è quindi necessario formare i lavoratori e prevedere opportune azioni di prevenzione, tra cui l'utilizzo di attrezzature e DPI idonei.
Quando il revamping prevede la sostituzione di componenti essenziali dell'impianto le valutazioni debbono essere necessariamente più complesse.
La scelta di effettuare il revamping scaturisce normalmente da uno studio di fattibilità che avrà giustificato l'investimento considerati i futuri vantaggi di produttività, sicurezza e rispetto dell'ambiente. Se l'adattamento comporta soprattutto un aumento di produttività, a parità di risorsa idrica, si può parlare anche di repowering. Nelle prime fasi della progettazione potrebbe essere necessario rilevare l'impianto esistente perché soprattutto se molto antico potrebbe essere difficile reperire i riferimenti originari. Già in questa fase potrebbe essere necessario l'intervento dei lavoratori con l'accesso in zone anguste con pericolo di caduta e/o con caratteristiche di ambienti confinato.
Successivamente occorre progettare il nuovo impianto reperendo i componenti da adattare alla struttura esistente oppure prevedere modifiche strutturali per installare componenti diversi. In questa fase e sempre necessario verificare le condizioni delle strutture preesistenti per verificare la compatibilità con i nuovi impianti e prevedere eventuali rinforzi.
La progettazione deve anche prevedere i rischi a cui saranno esposti i lavoratori in ciascuna fase dei lavori. I lavoratori dovranno operare in ambienti in cui non è prevista normalmente la loro presenza e quindi è necessario scongiurare i rischi legati agli spazi ristretti, alla movimentazione ed il possibile sganciamento di componenti pesanti oppure possibili allagamenti. Una speciale attenzione deve essere prestata in impianti in cui i lavori sono realizzati sotto il livello dell'acqua del bacino che alimenta la centrale.
A protezione del cantiere dovranno essere previsti sistemi di prevenzione che utilizzino sistemi automatici di rilevazione laser, scanner, telecamere ecc.
Questi sistemi possono restare a far parte integrante dei nuovi impianti o possono essere utilizzati solo nelle fasi di adeguamento.
Il revamping porta con sé le innovazioni tecnologiche e pertanto oltre agli altri vantaggi si potrà disporre in futuro di sistemi di rilevazione e controllo dell'impianto utilizzabili da remoto che riducono pertanto la presenza dei lavoratori in zone dell'impianto pericolose, o comunque poco adatte alla presenza di persone.

4. Le verifiche ispettive ed i controlli

Le centrali idroelettriche sono dotate di impianti ed attrezzature soggette a controlli da parte di Inail. Non sono soggetti ad obbligo di denuncia gli impianti di messa a terra come previsto dall'art.11 lettera e) del DM 12/9/59 per officine e cabine elettriche in esercizio presso aziende produttrici o distributrici di energia elettrica.
Sono invece soggetti a denuncia ad Inail, e quindi a verifica nei casi previsti, le attrezzature a pressione (D.M. 329/2004) e gli apparecchi di sollevamento (Art. 71 D.lgs. 81/08), impianti termici (D.M. 01.12.75).
In particolare, le attrezzature a pressione sono rappresentate dagli impianti idraulici che azionano le saracinesche di regolazione dei flussi d'acqua, i dispositivi idraulici di frenatura delle turbine e i dispositivi che impediscono il congelamento della superfice d'acqua nel bacino.
Tra le attrezzature per il sollevamento sono compresi ascensori, servoscale, gru, paranchi, piattaforme mobili, gruette.
Gli impianti termici possono essere utilizzati per mantenere i locali tecnici, le sale di controllo e le turbine ad una temperatura operativa ottimale durante l'inverno, o per evitare il congelamento dei lubrificanti o dell'acqua contenuta negli impianti.
Nelle centrali idroelettriche sono molto importanti i controlli periodici da parte di enti terzi come previsti dalle normative ma anche i controlli funzionali che debbono prevenire malfunzionamenti dovuti alla esposizione alle intemperie e comunque agli effetti dell'invecchiamento. Le centrali idroelettriche sono normalmente ubicate in zone impervie e quindi è difficile accedere a tutte le parti anche perché non è semplice sospendere l'attività o prevedere lo smontaggio delle varie parti dell'impianto. Questo lavoro deve essere svolto da operai specializzati e spesso anche abilitati ad attività di alpinismo.
Recentemente si è cominciato ad utilizzare i droni che permettono di raggiungere i luoghi da ispezionare visivamente. Queste attrezzature hanno però dei limiti legati alla durata delle batterie, alla difficoltà di operare in condizioni climatiche estreme, in particolare con velocità significative del vento, e non sono in grado di raggiungere tutte le parti dell'impianto particolarmente anguste.
Per il momento, le misure fisiche sui materiali (spessimetrie) realizzate con sensori trasportati da droni non producono ancora risultati attendibili.
In fase di revamping si potranno adottare scelte progettuali che facilitano le ispezioni ed installare sensori di monitoraggio elettronici in grado di segnalare più efficacemente eventuali anomalie.

5. Gli incidenti e gli infortuni.

Analizzando la banca dati Inail Infor.mo e le notizie di cronaca è possibile analizzare gli incidenti avvenuti recentemente in centrali idroelettriche.
In un caso un operaio stava rimontando una rete di sgrigliatura che impedisce l'ingresso nella turbina di materiali grossolani. Per svolgere questa operazione l'operaio si trovava in quota e non utilizzava una imbracatura anticaduta. L'impalcato

della rete di sgrigliatura era provvisoriamente fissato e muovendosi ha colpito l'operaio che decedeva per una grave frattura alla testa dopo essere caduto al suolo.
In un altro caso l'infortunato cadeva all'interno di un canale artificiale (di adduzione acqua ad una centrale idroelettrica) mentre effettuava lavori di taglio erba sugli argini. Decedeva per annegamento tendando di recuperare la visiera di protezione che era caduta in acqua.
Un ulteriore incidente è avvenuto nell'ambito dei lavori di realizzazione di una centrale idroelettrica. La fase di lavoro in cui era impegnato il lavoratore era quella delle prove tecniche di collaudo su un quadro elettrico della centrale elettrica. Mentre operava, il lavoratore toccava accidentalmente una delle barre in tensione nella cabina di trasformazione causando un arco voltaico con successivo sviluppo di fiamme che hanno avvolto l'infortunato. L'infortunato, non era qualificato PES per lavorare in tensione ed operava sul luogo da solo, senza collaboratori.
Ancora nella costruzione di una nuova centrale elettrica durante la movimentazione di un carico il braccio di una gru ha toccato il cavo dell'alta tensione. Il manovratore è stato investito dall'«arco» prodotto dai 15mila volt. L'operaio è finito a terra, ma non ha mai perso conoscenza.
Sempre durante la costruzione di una centrale elettrica un operaio di 59 anni è stato travolto da un mezzo meccanico. Secondo una prima ricostruzione, l'operaio sarebbe stato colpito da un escavatore in movimento, che lo ha scaraventato all'interno di uno scavo profondo diversi metri, provocandogli una caduta violenta e gravi traumi che lo hanno portato alla morte.
Un altro centrale un tecnico stava lavorando vicino ad alcuni quadri elettrici quando è stato investito all'improvviso da una fiammata potente che lo ha ferito al braccio e al volto provocandogli gravi ustioni.
Un operaio stava guidando un mezzo da lavoro quando, per cause ancora da verificare, è caduto in un burrone insieme al veicolo che stava conducendo. È rimasto così gravemente ferito, schiacciato dal mezzo, e ricoverato in gravi condizioni in codice rosso
Esistono inoltre in bibliografia incidenti che hanno coinvolto intere centrali provocando più vittime tra questi è possibile un recente caso italiano ed un caso verificatosi in Russia.
In un'altra centrale durante le fasi di collaudo dei lavori di revamping la rottura di un rotore di una dinamo, di nuova installazione, ha provocato delle fiamme e l'esplosione di materiali lubrificanti. Il crollo di un solaio ha provocato l'allagamento e la morte di 7 operai.
In una centrale idroelettrica realizzata 30 anni prima a causa della rottura di una delle 10 turbine, l'intera sala fu allagata, e parte del tetto crollò provocando la morte di 75 persone. Le indagini successive hanno mostrato che una delle turbine aveva perso i suoi ancoraggi e le forti vibrazioni registrate avrebbero dovuto consigliare un approfondimento che avrebbe potuto evidenziare che addirittura erano mancanti alcuni bulloni che ancoravano la turbina alla struttura.

6. Conclusioni

Le centrali idroelettriche presentano rischi legati alla normale conduzione degli impianti che in molti casi hanno provocato infortuni anche gravi. Gli infortuni presentati nel presente lavoro sono principalmente correlati al rischio elettrico, ai lavori in quota, al mancato utilizzo di DPI e quasi sempre ad un difetto di formazione.
Tra gli incidenti maggiori presentati quello riferito alla centrale idroelettrica Russa ha evidenziato come un mancato monitoraggio della struttura e quindi una mancata manutenzione ha provocato la perdita di numerose vite umane e danni ingentissimi alle strutture.
Se una centrale non è più sicura, non è possibile effettuare la manutenzione, non è sufficientemente produttiva, non ha un impatto ambientale sostenibile, può essere considerata la possibilità di effettuare un revamping.
Il rinnovamento deve essere attentamente progettato per valutare la fattibilità all'interno della precedente struttura, prevedendo i rischi a cui i lavoratori saranno esposti durante il revamping che sono molto diversi da quelli a cui sono esposti durante il funzionamento ordinario. In questo caso il luogo di lavoro diventa un cantiere che deve però adattarsi ad una situazione preesistente. Gli infortuni, mostrati in questo lavoro per situazioni di costruzione e revamping, hanno interessato lavoratori impegnati nel movimento terra, nel carico e scarico di materiali e nei lavori di natura elettrica. Come sempre un cantiere è caratterizzato dalla compresenza di ditte diverse, ciascuna specializzata in una specifica attività lavorativa, e si rende quindi necessario prevedere sin dall'inizio dei lavori il giusto coordinamento. In questa fase è fondamentale la consultazione di quanti lavoravano già nella centrale perché sono in grado di segnalare, a chi progetta il cantiere e la nuova struttura, le maggiori criticità. Questi ultimi possono essere anch'essi coinvolti nei lavori di revamping ma occorre fornire loro la giusta formazione per affrontare in sicurezza le mansioni assegnate, che sono anche molto diverse da quelle svolte in regime ordinario di funzionamento della centrale.
In particolare, un recente incidente ha mostrato quanto possa essere pericoloso l'adattamento di nuove macchine ad una situazione preesistente. Al primo avvio possono verificarsi situazioni pericolose dovute al non corretto funzionamento e bisogna essere preparati a gestire eventuali emergenze che si dovessero verificare quando i lavoratori addetti al collaudo sono presenti in aree in cui in regime ordinario non sarebbe prevista la loro presenza.
Il revamping di una centrale idroelettrica apporta sicuramente anche dei vantaggi in termini di sicurezza perché permette di introdurre innovazioni tecnologiche che permettono di monitorare da remoto le criticità riducendo quindi i rischi per i lavoratori, prevendo anche gli incidenti dovuti ad una mancata percezione di malfunzionamenti.

La formazione riveste come sempre un ruolo importante nella prevenzione degli infortuni ed è sicuramente più efficace quando si pone l'obiettivo di aumentare la consapevolezza dei lavoratori.
L'obiettivo di ricerca "*Analisi dei rischi e problematiche gestionali connesse alle apparecchiature delle centrali idroelettriche***"** inserito nel piano di attività Inail 2025-2025, proseguirà l'approfondimento di queste tematiche sperando di non dover far più tesoro dell'esperienza dovute agli infortuni occorsi ma soprattutto dalle buone pratiche adottate nei nuovi progetti di revamping.

Si ringrazia per la collaborazione C. Demarchi, L. Artaz - CVA Compagnia Valdostana delle Acque

Bibliografia

[1] DECRETO LEGISLATIVO 26 giugno 2015, n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. (15G00121) (GU Serie Generale n.161 del 14-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 38)
[2] https://www.dighe.eu/dati/grandi_dighe_italiane.htm
[3] https://indicatoriambientali.isprambiente.it/sys_ind/81
[4] Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro (G.U. n. 101 del 30 aprile 2008)
[5] Decreto del Presidente della Repubblica 22 ottobre 2001, n. 462 Regolamento di semplificazione del procedimento per la denuncia di installazioni e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche, di dispositivi di messa a terra di impianti elettrici e di impianti elettrici pericolosi. (GU Serie Generale n.6 del 8 gennaio 2002)
[6] Decreto Ministero delle attività produttive 1° dicembre 2004, n. 329. Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93. (GU Serie Generale n.22 del 28 gennaio 2005 - Suppl. Ordinario n. 10)
[7] Decreto Ministero del Lavoro e Della Previdenza Sociale 1° dicembre 1975. Norme di sicurezza per apparecchi contenenti liquidi caldi sotto pressione (GU Serie Generale del 06 febbraio 1976 (Supp. Ordinario alla gazzetta n. 33 del 06 febbraio 1976)
[8] AA VV Atti del seminario "L'Energia verde e il ruolo dell'Inail" Green Symposium Napoli 4 maggio 2023.
[9] P. Castellano et. Al. Gli apparecchi a pressione nelle centrali idroelettriche. Atti del convegno SAFAP 2018 Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione Bologna 28-29 novembre 2018. Inail.

[10] E. Bemporad et al. “Attrezzature con parti a pressione che presentano anche rischi trattati da altre direttive di prodotto”. Atti SAFAP 2018 Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione Bologna 28-29 novembre 2018. Inail.
[11] M. del Gaudio et Al. Fact Sheet Analisi dei rischi e problematiche gestionali connesse alle apparecchiature delle centrali idroelettriche. Inail 2018

Ispezione periodica di recipienti per trasporto di gas: analisi dei rischi riferita a un caso studio

G. Donato[2], C. Grazioli[1], P. Sergi[1]

[1]Inail – Uot di Messina
[2]C.I.M. S.r.l. Collaudi Impianti Manutenzioni - Messina

Sommario
Questo lavoro si riferisce alle ispezioni periodiche di recipienti per trasporto di gas compressi, liquefatti e disciolti, così come previste dalla 63^ Serie di Norme integrative al D.M. 12 settembre 1925 e dall'ADR ed.2025, secondo le indicazioni della norma UNI EN ISO 18119:2024. Le operazioni di verifica sono condotte presso i centri revisione autorizzati, in presenza di un tecnico collaudatore di Ente terzo (INAIL, Organismo Notificato), e prevedono la prova di pressione idraulica obbligatoria.
Il caso studio proposto focalizza l'attenzione sui rischi, ai fini della sicurezza dei lavoratori, connessi proprio alla prova idraulica; l'ambito di intervento è relativo a bombole di gas tecnici (CO2, Argon, O2, ecc.) e di aria respirabile, con una pressione di prova che varia, secondo i casi, da circa 250 bar a 450 bar. Sulla base dell'esperienza operativa, è stata condotta una analisi puntuale sui possibili rischi derivanti da cedimento, dovuto a distacco e/o cattiva tenuta, dei componenti sollecitati durante la prova, quali tubi e manichette di riempimento, raccordi o adattatori, guarnizioni, ecc., con possibili ripercussioni sulla sicurezza degli operatori presenti.
A seguito della valutazione, sono state proposte soluzioni, da una parte a livello impiantistico, dall'altra a livello procedurale (istruzioni di lavoro), aventi la finalità di ridurre sia la probabilità di rischio che i livelli di danno.
In conclusione, vengono presentati gli interventi, implementati nel caso in esame, utili a garantire la conduzione dell'impianto e delle prove in condizioni di sicurezza.

1. Introduzione

In questo lavoro viene analizzato il rischio specifico connesso alle operazioni di verifica di bombole contenenti gas vari. Il campo delle apparecchiature a pressione trasportabili risulta piuttosto articolato poiché comprende differenti tipologie di recipienti, differenziati in relazione al contenuto ed alla capacità.
La normativa stabilisce che le revisioni periodiche vengano effettuate ogni dieci anni, in presenza di uno degli Enti preposti, che sono l'INAIL, la M.C.T.C. (Motorizzazione Civile e Trasporti in Concessione), e gli 'Organismi di controllo e di prova periodici' (Organismi Notificati riconosciuti dall'Ente Unico Nazionale Accredia).
Le operazioni di verifica sono condotte alla presenza di un tecnico collaudatore di uno degli Enti sopra indicati, presso i centri revisione autorizzati. Qui i recipienti vengono preparati, tramite pulitura interna ed esterna; successivamente ogni singolo recipiente viene sottoposto alle seguenti prove:

- visita esterna: ispezione generale, mediante esame visivo, per verificare la buona conservazione e la presenza delle marcature per l'identificazione del recipiente;
- visita interna: controllo dello stato interno, mediante esame visivo, anche tramite endoscopio, per valutare difetti di corrosione o altro che possano compromettere la stabilità del recipiente;
- prova idraulica: verifica di tenuta del recipiente, che viene effettuata alla pressione indicata dal fabbricante e mantenuta per un tempo sufficiente (un minuto circa) ad osservare che non vi siano perdite e/o trasudamenti.

Lo studio focalizza l'attenzione sui rischi connessi specificatamente alla prova idraulica e si concentra sulla revisione di bombole non saldate, contenenti gas tecnici, quali ossigeno, miscela, argon, azoto, CO2, N2O, e aria respirabile, con una pressione di prova che varia, secondo i casi, da circa 225 bar a 450 bar.
Questo consente di concentrare le osservazioni e i dati disponibili, al fine di ottenere risultati chiari che possano essere utilizzati nella loro interezza, fermo restando la possibilità di esportare le considerazioni emerse ad altre casistiche.

2. Caso studio

Si analizza l'impianto utilizzato per la revisione periodica presso un centro autorizzato, di proprietà di una piccola azienda industriale operante nel settore meccanico. Durante l'esercizio, si sono registrate, in un arco temporale di circa 12 mesi, alcune anomalie di funzionamento. In alcuni casi si è avuto il distacco accidentale dei flessibili, sollecitati a pressione, con il conseguente effetto 'frusta'; oppure è stata riscontrata una lesione su qualche raccordo in ottone. In altri casi, l'incompleta aderenza tra flessibile e raccordo e/o tra raccordo e filettatura, ha causato un distacco del raccordo durante la prova in pressione, ed in un evento particolare, addirittura proiettando lo stesso fuori dall'area di lavoro della rampa di collaudo.
Al fine di migliorare le condizioni di sicurezza, è stata condotta un'analisi puntuale sui potenziali rischi derivanti dal cedimento dei componenti meccanici sollecitati durante la prova, con possibili ripercussioni sulla sicurezza degli operatori presenti.
La valutazione si è resa necessaria sia sul piano tecnico, per indagare gli strumenti e le attrezzature in dotazione, sia sul piano operativo, per attenzionare le procedure ed i comportamenti. I risultati sono stati sintetizzati tramite una matrice di rischio, che riporta la gravità dell'evento dannoso (D) sulle ascisse e la probabilità di accadimento sulle ordinate (P); in questo caso, danno e probabilità sono stati valutati in termini qualitativi, il rischio è dato poi dal prodotto dei due fattori (R=PxD).
Dall'analisi è emerso che, pur essendo contenuta la probabilità di accadimento di certi eventi, può risultare alta la percentuale di danno che ne consegue. In particolare, si deduce che lavorare con bombole in pressione comporta sempre rischi per gli operatori, che non possono essere compensati tramite l'uso dei soli dispositivi di

protezione. Si è ritenuto quindi di approfondire lo studio individuando tutti gli aspetti che compongono il quadro ed i possibili margini di miglioramento.
Nella figura seguente è riportata, a titolo esemplificativo, la matrice riferita ai principali fattori considerati in questo caso:

Probabilità (P)					
	4 molto probabile	Cedimento guarnizioni R=4	Distacco flessibile R=8	12	16
	3 probabile	3	6	Lesione raccordo R=9	12
	2 poco probabile	2	Guasto strumenti misura R=4	Errata posizione operatore R=6	Distacco raccordo R=8
	1 improbabile	1	2	Errata manovra R=3	4
Rischio (R=PxD)		1 lieve	2 modesto	3 grave	4 molto grave
		Danno (D)			

	Rischio grave
	Rischio significativo
	Rischio accettabile
	Intervallo di sicurezza

Figura 1. a) matrice di rischio riferita al caso studio; b) significato del diagramma.

Con riferimento alle norme di sicurezza, legali e aziendali specifiche, sono stati prima esaminati l'ambiente e gli spazi di lavoro, anche in rapporto alle attrezzature, poi indagati la rampa di collaudo, i tubi e le manichette di riempimento, i vari raccordi e adattatori. In seconda battuta si è rivalutata l'intera procedura interna, resa sotto la responsabilità del datore di lavoro, per individuare inosservanze delle istruzioni d'uso e manutenzione in essa specificate ed eventuali manovre non corrette che possano essere collegare agli eventi riscontrati.

3. Interventi realizzati

Viene presentata la sintesi dei principali interventi, scaturiti dalla valutazione fatta e realizzati nel rispetto normativo; vengono rappresentati facendo riferimento ai principali fattori osservati.

3.1 *L'ambiente di lavoro*

1) La zona di lavoro deve essere protetta da elementi di rischio che possono essere causa di incendio o esplosione, anche in considerazione delle alte pressioni di lavoro durante la prova idraulica.
Questo risulta garantito in quanto l'area destinata al collaudo è delimitata e separata dalle altre adibite ad attività di officina meccanica. Le bombole vengono svuotate e pulite internamente anche per eliminare eventuali residui di gas in esse contenuto (bonifica). Si tiene conto che, l'impianto utilizzato ha un funzionamento esclusivamente idraulico, e che quindi non apporta rischio in termini di incendio ed

esplosione; stessa cosa dicasi per l'impianto elettrico, che risulta realizzato nel rispetto delle norme tecniche applicabili e installato a distanza adeguata dalla rampa di pressatura.

2) L'area di lavoro occupata dagli operatori deve essere mantenuta libera da ostacoli che possano causare intralcio e permettere agli operatori di muoversi liberamente e di posizionarsi in modo ottimale rispetto all'attrezzatura durante le operazioni di collaudo.

La rampa per la pressatura viene collocata all'interno di una struttura metallica a gabbia: questa consente di separare la zona destinata alla prova in pressione dalle altre zone di lavorazione, ovvero di riempimento recipienti, di stoccaggio ed identificazione, di svuotamento e punzonatura.

3) La zona deve essere protetta dagli agenti atmosferici.

A tal fine la gabbia metallica con la rampa di collaudo sono posizionate nel locale coperto, dove si trova anche la zona riempimento e identificazione dei recipienti; nello spazio adiacente posto all'esterno si trovano invece la zona di stoccaggio, di svuotamento e punzonatura dei contenitori.

3.2 Soluzioni impiantistiche

1) La rampa di collaudo.

Viene rimodulato l'impianto per la prova idraulica dei recipienti, installando una rampa di collaudo, ancorata a muro, implementando i posti bombola da 4 a 8, ognuno dotato di valvola di intercettazione. La rampa sopporta una pressione massima di 500 bar, superiore ai parametri di esercizio; come in precedenza, è connessa ad una pompa per la pressurizzazione dell'acqua. In questo assetto entrambi i componenti, rampa e pompa, sono marcati CE e accompagnati da relativa certificazione.

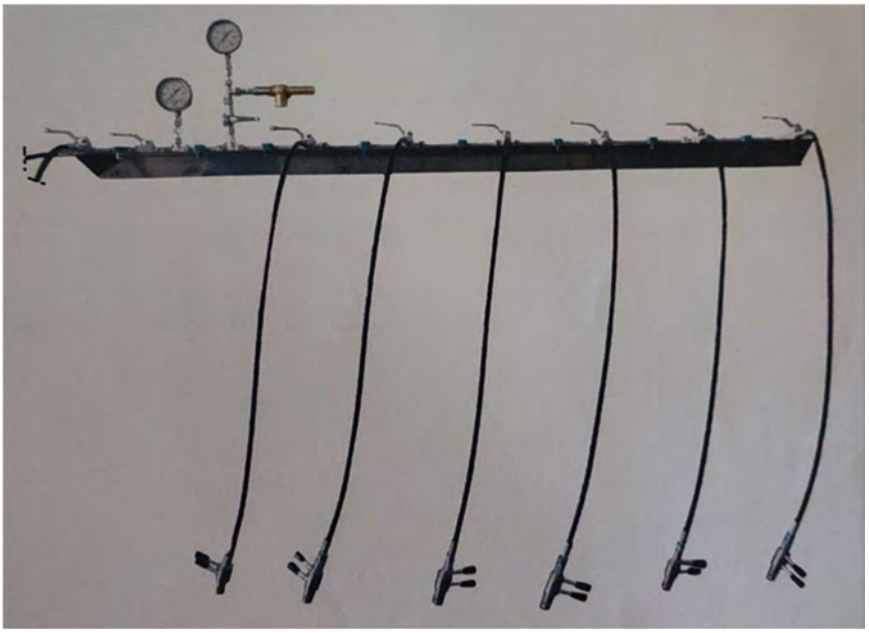


Figura 2. rampa di collaudo.

2) Accessori e strumenti.

Anche questi elementi sono valutati all'interno della matrice in funzione dell'incidenza sul rischio analizzato. Nel circuito di impianto la pompa è azionata da un compressore ad aria, con pressione di esercizio pari a 8 bar, ed è corredata di un manometro per alta pressione.

Tutti gli strumenti di misura utilizzati nel processo, quali i manometri, presentano scale di misura adeguate ai parametri di esercizio, sono regolarmente certificati e vengono tarati periodicamente.

3) Tubi flessibili.

Le manichette flessibili di collegamento sono realizzate assemblando componenti certificati per alta pressione, fino ad un valore di 640 bar, pari a 1,4 volte la pressione massima di esercizio dell'impianto. Gli attacchi, come già avveniva in precedenza, sono corredati di un "fermo" finale, in corrispondenza dell'innesto flessibile/raccordo.

4) Raccordi.

I raccordi sono realizzati in ottone, dotati di filettature diverse in funzione del tipo di bombole; vengono prodotti in officina meccanica esterna con caratteristiche di tenuta ad alta pressione. Per garantire questa tenuta, un campione di raccordi è stato sottoposto a prova di scoppio presso un centro qualificato a livello nazionale, per determinare la pressione massima applicabile. La prova è stata eseguita a temperatura di 20°C con l'ausilio di una pompa idropneumatica, tramite incremento graduale di pressione, determinando un valore a rottura di 736 bar, di molto superiore a quello di esercizio in impianto ovvero 1,6 volte la pressione max di 450 bar.



Figura 3. foto rottura del raccordo.

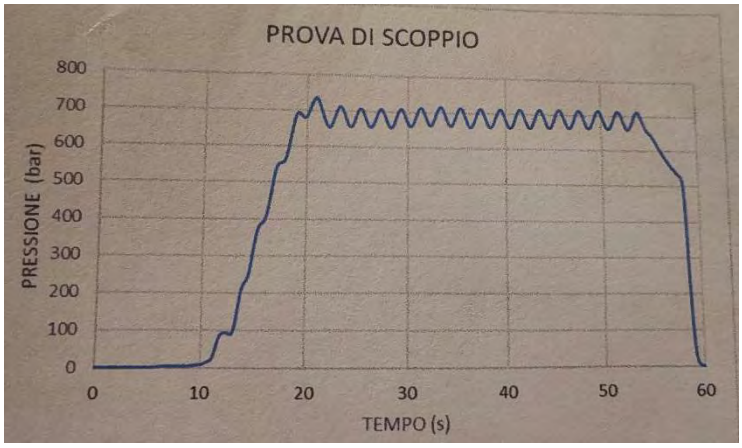


Figura 4. grafico della prova di scoppio del raccordo.

5) La gabbia metallica.

Come già detto in precedenza, la rampa di collaudo è collocata all'interno di una struttura metallica a gabbia, utile a delineare l'area di pressatura, ma anche a garantire sufficiente resistenza meccanica contro gli urti accidentali, determinati da

eventuale proiezione di piccoli componenti durante la prova. Questa struttura è realizzata a mezzo di grigliato in acciaio zincato di classe 2, con una portata pari a 25.000daN/m2 e presenta una maglia di dimensioni adeguate; la copertura della gabbia è invece realizzata con un pannello di alluminio di spessore pari a circa 1cm.



Figura 5. foto della gabbia metallica in acciaio zincato.

3.3 *Istruzioni operative*

Nell'impianto descritto è sempre l'operatore a gestire le operazioni di collaudo e verificare quindi tutti i seguenti passaggi:

- la posizione delle valvole di intercetto;
- che gli adattatori siano connessi alle bombole in maniera corretta;
- la corretta pressione di collaudo in base al tipo di bombole;
- il raggiungimento della pressione necessaria tramite gli strumenti di misura;
- che il collaudo sia eseguito con acqua;
- che le bombole siano bloccate in modo da evitare cadute accidentali;
- che sia correttamente avvitato il raccordo sulla bombola;

- che non venga superata la pressione massima consentita.



Figura 6. foto del manometro per la pressatura



Figura 7. foto degli intercetti per le manovre

Per questo motivo, è stato revisionato ed implementato da parte del datore di lavoro, il documento interno relativo alle procedure di lavoro, con l'intento di valutare, ed eventualmente migliorare le istruzioni ed i comportamenti dei lavoratori.

1) Ruoli e mansioni.

Nonostante le dimensioni ridotte dell'azienda, sono stati definiti in maniera univoca i ruoli, i compiti e le responsabilità di ogni figura presente nell'organigramma aziendale; questo per evitare da un lato inutili sovrapposizioni di funzioni, e dall'altro per mantenere un monitoraggio costante in tutte le fasi del processo. Le istruzioni operative vengono condivise con tutti i soggetti operanti a vario titolo durante le prove, compresi i tecnici esterni, così che ognuno abbia contezza delle manovre, dei tempi, degli spazi e delle posizioni da rispettare durante le diverse fasi della seduta di collaudo.

2) Controllo del processo.

Le unità di personale addetto alle operazioni di revisione, oltre le specifiche mansioni, hanno sempre il compito di attenzionare le diverse fasi di lavorazione, nel modo seguente:

- coordinare il processo relativo alle ispezioni periodiche;
- verifica dell'efficienza degli strumenti a disposizione;
- segnalazione e raccolta di eventuali anomalie di processo o di prodotto;
- autovalutazione con registrazione periodica;
- valutare costantemente i risultati dell'autovalutazione per individuare eventuali azioni correttive a sostegno del miglioramento continuo.

L'obiettivo è migliorare l'efficienza organizzativa attraverso un approccio basato sulla 'gestione' dei rischi per prevenire effetti indesiderati.

3) Formazione interna.

A cura del datore di lavoro è stata fornita al personale addetto alle operazioni di revisione adeguata formazione interna, in parte a carattere generale ed in parte in forma specifica, in relazione al compito o mansione di ogni unità di personale. L'attività formativa viene registrata dal datore di lavoro e rinnovata periodicamente con cadenza annuale, oppure a seguito di modifiche all'impianto o in funzione di eventi significativi.

3.4 *Manutenzione e controlli*

Insieme al documento con le istruzioni operative, è stato implementato un piano di manutenzione e controlli periodici sull'impianto da rispettare in maniera puntuale. Il piano fissa scadenze e periodicità in forma più stretta che in precedenza, in modo da avere un miglior monitoraggio di attrezzature e strumenti. In esso vengono definiti i parametri di intervento a regime ordinario: per esempio, vietando l'uso di ricambi non originali e modifiche eseguite sulle attrezzature, in quanto possono ridurre la sicurezza.

1) Rampa e manichette.

E' previsto che la rampa venga verificata ogni 6 mesi, pressando alla massima pressione ammissibile, che nel caso specifico risulta pari a 500 bar. Le manichette invece devono essere sostituite ogni 5 anni o al presentarsi di criticità come perdite e/o usura accentuata.

2) Raccordi e accessori.

I raccordi in ottone che collegano la bombola alle manichette devono essere controllati al termine di ogni sessione di collaudo per accertarne la perfetta integrità. E' previsto che vengano comunque sostituiti al primo insorgere di difetti.

Pari manutenzione viene richiesta per tutti gli altri accessori, guarnizioni, rubinetti di intercetto, ecc. Il manometro installato deve essere verificato ad ogni seduta di collaudo, per accertare che la taratura sia in corso di validità (< 1 anno).

3) Registro di manutenzione.

In ottemperanza alle norme vigenti, tutti gli interventi vengono inseriti su apposito registro sotto la responsabilità del datore di lavoro.

4. Osservazioni aggiuntive

Quanto esposto finora ha consentito di migliorare le condizioni generali in termini di sicurezza evitando l'accadimento di eventi negativi, sostanziando quindi una notevole riduzione dei rischi legati alla prova idraulica. Il risultato è concreto, ma, si vuole anche proporre in forma sperimentale un aggiornamento dell'impianto, allo scopo di aumentare la sicurezza degli operatori preposti alla pressatura.

Dato che la gabbia metallica è l'elemento che costituisce un limite fisico per separare la zona interessata da alte pressioni, si è valutato di dislocare al suo esterno un sistema di comandi, in modo da collocare l'operatore in una posizione ottimale. La

gestione delle manovre è affidata ad una catena di attuatori meccanici che fornisce, ad ogni passaggio, il consenso successivo.
I posti bombola sono azionati tramite valvole pneumatiche, una per ogni coppia di manichette (n.4 in totale), poste dentro la gabbia, ma azionate da altrettante valvole manuali i cui comandi sono traslati all'esterno. Un'altra valvola pneumatica viene collegata al circuito di spurgo della rampa e consente di scaricare l'impianto al termine della prova idraulica; la stessa è collegata ad un sistema di pistoni che bloccano la porta della gabbia quando l'impianto viene messo in pressione. In pratica, chiudendo lo spurgo si aziona la valvola che comanda i pistoni di bloccaggio per la porta di accesso all'impianto, si può quindi agire sul comando che avvia la pompa per la pressurizzazione; viceversa, all'apertura della valvola di spurgo si apre la valvola pneumatica corrispondente, consentendo ai pistoni di sbloccare la porta per poter accedere all'interno.
Il circuito così concepito lavora ad una pressione di circa 5 bar, in modo da non introdurre ulteriori rischi nella gestione dell'impianto. In ogni caso sarà sempre l'operatore ad eseguire la manovra di apertura e chiusura delle valvole pneumatiche utilizzando le apposite leve manuali poste sul quadro comandi esterno, sia all'inizio che alla fine della pressatura.
L'implementazione di questo sistema richiederà a sua volta un apposito protocollo di gestione e istruzioni a cura del datore di lavoro, che andrà ad integrare quanto già consolidato.



Figura 8: comandi manuali posti all'esterno



Figura 9: foto delle valvole pneumatiche poste all'interno

5. Osservazioni conclusive

A seguito degli interventi fatti, trascorso un periodo di regolare esercizio, non si sono più verificati i problemi riscontrati in precedenza. Questo ci consente di esprimere alcune considerazioni in proposito.

Come viene spesso ribadito, investire in sicurezza in un ambiente produttivo è un costo che può essere ammortizzato e convertito in benefici. Contrariamente a quanto si possa pensare, questo è applicabile anche nel caso di aziende di dimensioni ridotte, in quanto i vantaggi attesi sono tanto più evidenti quanto più l'azienda è piccola.

L'adempimento degli obblighi di legge è fondamentale per rispettare i requisiti minimi di sicurezza, ma si evidenzia quanto il riferimento a norme tecniche specifiche su base volontaria sia d'apporto al miglioramento delle condizioni generali. I vantaggi si colgono non solo in termini di sicurezza, ma anche di maggiore efficienza, aumento della produttività e miglioramento delle condizioni di lavoro.

Tutto questo si ottiene consolidando la consapevolezza che è necessario prestare attenzione ai diversi fattori che compongono il quadro, in quanto tutti di pari importanza.

L'adozione di attrezzature certificate garantisce l'esecuzione di una serie di controlli già in fase di costruzione, in più fornisce, attraverso i manuali rilasciati dal fabbricante, una generale valutazione dei rischi, le istruzioni d'uso ed il programma di manutenzione da effettuare.

Tramite i cicli di prova e le manutenzioni periodiche, si riesce a garantire il buon funzionamento e la tenuta di tutti i componenti in uso nell'impianto a pressione.

Tutto questo rappresenta un apporto positivo nell'ambito della valutazione del rischio, e migliora quindi la sicurezza, come espresso nella nuova matrice di rischio, elaborata a seguito degli interventi.

Probabilità (P)					
	4 molto probabile	4	8	12	16
	3 probabile	3	6	9	12
	2 poco probabile	Cedimento guarnizioni o Distacco flessibile R=2	Guasto strumenti misura R=4	Lesione raccordo R=6	8
	1 improbabile	Errata posizione operatore 1	Errata manovra R=2	Distacco raccordo R=3	4
Rischio (R=PxD)		1 lieve	2 modesto	3 grave	4 molto grave
		Danno (D)			

Figura 10. matrice di rischio elaborata dopo gli interventi migliorativi.

Ma soprattutto l'organizzazione del luogo di lavoro e dei processi rappresenta un elemento determinante per implementare soluzioni migliorative e dare apporto positivo all'interno della matrice. Come se non bastasse, contribuisce anche a promuovere un clima favorevole nell'ambiente di lavoro, a tutela e a soddisfazione dei lavoratori coinvolti.
Infine, mantenere in continua evoluzione la ricerca di soluzioni sempre più specifiche, supportate magari da sistemi tecnici di livello adeguato, si presenta come garanzia di un trend positivo nell'ambito dell'analisi dei rischi.

Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale 12 settembre 1925 – Approvazione del regolamento per le prove e le verifiche dei recipienti destinati al trasporto per ferrovia dei gas compressi, liquefatti o disciolti
[2] 55° Serie di Norme Integrative al D.M. 12/09/25
[3] Direttiva Quadro 2008/68/CE, recepita in Italia mediante il D.lgs. 27/01/2010 n.35
[4] Direttiva 2010/35/UE, recepita in Italia mediante il D.lgs. n.78 del 12 giugno 2012
[5] Regolamento Internazionale ADR edizione 2025 - Accordo europeo relativo al trasporto internazionale di merci pericolose su strada
[6] Norma UNI EN ISO 18119:2021 - Bombole per gas - Bombole e tubi per gas di acciaio e di lega di alluminio senza saldatura - Ispezione periodica e prove
[7] Decreto Ministeriale n.81 del 09 aprile 2008 – Testo Unico per la sicurezza nei luoghi di lavoro
[8] Direttiva Macchine 2006/42/CE, recepita in Italia mediante il D.Lgs. 27/01/2010 n.17
[9] UNI 11002-1 - Pannelli e gradini di grigliato elettrosaldato e/o pressato - Parte 1
[10] Norma ISO 9001:2015 – Sistema di gestione della qualità
[11] M. Giuffrida, C. Grazioli, M. Platania, P. Sergi – "Apparecchiature a pressione trasportabili: il quadro attuale per le revisioni periodiche" – Safap 2014
[12] Manuali d'uso e manutenzione delle attrezzature
[13] Schede tecniche dei componenti
[14] Piano di Sicurezza della azienda

Jet fire di gas naturale in uno stabilimento di soglia superiore: approfondimenti post incidentali, revisione dell'analisi del rischio, misure correttive tecniche e gestionali

S. Campana[1], R. Iovene[2], R. Vasile[2], A. Morettini[3]

[1]Arpa Abruzzo
[2]Inail - UOT di Pescara
[3]Inail - UOT di Campobasso

Sommario
In uno stabilimento soggetto agli obblighi del d.lgs. 105/2015 è occorso un incidente con innesco di jet fire, in seguito al rilascio di gas naturale in pressione da un foro di piccole dimensioni. L'analisi post incidentale ha individuato nella rottura di un tappo filettato di un pressostato differenziale l'origine del rilascio, conseguente ad un'erronea modalità di manutenzione dello strumento.
Scopo del lavoro è illustrare gli approfondimenti svolti e le lezioni apprese dall'analisi dell'incidente rilevante occorso.
Lo studio delle modalità di accadimento dell'evento ha messo in luce gli aspetti da migliorare, quali: le procedure di manutenzione, l'analisi di rischio, le misure di rilevazione incendi e la gestione dei dispositivi di emergenza e di sfiato presenti presso lo stabilimento.
L'accadimento dell'incidente rilevante, che ha comportato danni alle apparecchiature, ma non alle persone, ha condotto il Gestore dello stabilimento ad una revisione completa dell'analisi del rischio e del sistema di gestione della sicurezza, e ciò ha consentito di individuare le misure tecniche e le misure gestionali strutturali da adottare per evitare il ripetersi di una tale tipologia di evento.

1. Premessa

Il presente articolo descrive gli esiti degli approfondimenti post incidentali svolti a seguito di un evento incidentale occorso in uno stabilimento soggetto agli obblighi della Direttiva Seveso ter.
L'incidente, che non ha determinato danni alle persone e all'ambiente, ha consentito di individuare diversi aspetti di miglioramento relativi all'analisi di rischio, alla dotazione impiantistica, alle procedure di manutenzione, alle prove dei sistemi di sicurezza ed alle azioni di intervento in emergenza.
L'approfondimento di quanto accaduto consente di fornire elementi di carattere generale per il miglioramento dei sistemi di gestione della sicurezza.

2. Descrizione dell'evento incidentale

Lo stabilimento nel quale si è verificato l'incidente rientra nell'ambito di applicazione del d.lgs. 26 giugno 2015, n. 105 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al

controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose", in quanto detiene gas naturale in quantitativi superiori alle soglie dell'allegato 1, parte II, punto 18, del decreto stesso.
L'evento incidentale è occorso al di fuori del normale orario di lavoro, quando lo stabilimento non era presidiato ma gestito a distanza mediante sistemi di telecontrollo.
Il tratto di tubazione interessato, collegato ad una colonna di disidratazione del gas, era in esercizio alla pressione di 70 bar quando si è verificata una perdita di gas naturale e successivo incendio (jet fire), che ha coinvolto la tubazione stessa ed alcune apparecchiature.
Il sistema di controllo ha rilevato un'anomalia di processo ("blocco colonna" per incongruenza fine corsa di una valvola di blocco SDV) e la sala operativa ha allertato la squadra di reperibilità, che è intervenuta rapidamente, in quanto già presente sul luogo, a causa di un precedente intervento, verificatosi in un'altra zona dello stabilimento.
Il personale reperibile, resosi conto dell'incendio in atto, dopo circa 10 minuti ha attivato il Piano di Emergenza Interna ed azionato manualmente, mediante apposito sistema a distanza, la procedura di blocco di emergenza con svuotamento degli impianti. Sono stati immediatamente avvisati i Vigili del Fuoco che sono arrivati sull'impianto in pochi minuti.
Il personale del CNVVF, grazie alla presenza della squadra di emergenza dell'azienda, ha potuto prontamente accedere nello stabilimento, provvedendo a raffreddare mediante idranti tutte le apparecchiature prossime all'incendio, utilizzando la riserva idrica dello stabilimento.
I dipendenti dell'azienda, resisi conto che l'abbassamento della pressione nella tubazione e nella colonna di disidratazione non era sufficientemente rapido, hanno cercato di avviare nuovamente il blocco di emergenza a distanza, con sfiato delle apparecchiature; rilevato il funzionamento anomalo della valvola di blow down (BDV), che convogliava lo sfiato del gas presente nella tubazione in torcia di emergenza, dopo circa 20 minuti, verificata la possibilità di accesso in sicurezza, hanno aperto manualmente la valvola di bypass della BDV. L'incendio si è infine spento dopo circa due ore.

3. Descrizione della parte di impianto coinvolta nell'incidente

L'evento ha riguardato la sezione di impianto nella quale il gas naturale viene preventivamente disidratato in apposite colonne, mediante passaggio in controcorrente con glicole trietilenico, e successivamente distribuito alla rete nazionale. La distribuzione in rete avviene mediante pressostati differenziali che, rilevando l'abbassamento della pressione nella rete di distribuzione, regolano le necessità di fornitura del gas dall'impianto.
Il gas è alimentato alle colonne di disidratazione e fuoriesce dalle stesse mediante tubazioni di diametro 16", sulle quali sono montate valvole di blocco (SDV) in ingresso

e in uscita. Tutte le valvole di blocco sono comandate automaticamente dal sistema delle logiche di blocco, o manualmente dal DCS o dal quadro locale, e consentono di isolare, in caso di necessità, le diverse sezioni di impianto. Ogni valvola di blocco è provvista di valvola di by-pass, anch'essa attuata pneumaticamente.
Sulla linea da 16" in uscita da ciascuna colonna è presente uno stacco da 2" su cui è installata una valvola di blow down (BDV), che interviene depressurizzando la colonna e le linee collegate. Anche in questo caso, per ciascuna BDV è presente una linea di by-pass dotata di valvola manuale.
I sistemi di sicurezza presenti nell'impianto sono:

- Sistemi di rilevazione incendio con rete a tappi fusibili, costituiti da una rete di tubazioni, pressurizzate con aria a 4 bar, dotata di tappi fusibili, posta nelle immediate vicinanze delle apparecchiature. Tali tappi sono costituiti da una lega metallica che, in caso d'incendio, fonde ad una temperatura di circa 70°C. La depressurizzazione che così si genera attiva le procedure di messa in sicurezza dell'impianto. L'azionamento può essere anche manuale agendo su una valvola di emergenza protetta sottovetro.
- Sistemi di estinzione costituiti da:

- Attrezzature mobili antincendio (estintori portatili e carrellati);
- Rete idranti antincendio con idranti sopra suolo dotati di attacco UNI 70 completi di cassetta antincendio.

- Sistemi di blocco costituiti da:

- Blocco di emergenza, con sezionamento dell'impianto mediante chiusura valvole di blocco (SDV) e depressurizzazione generale dell'impianto mediante valvole di blow down (BDV), attivato automaticamente a seguito di rilevazione incendio o manualmente (in loco e a distanza);
- Blocco di processo, con intercettazione di tutte le sezioni di impianto senza depressurizzazione mediante chiusura delle SDV, attivato automaticamente dalle logiche di blocco o manualmente (in loco e a distanza);
- Blocco locale, con intercettazione di una singola unità di impianto, mediante chiusura delle SDV, effettuata dal sistema di automazione a seguito dell'intervento delle logiche di blocco oppure manualmente dall'operatore (in loco e a distanza).

Tutte le valvole di blocco impianto o SDV (Shut Down Valve) sono del tipo 'fail-safe', comandate automaticamente dal sistema integrato di sicurezza e manualmente da DCS o localmente dal pannello locale, corredate dagli interruttori di fine corsa e da un polmone di aria strumenti, che garantisce tre manovre dell'otturatore, anche in caso di mancanza aria strumenti.
Il ripristino dei vari blocchi può essere eseguito solo ed esclusivamente intervenendo localmente sulle singole apparecchiature, previa verifica ed eliminazione della causa del blocco.
Per la rilevazione delle perdite di gas è installato un sistema fonometrico, composto da un microfono sensibile al rumore e da un fonometro.

4. Approfondimenti post incidentali

A seguito dell'evento, il Comitato Tecnico Regionale ha disposto una verifica ispettiva straordinaria, tenuto conto di quanto stabilito dall'art. 27 c. 7 del d.lgs. 105/15 "*Le ispezioni straordinarie sono disposte dalle autorità competenti in materia di rischio di incidente rilevante, con oneri a carico dei gestori, di propria iniziativa o su richiesta del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, allo scopo di indagare, con la massima tempestività, in caso di denunce gravi, incidenti gravi e «quasi incidenti», nonché in caso di mancato rispetto degli obblighi stabiliti dal presente decreto*".

L'ispezione aveva, fra i suoi obiettivi, quello di raccogliere le informazioni necessarie per effettuare un'analisi completa degli aspetti tecnici, organizzativi e gestionali dell'incidente e per l'adozione delle misure consequenziali previste dall'art. 25 co. 3 del d.lgs. 105/2015.

Infatti, l'art. 25 c. 3 del d.lgs. 105/15 stabilisce che "*a seguito di un incidente rilevante occorso in uno stabilimento di soglia superiore il CTR o, se l'incidente è occorso in uno stabilimento di soglia inferiore, la Regione o il soggetto da essa designato:*

a) raccoglie, mediante ispezioni, indagini o altri mezzi appropriati, le informazioni necessarie per effettuare un'analisi completa degli aspetti tecnici, organizzativi e gestionali dell'incidente;

b) adotta misure atte a garantire che il gestore attui le misure correttive del caso;

c) *formula raccomandazioni sulle misure preventive per il futuro.*

Il mandato ispettivo disponeva che la Commissione dovesse ispezionare gli aspetti del SGS-PIR relativi all'evento incidentale e, attraverso un esame pianificato e mirato dei sistemi tecnici, organizzativi e di gestione applicati nello stabilimento, dovesse verificare la conformità del sistema di gestione della sicurezza ai contenuti richiesti dall'allegato B del d.lgs. 105/2015, l'adozione da parte del gestore delle misure e dei mezzi previsti per la prevenzione degli incidenti rilevanti e per la limitazione delle loro conseguenze, nonché la conformità delle azioni correttive messe in atto con riferimento all'evento.

La Commissione ispettiva ha effettuato dei sopralluoghi presso lo stabilimento, prendendo visione dello stato dei luoghi e, sulla base delle evidenze raccolte, ha chiesto al Gestore di approfondire le possibili cause dell'incendio.

Dagli approfondimenti svolti, è risultato che la perdita di gas ha avuto luogo in corrispondenza di uno dei pressostati differenziali posti sulle tubazioni in uscita da una delle colonne di disidratazione del gas naturale. La zona interessata dall'incendio e dai suoi effetti termici è risultata circoscritta ad un'area di raggio di circa 6 metri dal punto di fuoriuscita del gas.

Il punto di fuoriuscita del gas è stato individuato in corrispondenza dello spurgo di dimensioni 12,5 mm di uno dei pressostati differenziali che azionano le valvole di collegamento fra la colonna di disidratazione e il collettore di uscita DN 30. A monte del citato spurgo è presente una valvola a spillo di dimensioni di 6,5 mm che, di fatto, ha costituito il diametro di rottura.

Lo sviluppo del jet-fire è risultato compatibile con una fuoriuscita di gas da un foro delle suddette dimensioni. Nelle normali condizioni di funzionamento il foro di spurgo è chiuso da un apposito tappo filettato che è stato espulso dalla sua sede e rinvenuto ad alcuni metri di distanza.
Il pressostato, installato nel 2009, non era considerato un componente critico nel Sistema di Gestione della Sicurezza dell'azienda; per tali apparecchiature, era prevista la manutenzione con cadenza annuale, secondo una apposita procedura operativa.
Una volta individuato il punto di rilascio, il CTR, per il tramite della Commissione ispettiva, ha effettuato e richiesto diversi approfondimenti tecnici, i cui esiti hanno consentito di individuare le cause tecniche e gestionali alla base dell'evento ed alcune problematiche nella rilevazione e nella gestione del rilascio e dell'incendio, che vengono di seguito riassunte, insieme alle azioni di miglioramento adottate.

4.1. Le cause dell'espulsione del tappo del pressostato

Dagli approfondimenti svolti, il Gestore ha individuato due cause iniziatrici dell'espulsione del tappo del pressostato: un'errata procedura di manutenzione, sulla base della quale veniva utilizzato, in luogo della corretta linea di connessione, lo sfiato dello strumento aprendo il relativo tappo filettato, ed un erroneo serraggio dello stesso nel corso di una delle manutenzioni.
Nello specifico, a seguito dell'evento, il Gestore ha rilevato che gli operatori effettuavano le operazioni di manutenzione dei pressostati svitando il tappo del sistema di spurgo del pressostato stesso. Questa modalità operativa non è prevista nel manuale di uso e manutenzione dell'apparecchiatura, che indica invece il corretto collegamento da utilizzare per le operazioni di manutenzione.
Tuttavia, la procedura operativa del SGS aziendale, relativa alla manutenzione dei pressostati, era piuttosto generica e non esplicitava quale collegamento occorresse utilizzare per la manutenzione.
La scelta di utilizzare il sistema di spurgo da parte degli operatori, in assenza di indicazioni precise, era motivata dal fatto che il collegamento corretto risultava coibentato mediante lana di roccia e alluminio, in quanto la depressurizzazione del gas ne determinava il raffreddamento, con il rischio di congelamento dell'umidità dell'aria esterna. Pertanto, effettuare le attività di manutenzione attraverso tale collegamento risultava più laborioso, dovendo rimuovere e poi ripristinare la coibentazione, rispetto alla semplice svitatura del tappo filettato.
Successivamente per comprendere perché proprio quel tappo filettato fosse stato espulso, il Gestore ha provveduto ad inviarlo ad un'azienda specializzata nell'analisi dei componenti meccanici.
Le analisi svolte, distruttive e non distruttive, hanno consentito di rilevare l'assenza di anomalie di fabbricazione dei componenti, sia da un punto di vista chimico che meccanico. Il relativo rapporto del laboratorio di analisi ha concluso ritenendo plausibile che il sistema tappo di spurgo si sia rotto a causa di un errato serraggio in fase di manutenzione, in quanto presentava una deformazione della filettatura,

imputabile ad un non corretto serraggio, in occasione di una delle precedenti manutenzioni. Tenuto conto che il tappo opera su gas a pressione di almeno 70 bar, questo potrebbe aver determinato l'espulsione del tappo dalla sede.
Allo scopo di prevenire il ripetersi dell'evento o di altri eventi analoghi, il Gestore ha adottato le seguenti misure correttive:

- verifica dell'integrità di tutti i pressostati presenti nello stabilimento;
- installazione di sistemi tecnici sui pressostati che consentono di effettuare l'operazione di manutenzione in modo più agevole, così da ridurre il rischio di errore umano;
- modifica della procedura operativa di manutenzione dei pressostati, con indicazione chiara delle corrette modalità di esecuzione;
- informazione, formazione e addestramento del personale sulle corrette modalità di esecuzione delle operazioni di manutenzione dei pressostati.

E' stata poi focalizzata l'attenzione su ulteriori tre problematiche, chiedendo al gestore di estendere alcuni approfondimenti anche alle restanti apparecchiature sulla base di quanto emerso. Nello specifico, è stata evidenziata la necessità di ampliare ed approfondire l'elenco delle apparecchiature critiche, considerato che il pressostato non era considerato come critico. In secondo luogo, è stata posta l'attenzione sulla necessità di approfondire lo stato di tutti i componenti di impianto che, come i pressostati, sono piuttosto datati e per i quali non è noto il tempo di vita utile. In ultimo è stata rilevata la necessità che il Gestore revisionasse tutte le procedure operative di manutenzione per renderle più dettagliate e per verificarne la coerenza con i libretti di uso e manutenzione.
Pertanto, è stato prescritto all'azienda di adottare le seguenti ulteriori misure:

- integrare l'elenco dei componenti critici, anche secondo quanto messo in evidenza dall'evento incidentale occorso, con tutti gli elementi impiantistici che rientrano nella definizione dell'allegato H al d.lgs. 105/15: *"sistemi tecnici critici": apparecchiature, serbatoi, componenti e dispositivi di controllo, protezione e sicurezza coinvolti negli scenari incidentali ipotizzabili nello stabilimento o desunti dall'analisi dell'esperienza operativa, a titolo esemplificativo inserendo anche le pipeline, i collettori, le apparecchiature e tutti gli elementi che li costituiscono;*
- riesaminare ed aggiornare tutte le procedure operative di manutenzione in modo da renderle dettagliate e perfettamente coerenti con i libretti di uso e manutenzione, effettuando la necessaria formazione;
- sottoporre a monitoraggio le apparecchiature e le componenti impiantistiche critiche datate, per le quali non è stato definito dal costruttore un "tempo di vita utile", attraverso sistematici controlli non distruttivi volti a definirne l'effettivo stato di conservazione e l'affidabilità. A tale scopo, è stato richiesto all'azienda di stilare un elenco dei componenti con le date di installazione e, tenuto conto dell'analisi del rischio (funzione svolta, tipo di sollecitazioni cui sono sottoposti, eventuali conseguenze di un rilascio, ecc.) definire le priorità di verifica, i controlli da attuare e la relativa periodicità, secondo un programma di RBI.

4.2. Approfondimenti sul sistema di rilevazione dell'evento

La fuoriuscita di gas ed il successivo incendio non sono stati rilevati dai sistemi presenti, ma solo indirettamente da una segnalazione di errore di un fine corsa della valvola, probabilmente interrotto dalla combustione della connessione elettrica.
Infatti, pur se presente un sistema fonometrico, predisposto proprio per rilevare piccole perdite, lo stesso non ha evidenziato la perdita. L'azienda ha imputato il mancato funzionamento del sistema fonometrico, al fatto che il foro di uscita del gas aveva diametro inferiore (6,5 mm) a quello minimo che il sistema stesso è in grado di rilevare (10 mm). Inoltre, mediante le telecamere del sistema antintrusione, si è osservato come il gas abbia trovato un innesco immediato, rendendo così non rilevabile la perdita da parte dei fonometri.
La mancata rilevazione dell'incendio è legata al fatto che sulle tubazioni e sulle apparecchiature interessate non era presente un sistema di rilevazione incendio, a differenza di altre sezioni di impianto.
Allo scopo di prevenire il ripetersi dell'evento o di altri eventi analoghi, è stato imposto all'azienda di estendere a tutto l'impianto l'installazione di sistemi tecnici atti a garantire una tempestiva rilevazione di eventuali incendi e di piccole perdite.
L'azienda, in risposta, ha proposto di ampliare la rete di tappi fusibili nelle sezioni dell'impianto interessate dall'evento e di installare rilevatori ad infrarossi in altre sezioni.

4.3 Approfondimenti sulle modalità di depressurizzazione dell'impianto

Il sistema di blocco e depressurizzazione delle sezioni isolabili dell'impianto è stato attivato dagli operatori intervenuti durante l'emergenza.
Tuttavia, mentre il sistema di blocco costituito dalla SDV ha correttamente funzionato, chiudendo le SVD e isolando le diverse sezioni di impianto, il sistema di sfiato attraverso le BDV ha mostrato un funzionamento anomalo, al punto che gli operatori, dopo vari tentativi a distanza, hanno dovuto recarsi in campo, per aprire manuale la valvola posta sulla tubazione di bypass della BDV.
Successivamente all'evento, l'azienda ha quindi smontato la BDV per verificarne il corretto funzionamento. Dai successivi approfondimenti svolti, con il supporto della ditta fornitrice, si è evidenziato che l'attuatore delle valvole non era dimensionato per la pressione di progetto.
Ciò non era stato rilevato in precedenza, perché le prove di funzionamento dei sistemi di sfiato venivano effettuate senza l'effettiva fuoriuscita di gas naturale, ma verificando la corretta apertura della valvola in caso di allarme.
L'azienda ha adottato la seguente misura correttiva:

- Sostituzione di tutte le BDV con altre Valvole di Blow Down i cui attuatori sono stati dimensionati per la pressione di progetto.

E' stato richiesto all'azienda di effettuare il calcolo dei tempi di svuotamento di tutte le sezioni isolabili sulla base dei volumi contenuti e dei sistemi di sfiato presenti.

L'azienda ha indicato il criterio di dimensionamento utilizzato, che è quello prescritto dall'API Standard 521 "Pressure-relieving and Depressuring Systems" che indica: "*A vapour-depressuring system should have adequate capacity to permit reduction of the vessel stress to a level at which stress rupture is not of immediate concern. For pool-fire exposure, this generally involves reducing the equipment pressure from initial conditions to a level equivalent to 50% of the vessels design pressure within approximately 15 min. This criterion is based on the vessel-wall temperature versus stress to rupture and applies generally to carbon steel vessels with a wall thickness of approximately 25,4 mm (1 in) or more*."
Dai calcoli eseguiti, i tempi di svuotamento sono risultati variabili fra 30 min a circa 100 min, in base alla sezione considerata.
Allo scopo di verificare che i tempi di svuotamento delle sezioni isolabili fossero realmente corrispondenti a quelli di progetto, è stata prescritta l'esecuzione di una prova volta alla verifica del corretto funzionamento delle BDV, svolta alla presenza della Commissione Ispettiva, nel corso della quale calcolare i tempi di effettivo svuotamento delle apparecchiature di una sezione isolabile.
Sulla base degli approfondimenti sopra indicati e degli esiti della suddetta prova, è emerso il corretto funzionamento delle BDV alla pressione di esercizio e la corrispondenza fra i tempi di svuotamento effettivi e teorici.

4.4. Approfondimenti sull'analisi del rischio

L'analisi di rischio dello stabilimento, in base all'ultimo rapporto di sicurezza approvato, considerava credibile il jet fire da rottura random di tubazioni, a cui l'evento occorso può essere assimilato. L'azienda ha verificato che il modello utilizzato per la simulazione, con i dati di input del rilascio effettivamente verificatosi, restituisce uno scenario sovrapponibile a quello realmente occorso.
La sostanziale differenza fra l'evento occorso e l'analisi di rischio presente nel Rapporto di Sicurezza risiede nella durata dello scenario, legata all'ampiezza del diametro di rottura ed ai tempi di svuotamento delle sezioni isolabili. Infatti, nel Rapporto di Sicurezza venivano studiate solo rotture random di diametro pari al 20% del Diametro Nominale, con effetti certamente maggiori in termini di estensione delle aree di danno ma con durata nettamente inferiore, pari a pochi minuti, rispetto ai tempi di svuotamento garantiti dai sistemi di sfiato. Ciò ha portato a trascurare il rischio di effetto domino.
Alla prova dei fatti si è rilevato che, se il diametro di rottura è inferiore, la durata dell'evento corrisponde con quella di svuotamento delle sezioni isolabili, che risulta tale da non poter escludere il rischio di effetto domino sulle apparecchiature vicine.
Allo scopo di prevenire il ripetersi dell'evento o di altri eventi analoghi e di limitarne le conseguenze, è stata imposta all'azienda l'adozione di alcune misure correttive.
Nello specifico, ha richiesto l'aggiornamento dell'analisi di rischio con rivalutazione dell'effetto domino e l'adozione delle conseguenti azioni per la protezione delle strutture potenzialmente coinvolte. In particolare, è stato prescritto di garantire la

resistenza al fuoco delle apparecchiature critiche potenzialmente interessate dall'effetto domino.
Nelle more dei suddetti adeguamenti, è stata indicata la necessità dell'adozione di misure compensative che consentano il tempestivo raffreddamento delle apparecchiature critiche in caso di incendio, con riferimento alle quali l'azienda ha proposto l'implementazione di ulteriori cannoni antincendio.

4.5. Problematiche emerse in fase di gestione dell'emergenza

Nel corso dell'emergenza, è emerso che il tempo di intervento del personale dei VVF è di circa 10 min, essendo presente un distaccamento prossimo allo stabilimento, mentre al di fuori del normale orario di lavoro l'impianto non è presidiato e il tempo di intervento della squadra dei reperibili è di circa 45 min. Si è pertanto evidenziata una potenziale criticità circa la possibilità di accesso del personale dei VVF in stabilimento al di fuori del normale orario di lavoro.
Pertanto, è stata impartita la prescrizione al Gestore di redigere una procedura che consenta l'accesso in emergenza dei VVF al di fuori del normale orario di lavoro e di effettuare esercitazioni con il coinvolgimento del personale del distaccamento VVF.

5. Conclusioni

L'analisi critica dell'esperienza operativa di un incidente rilevante, un jet fire di gas naturale, che non ha fortunatamente provocato danni alle persone e all'ambiente, ha consentito di trarre preziosi insegnamenti per migliorare il sistema di gestione complessivo della sicurezza. Nello specifico si riportano gli aspetti di maggiore interesse, che costituiscono elementi di carattere generale per il miglioramento dei sistemi di gestione della sicurezza:

- Porre attenzione alla completezza e chiarezza delle informazioni contenute nelle procedure di manutenzione predisposte, verificando la congruenza delle stesse con i libretti di uso e manutenzione forniti dai costruttori dei componenti. La revisione critica delle modalità di esecuzione di tali attività può consentire di evidenziare l'instaurarsi di prassi non corrette, dettate da una maggiore semplicità di esecuzione. In tali situazioni, occorre riflettere sulle possibili soluzioni tecniche atte a semplificare gli interventi manutentivi, in modo da ridurre il rischio di errore umano;
- È opportuno che nell'analisi di rischio vengano approfonditi anche gli incidenti di minore entità, specie se caratterizzati da maggiore durata, per i quali è fondamentale adottare misure di prevenzione e protezione, anche perché statisticamente più probabili;
- Le prove per testare il funzionamento dei sistemi di emergenza devono essere periodicamente eseguite per quanto possibile in modo completo, per evitare che solo alla prova dei fatti emergano errori progettuali;
- I Piani di Emergenza Interna ed Esterna devono approfondire la gestione delle situazioni emergenziali al di fuori dal normale orario di lavoro, specie per impianti

non presidiati h24, curando particolarmente l'interfaccia fra operatori dell'impianto e protezione civile, anche attraverso l'esecuzione di esercitazioni mirate.

Bibliografia

[1] d.lgs. 26 giugno 2015 n.105, "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose".
[2] API Standard 521 "Pressure-relieving and Depressuring Systems".

La presenza di sostanze infiammabili in stabilimenti a rischio di incidente rilevante: analisi del rischio e sistema di gestione della sicurezza quali strumenti di prevenzione coordinata

E. Bemporad[1], F. Pera[1], F. Vazzana[2]

[1]Inail – Dit
[2]Ispra - Servizio per i rischi e la sostenibilità ambientale delle tecnologie, delle sostanze chimiche, dei cicli produttivi e dei servizi idrici e per le attività ispettive

Sommario
La presenza di sostanze infiammabili comporta il rischio di formazione di atmosfere esplosive, la cui gestione negli ambienti di lavoro è affrontata dalla direttiva di prodotto 2014/34/UE (ATEX), e dalla direttiva sociale 99/92/CE. Se le sostanze infiammabili sono presenti in quantità non inferiori a determinate soglie, occorre inoltre gestire il rischio di sviluppi incontrollati che possono evolvere in una esplosione di grande entità, applicando la direttiva 2012/18/UE (Seveso III).
Si è già rappresentata in passato la necessità di una gestione coordinata dei suddetti rischi [1] ma, nonostante ciò e pur considerando l'evoluzione intercorsa, in stabilimenti a rischio di incidente rilevante si continuano a riscontrare criticità in tale ambito. Nel frattempo, oltre alle nuove versioni delle direttive ATEX e Seveso, all'aggiornamento delle norme armonizzate alla direttiva ATEX, al livello nazionale è intervenuto anche il nuovo codice prevenzione incendi DM 3/08/2015 che include una regola tecnica verticale applicabile alle aree a rischio ATEX in specifiche attività.
Il presente lavoro si propone di aggiornare allo stato dell'arte il confronto delle differenti modalità con cui le norme vigenti prevedono la valutazione del rischio di esplosione associato alla presenza di infiammabili, focalizzandosi sugli aspetti significativi ai fini della corretta strutturazione dei sistemi tecnici, organizzativi e gestionali, applicati in uno stabilimento soggetto alla direttiva Seveso III.
Sarà esaminato un nuovo caso studio, dimostrando come il progresso tecnico offra strumenti sempre più efficaci per una valutazione conservativa e come gli elementi del sistema di gestione della sicurezza cogente negli stabilimenti Seveso costituiscano un'importante occasione di verifica della gestione dei rischi d'esplosione in un ambiente di lavoro a rischio potenzialmente elevato.

1. Introduzione

La presenza di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri comporta il rischio di formazione di atmosfere esplosive. La gestione di tale rischio è attualmente disciplinata a livello europeo da due direttive:

– una di prodotto, figlia del cosiddetto "nuovo approccio", direttiva 2014/34/UE, rifusione della precedente direttiva 94/9/CE che aveva subito correzioni ed emendamenti, recepita in Italia con il d.lgs. 85/2016, in cui sono definiti gli obblighi

per fabbricanti e importatori, i processi di valutazione della conformità ed i requisiti di progettazione per apparecchi e sistemi di protezione da utilizzare in atmosfera potenzialmente esplosiva affinché abbiano il livello di protezione richiesto;

– una sociale, direttiva 99/92/CE, recepita in Italia originariamente con il d.lgs. n. 233/2003, implementata prima nel Titolo VIII bis al D.Lgs. n.626/94 e dopo nel Titolo XI del d.lgs. n.81/2008, disciplinando così gli obblighi del datore di lavoro per la protezione dei lavoratori in ambienti in cui possono essere presenti atmosfere esplosive. Tale direttiva stabilisce l'obbligo di effettuare la valutazione del rischio, definendone i principi, adottare le misure tecniche ed organizzative necessarie e realizzare il documento di protezione dalle esplosioni.

La direttiva 2012/18/UE (Seveso-ter), recepita in Italia con d.lgs. 105/2015 include nel concetto di incidente rilevante un'esplosione di grande entità, dovuta a sviluppi incontrollati che si verifichino durante l'attività di uno stabilimento in cui siano presenti o previste sostanze pericolose in quantità uguali o superiori alle soglie definite nell'allegato I alla direttiva stessa. Tra le sostanze in allegato I alla direttiva figurano gas, aerosol e liquidi infiammabili di categoria 1, 2 e per i liquidi anche categoria 3, ovviamente con soglie differenziate, in quanto la direttiva Seveso non ha mai incluso nel campo di applicazione i solidi infiammabili, mentre la direttiva 99/92/CE prende in considerazione anche le polveri. Quest'ultime sono comunque considerate nell'ambito del d.lgs. 105/2015 sia per l'applicazione del metodo ad indici, nella valutazione del fattore sostanza, ai fini dell'individuazione delle unità critiche d'impianto, sia nelle modalità per l'analisi di sicurezza, ai fini della valutazione delle conseguenze, tra i modelli sorgente per l'esplosione confinata, ai sensi del dpcm 31/03/1989, ancora applicabile in virtù dell'art. 33, c. 1, lett. b) dello stesso d.lgs. 105/2015.

2. Confronto e sinergie tra normative ATEX, Seveso e di prevenzione incendi

Nell'ambito di applicazione della direttiva 2014/34/UE la norma armonizzata EN 1127-1 [2] tratta esplicitamente la stima degli effetti esterni di un'esplosione, richiedendo una valutazione strutturata che comprende la previsione degli effetti che un'esplosione può avere al di fuori delle attrezzature, sistemi di protezione e componenti, richiedendo misure supplementari, non oggetto però della norma stessa. Tale valutazione è sempre prevista nel caso in cui la configurazione impiantistica preveda l'installazione di sistemi di scarico della pressione detti anche tipo "venting" (sistemi di protezione). Le previsioni di tali effetti sono generalmente utilizzate per il completamento del "documento sulla protezione contro le esplosioni" (DPE, direttiva 99/92/CE) e, sotto questo punto di vista, potrebbero integrare quanto previsto dalla direttiva Seveso.

Nei "considerando" della direttiva 99/92/CE è previsto che il datore di lavoro possa combinare valutazioni del rischio di esplosione, documenti o altri rapporti equivalenti già esistenti, elaborati in virtù di altri atti comunitari. Tale possibilità non è invece ripresa nel d.lgs. 81/2008, ma la Guida CEI 31-35 (Guida all'applicazione della norma

CEI 31-30 o CEI EN 60079-10) citata per la classificazione delle aree a rischio di esplosione dallo stesso D.Lgs. 81/2008 dedica un punto specifico al previgente d.lgs. 334/99, ora sostituito dal d.lgs. 105/2015. In esso, oltre a riportare la definizione di "incidente rilevante", si specifica che per catastroficità e capacità diffusiva di questo tipo di incidente nei confronti dell'ambiente circostante il luogo di lavoro, gli strumenti di valutazione forniti dalla Guida stessa non sono adeguati. Anche se la Guida è stata abrogata in quanto la norma di riferimento è superata da edizione successiva, è ancora considerata dallo stesso CEI un utile riferimento per le metodologie scientifiche contenute relativamente alle parti non in contrasto con la nuova edizione della norma di riferimento [3, 4]

Due Circolari del Ministero dell'Interno del 2006 e del 2007, pur con riferimento al d.lgs. n.334/99 di recepimento della precedente direttiva Seveso-bis, evidenziano la necessità di un'integrazione sistematica tra gli adempimenti previsti dalla direttiva 1999/92/CE e quelli previsti dalla normativa Seveso relativamente alla gestione del rischio di esplosione negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante [5, 6].

Più recentemente, nel 2023, il Major Accident Hazards Bureau del Joint Research Center della Commissione Europea di Ispra (VA) ha pubblicato, nell'ambito degli Strumenti della serie Seveso Inspection - Criteri comuni di ispezione, un bollettino su come evitare le sorgenti di accensione [7].

Dal punto di vista pratico ciò si traduce nella necessità di integrare le misure tecniche ed organizzative mirate alla prevenzione e protezione dalle atmosfere esplosive nel Sistema di Gestione della Sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS-PIR) di adozione obbligatoria negli impianti soggetti alla direttiva Seveso, e verificare la coerenza tra i contenuti dei documenti previsti nei due ambiti.

A livello nazionale vige inoltre il DM 3/08/2015, noto come Codice di prevenzione incendi, che ha rivoluzionato il panorama nazionale in materia, introducendo il passaggio da un sistema normativo prescrittivo e frammentato ad un testo unico, flessibile, modulare e basato sulla valutazione del rischio, applicabile in alternativa alle regole tecniche tradizionali ancora vigenti. Il Codice è organizzato in tre sezioni principali, la G, Generalità, la S Strategia antincendio, la V Regole tecniche verticali (RTV) tra cui è inclusa la V.2 relativa alle aree a rischio per atmosfere esplosive.

La tabella 1 compara gli aspetti principali che caratterizzano le norme di recepimento delle due direttive ATEX citate in premessa, della direttiva Seveso con particolare riferimento alla valutazione e gestione del rischio di esplosione e le misure che ne scaturiscono ed il Codice di prevenzione incendi con riferimenti specifici alla RTV V.2

La Tabella 1 evidenzia differenze legate alle differenti finalità, ma anche significative sovrapposizioni.

Gli strumenti previsti dal D.Lgs. n.105/2015 restano sempre quelli di più ampio respiro ed infatti la valutazione del rischio di incidente rilevante si spinge fino alla definizione delle potenziali aree di danno, finalizzata alla pianificazione di emergenza esterna, assumendo anche finalità di tutela della salute pubblica e dell'ambiente.

La valutazione del rischio prevista dal Titolo XI del D.Lgs. n.81/2008 si concentra invece all'individuazione delle aree di pericolo (colonne a destra di Tabella 2), basandosi prevalentemente sulle misure preventive (tecniche ed organizzative) piuttosto che sulle misure protettive, adottate in via residuale, tramite i sistemi di protezione, quando le misure preventive non sono attuabili con sufficiente sicurezza, ma si è evidenziato che ove necessario si spinge anche alla valutazione degli effetti esterni delle esplosioni. Il DM 3/08/2015 fornisce ulteriori indicazioni, inserendo la classificazione delle aree a rischio in un sistema prestazionale integrato con la progettazione antincendio.

Norma	Campo di applicazione	Soggetti responsabili	Obblighi principali	Eventi indesiderati	Classificazioni / categorie	Elementi per valutazione del rischio	Provvedimenti	
							tecnici	organizzativi / gestionali
d.lgs. 85/2016 (ATEX Prodotti)	Apparecchi, sistemi e componenti destinati a impieghi in atmosfere potenzialmente esplosive e relativi dispositivi di sicurezza, controllo e regolazione	Fabbricante, rappresentante autorizzato, importatore distributore.	Conformità ai Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES, coprono marcatura, istruzioni per l'uso, selezione dei materiali, progettazione fabbricazione, controlli, sorgenti di innesco).	Emissione/ innesco ATEX, esplosione dell'apparecchio.	3 categorie apparecchi: 1G–2G–3G/ 1D–2D–3D 3 gradi di protezione: molto elevato, elevato, normale, da correlare alle zone d'uso (Tab.2)	Stato conoscenze tecnologiche; livello protezione apparecchi; temperatura; tenuta; sollecitazioni esterne sorgenti innesco.	Protezioni Ex (ad es. Ex d, Ex e, Ex i), venting, isolamento, soppressione dispositivi di sicurezza integrati (misurazione, comando, regolazione) independenti.	Procedure valutazione conformità (attestati/ dichiarazioni/ certificazioni) rispetto istruzioni d'uso e manutenzione
d.lgs. 81/2008 – Titolo XI (Luoghi di lavoro)	Aree/luoghi di lavoro in cui possono formarsi atmosfere esplosive.	Datore di lavoro (poteri decisionali e di spesa).	Ambienti di lavoro sicuri e adeguato controllo: Prevenzione ATEX; classificazione zone; controllo fonti ignizione; formazione lavoratori; attrezzature idonee.	Formazione/ innesco ATEX; infortunio.	3 tipi di zone 0–1–2 e 20–21–22 in funzione di probabilità di presenza e durata ATEX	Probabilità/ durata ATEX; sorgenti ignizione; caratteristiche impianto e luoghi; effetti prevedibili, presenza lavoratori/ imprese esterne	Attrezzature idonee (Tab.2), collegamento equipotenziale; rivelazione gas; regolazione temperature. inertizzazione; verifiche DPR 462/01.	Formazione ATEX; istruzioni scritte; permessi di lavoro; coordinamento contrattisti.

Norma	Campo di applicazione	Soggetti responsabili	Obblighi principali	Eventi indesiderati	Classificazioni / categorie	Elementi per valutazione del rischio	Provvedimenti	
							tecnici	organizzativi / gestionali
d.lgs. 105/2015 (Seveso III)	Stabilimenti in cui sono presenti quantitativi di sostanze pericolose superiori a determinate soglie (inferiore/superiore).	Gestore (potere economico o decisionale determinante per l'esercizio tecnico)	Prevenzione/ limitazione conseguenze incidenti rilevanti; notifica, SGS-PIR; rapporto di sicurezza, piani di emergenza	Incidente rilevante: emissione, incendio, esplosione di grande entità (eventi con sviluppi incontrollati)	2 Livelli di pericolo (secondo quantità sostanze) 5 tipi di aree di danno (compatibilità territoriale, DM 9/5/2001)	Analisi scenari; modellazione effetti; cartografie; trasporti; interazioni processo	sistemi tecnici per remotizzare frequenza scenari o ridurne l'entità delle conseguenze (es. valvole, dischi rottura, SIS, allarmi, rilevatori gas e fumi)	Politica e SGS: organizzazione e personale, identificazione e valutazione pericoli, controllo operativo, gestione modifiche, pianificazione emergenza, audit, riesame.
DM 03/08/2015 – RTV V.2	Progettazione realizzazione ed esercizio delle attività di cui al DPR 151/2011 (Regolamento prevenzione incendi)	Responsabile dell'attività (tenuto agli obblighi di prevenzione incendi)	Valutazione rischio incendio + ATEX; prevenzione, eliminazione ignizioni, mitigazione esplosione.	Formazione, accensione ATEX; esplosione; incendio.	5 tipi di zone secondo probabilità, durata, volume, estensione ATEX (incluse zone non pericolose).	Probabilità/ durata ATEX; volumi; accumulo polveri; collegamenti; intensità effetti.	Sistemi di sfogo isolamento, soppressione; rivelazione; dispersione, diluizione o bonifica rilasci; layout per riduzione occupanti.	Formazione; permessi di lavoro; procedure; dotazioni idonee; piani emergenza verifiche impianti

Tabella 1. Comparazione tra i decreti che disciplinano gli ambienti con presenza di atmosfere esplosive

Requisiti supplementari per i prodotti richiesti dal D.lgs.85/2016 (Dir. 2014/34/UE)				D.Lgs. n.81/2008 (Dir. 99/92/CE)	
Gruppo	**Categoria**	**Mezzi di protezione (apprestamenti o barriere di sicurezza)**		**Probabilità di presenza ATEX**	**Zona d'uso**
		Qualità	**Caratteristiche**		
II: apparecchi destinati a essere utilizzati in luoghi diversi dalle miniere o dai loro impianti di superficie passibili di essere messi in pericolo da atmosfere esplosive (ad es. industria chimica e petrolchimica, impianti biogas, silos)	1	Molto elevata	Devono assicurare il livello di protezione richiesto, anche in caso di guasto eccezionale dell'apparecchio e sono dotati di mezzi di protezione tali che: in caso di guasto di uno dei mezzi di protezione, almeno un secondo mezzo indipendente assicuri il livello di protezione richiesto, oppure qualora si manifestino due guasti indipendenti uno dall'altro, sia garantito il livello di protezione richiesto.	Certa (Continua o per lunghi periodi)	0 -20 1 - 21 2 - 22
	2	Elevata	Garantiscono il livello di protezione richiesto anche in presenza di anomalie ricorrenti o difetti di funzionamento degli apparecchi di cui occorre abitualmente tener conto	Periodica od occasionale nel funzionamento normale	1 - 21 2 - 22
	3	Normale	Garantiscono il livello di protezione richiesto a funzionamento normale.	Non prevista nel funzionamento normale e solo per brevi periodi	2 - 22

Tabella 2. Riepilogo relativo al grado di sicurezza equivalente degli apparecchi

L'esperienza maturata nel corso di ispezioni presso impianti e depositi a rischio di incidente rilevante caratterizzati dalla presenza di sostanze infiammabili, evidenzia come il rischio ATEX possa interferire con l'analisi dei rischi di incidente rilevante e quindi in generale con la strutturazione dei sistemi tecnici e organizzativi di uno stabilimento notificato secondo la direttiva Seveso. Nonostante ciò, e a distanza di ormai oltre 30 anni dalla prima direttiva ATEX, si riscontrano ancora incoerenze nelle ipotesi e nei dati di base oltre che negli approcci utilizzati nei due ambiti, ancora caratterizzati da scambio incompleto di informazioni, conclusioni e confronto scarso, quando non totalmente assente, da parte dei valutatori.
In figura 1 è riportata l'immagine dei danni di un incidente rilevante verificatosi anni fa in uno stabilimento soggetto a direttiva Seveso, di soglia inferiore: un'esplosione a seguito di innesco di atmosfera esplosiva diffusasi nel condotto fognario, con incendio della vasca di trattamento reflui; l'esplosione ha causato 3 feriti, di cui uno grave e l'incendio ha danneggiato estesamente gli impianti.



Figura 1. Danni in un impianto a rischio di incidente rilevante a seguito di esplosione (ATEX) ed incendio

3. Presentazione di un caso studio

3.1 Descrizione del caso

Durante un'ispezione ai sensi dell'art.27 del d.lgs. 105/2015, presso un impianto di soglia superiore che produce vari tipi di resine, per ragioni tecniche e di sicurezza con costante copertura di gas inerte (azoto), nel corso della verifica delle modalità di controllo operativo, ed in particolare di identificazione degli impianti e delle apparecchiature soggette ai piani di verifica, si è riscontrato che alcuni scenari incidentali (top event) potevano essere originati in reparto o sotto tettoia, dall'errata manovra di un operatore con il carrello elevatore, a causa della rottura, per foramento diretto o urto con caduta, di uno o più fusti o cisternette, in particolare:

– due top event di rilascio di toluene diisocianato (TDI) – rilascio tossico con potenziale evoluzione a rilascio di acido cianidrico (HCN) per coinvolgimento del/i fusto/i di TDI, non infiammabile, ma combustibile, in un incendio, valutata però non credibile;
– un top event di rilascio di resina, infiammabile, con evoluzione a incendio da pozza (pool fire) o flash fire.

Il carrello elevatore non era stato considerato attrezzatura critica sensu "Seveso" e quindi non risultava inserito nei piani di controllo, verifica e manutenzione, previsti a sistema per le attrezzature critiche.
Il rischio di formazione di atmosfere esplosive nell'impianto, che oltre alle resine processa toluene, xilene ed altri solventi infiammabili, risulta fondamentalmente ridotto attraverso misure tecnico-impiantistiche, in particolare la su accennata polmonazione con azoto, ma anche l'estrazione forzata dei vapori durante le fasi che possono generarli. Non risultava però evidente se la classificazione delle zone pericolose all'interno dei sistemi di contenimento avesse tenuto in considerazione il livello di efficacia ed affidabilità di tali sistemi di polmonazione ed estrazione dei vapori.
Approfondendo, si è rilevato che il Documento sulla Protezione contro le Esplosioni risultava prevalentemente incentrato sull'individuazione delle aree classificate e dunque carente dell'indicazione di alcune specifiche misure di prevenzione e controllo.
L'azienda, in modo proattivo, provvedeva prontamente a redigere una revisione del documento prima del termine dei sopralluoghi da parte della commissione ispettiva. Si è però riscontrato che tale revisione non rispondeva pienamente ai rilievi evidenziati.

3.2 Rilevanza e criticità

L'evoluzione dei sopra menzionati top event di rilascio di TDI, che pur non essendo infiammabile è combustibile ed ha una temperatura di infiammabilità di 127°C, aveva indotto il gestore dell'impianto a valutare anche la possibilità di incendio con le frequenze riportate in tabella 3, unitamente a quelle del top event relativo al rilascio, per rottura di una cisternetta di resina.

TOP EVENT	Scenario	Frequenza (eventi/anno)
Rilascio di TDI da fusto in zona stoccaggio sotto tettoia o in reparto	Rilascio tossico	$1 * 10^{-2}$
	Incendio perdita TDI con sviluppo HCN	$2{,}76 * 10^{-8}$ ($<1 * 10^{-6}$ - non credibile)
	Coinvolgimento in un incendio di fusto di TDI con collasso del fusto, incendio della perdita e sviluppo di HCN	$2{,}76 * 10^{-9}$ ($<1 * 10^{-6}$ - non credibile)
Rottura di fusto/ cisternetta di resina	*Rilascio infiammabile (evento intermedio)*	*$1 * 10^{-1}$*
	Pool fire	$6 * 10^{-3}$
	Flash fire	$9{,}95 * 10^{-4}$

Tabella 3. Frequenze dei top event di rilascio/incendio considerati per il caso in esame

Nel DPE ed in particolare nella sezione "Valutazione dei rischi" si riscontrava che dall'analisi degli incidenti elaborata dal gestore ai fini della stesura del Rapporto di sicurezza, per l'evento di rilascio di resina da fusto in zona stoccaggio sotto tettoia la frequenza di accadimento (10^{-1} eventi/anno) era compatibile con le probabilità di atmosfera esplosiva in 365 giorni indicate dalla tabella 5.10.1-1 della norma CEI 31-35 e pertanto, l'area di stoccaggio sotto tettoia risultava classificata ATEX (zona 2).

Da tali considerazioni sugli eventi incidentali discendeva l'importanza di inserire il carrello elevatore nell'elenco delle attrezzature critiche, in riferimento alla prevenzione o mitigazione degli effetti, sia in generale di anomalie in grado di condurre ad un urto per errata manovra con foratura o caduta e rottura di fusti e/o cisternette, sia dell'eventuale innesco dei vapori da pozza generata dalla perdita, per il venir meno di specifici sistemi di prevenzione/protezione installati sul carrello, non ultima l'antistaticità dei componenti (es. sedile, pneumatici). Grazie alla funzionalità ed efficienza di tali sistemi in toto risultava possibile mantenere la frequenza dei sopra menzionati top event di incendio della perdita di TDI con sviluppo di HCN a livelli considerati di "non credibilità". TDI e HCN sono entrambi caratterizzati dalla frase di rischio H330, letale se inalato e l'HCN è a sua volta estremamente infiammabile.
La revisione del DPE effettuata nel corso dell'ispezione, inoltre, non rispondeva pienamente alla carenza rilevata dalla commissione in quanto non citava, ad esempio, i riferimenti normativi più recenti. In particolare, considerato che le norme tecniche non risultavano aggiornate all'edizione corrente, non vi erano garanzie che le caratteristiche dei luoghi di lavoro, es. l'area fusti sotto tettoia, delle attrezzature, es. il carrello elevatore, e dei sistemi di sicurezza, es. il sistema impiantistico di polmonazione con azoto, offrissero livelli di protezione equivalenti a quelli attualmente richiesti, anche al fine di documentare i criteri utilizzati per la valutazione di idoneità degli stessi, che non risultavano chiaramente illustrati.
In particolare, il carrello elevatore risultava conforme alla norma UNI EN 1755 [8, 9], armonizzata alla direttiva ATEX, le cui prescrizioni si applicano in aggiunta alle verifiche e agli obblighi previsti dalla direttiva Macchine. Il DPE però, risultando prevalentemente incentrato sulla classificazione delle aree, risultava carente dei contenuti previsti dalla norma UNI EN 1755 in riferimento alla formazione degli operatori e dei manutentori, alle valutazioni dei rischi specifici per il carrello, alle informazioni di sicurezza del fabbricante, alle indicazioni e agli esiti delle verifiche sulle parti elettriche e meccaniche del carrello. L'unica indicazione presente nel DPE in merito riguardava l'informazione al personale circa la necessità di osservare una distanza di sicurezza in aria (50 cm dai poli delle batterie) entro la quale si vietavano dispositivi incandescenti (300 °C temperatura massima superficiale) o che emettono scintille. Inoltre, nel documento non era inclusa la documentazione (certificazioni/attestazioni) comprovante l'idoneità delle attrezzature e dei dispositivi utilizzati nelle aree ATEX, soprattutto con riferimento a quelli installati prima del 30/06/2003 (entrata in vigore del recepimento della prima direttiva ATEX di prodotto) e non risultava dettagliato il programma per il miglioramento nel tempo dei livelli di sicurezza.
L'inertizzazione con azoto, infine, è una valida misura di prevenzione della formazione di atmosfere esplosive, ma richiede un'attenta realizzazione delle misure di monitoraggio e controllo per garantirne efficacia e affidabilità [10]. Analoga considerazione può essere riferita al sistema di estrazione forzata dei vapori.

3.3 Soluzione proposta

L'allegato H al d.lgs. 105/2015 "Criteri per la pianificazione, la programmazione e lo svolgimento delle ispezioni" prevede che la Commissione formuli prescrizioni vincolanti o raccomandazioni in funzione del peso dei rilievi formulati, cioè delle carenze riscontrate. In tal caso la Commissione ha raccomandato al gestore di

- inserire i carrelli elevatori utilizzati per la movimentazione dei fusti e cisternette di TDI e resine nell'elenco delle attrezzature critiche ai sensi del d.lgs. 105/2015, utilizzando per la pianificazione dei controlli e delle verifiche le indicazioni fornite dal fabbricante dei carrelli stessi nel manuale d'istruzioni ed i requisiti aggiuntivi riferibili alla responsabilità del datore di lavoro contenuti nella UNI EN 1755. La tabella 4 definisce, ad esempio, i livelli di ispezione previsti in funzione del tipo di impianto/aspetto o componente da controllare, dalla norma EN 60079 17 cui la EN 1755 fa riferimento per gli impianti elettrici installati sul carrello elevatore;
- evidenziare in generale, per tutte le attrezzature critiche, la fonte da cui sono state ricavate le frequenze di manutenzione.

Livello	Tipo	Descrizione dell'ispezione	Dettagli
1	Ispezione "a vista"	Verifica non intrusiva basata sull'osservazione di apparecchiature e componenti per identificare anomalie evidenti, danni fisici, degrado o elementi non conformi che possano compromettere il modo di protezione Ex	Possono essere condotte con l'attrezzatura alimentata
2	Ispezione "ravvicinata"	ispezione più approfondita, che richiede l'utilizzo di strumenti o l'accesso più prossimo ai componenti per valutare lo stato dei dispositivi di protezione, delle connessioni e degli involucri. Può essere condotta in sito, senza smontaggio dell'apparecchio	
3	Ispezione "dettagliata"	esame completo, che prevede lo smontaggio dei componenti rilevanti e la verifica puntuale dei dettagli costruttivi e dei mezzi di protezione, normalmente effettuata presso centri autorizzati dal costruttore del carrello, che dispongono delle informazioni tecniche complete e delle procedure corrette per l'apertura e la ricomposizione delle parti Ex.	Richiede generalmente l'isolamento dell'attrezzatura

Tabella 4. Livelli di ispezione periodiche o a campione, definiti dalla norma EN 60079-17 [11,12]

La Commissione ha inoltre prescritto al gestore di:

- aggiornare il documento sulla protezione contro le esplosioni (di cui all'art.294 del d.lgs. 81/2008) valutando la necessità di adeguamento allo stato dell'arte ed integrandovi tutte le considerazioni e la documentazione necessaria all'attestazione della idoneità di luoghi, attrezzature e dispositivi utilizzati in aree classificate e dettagliando il programma di miglioramento.

– tenere inoltre in considerazione, ai fini della classificazione delle zone pericolose all'interno dei sistemi di contenimento, il livello di efficacia ed affidabilità del sistema di polmonazione con azoto (inertizzazione) e del sistema di estrazione vapori.

In riferimento a quest'ultimo aspetto si evidenzia che ove vi sia una correlazione diretta tra il livello di integrità della sicurezza (SIL), definito in base alle norme delle serie CEI EN 61508 e 61511 [14, 15] del sistema di monitoraggio e controllo delle apparecchiature e dispositivi di inertizzazione ed il tipo di zona pericolosa nelle apparecchiature stesse, in funzione dell'analisi del rischio (es. LOPA – Layer of Protection Analysis) e del calcolo della frequenza accettabile, il tipo di zona pericolosa nella macchina potrebbe persino ridursi.

4. Lezione appresa

Innanzi tutto, è da evidenziare la diversità delle valutazioni del rischio di esplosione nei due ambiti ATEX e Seveso:

– nel primo caso è richiesto di considerare solo la frequenza della formazione dell'atmosfera esplosiva ed il gestore ha utilizzato le frequenze riportate nell'analisi degli incidenti elaborata ai fini della stesura del Rapporto di sicurezza. Ciò ha condotto a classificare la quasi totalità delle zone considerate;

– nel secondo caso si valuta l'albero dei guasti, sommando (logica OR, eventi alternativi) o moltiplicando (logica AND, eventi concomitanti) anche la frequenza degli altri eventi che concorrono al top event e ciò ha portato a classificare i top event di incendio dei rilasci di TDI in reparto e nell'area stoccaggio fusti non credibili.

Il d.lgs.105/2015, all'allegato H, prevede che, ai fini dell'esame pianificato dei sistemi tecnici del SGS PIR siano considerati anche gli scenari caratterizzati da basse frequenze di accadimento, laddove esse siano il risultato della adozione di specifiche misure e di sistemi di prevenzione di cui sia comunque ipotizzabile il malfunzionamento, in quanto il loro controllo e manutenzione sono essenziali proprio ai fini del mantenimento delle basse frequenze. Nell'operatività ciò comporta che i relativi sistemi tecnici devono essere considerati "critici" e quindi oggetto di controllo, verifica e manutenzione nell'ambito del SGS-PIR. Si tratta di un aspetto fondamentale che non deve essere mai trascurato, in nessun caso, tantomeno nel caso di top event di incendio ed esplosione.

Altri aspetti la cui valenza emerge dall'analisi comparativa delle norme, ma anche dal caso studio esaminato, in riferimento alle attrezzature impiantistiche e più in generale di lavoro critiche "sensu Seveso" presenti e/o utilizzate in zone classificate sono:

– la conformità delle attrezzature alla direttiva ATEX (prodotto), già richiesta dall'art.71 del d.lgs. 81/2008, prima ancora che dal Titolo XI (artt. 293, 294 e allegato L) dello stesso d.lgs.;

– la coerenza della valutazione dei rischi ATEX con i manuali d'uso e le norme tecniche di riferimento adottate dal fabbricante, che spesso contengono indicazioni specifiche per l'uso;
– l'importanza dell'informazione, formazione ed addestramento del personale in generale ed in particolare degli addetti ai controlli, alle verifiche ed alla manutenzione;
– la definizione dei criteri e requisiti minimi di sicurezza da applicare per la progettazione/modifica;
– l'adeguamento al progresso tecnico generalmente riconosciuto nella pianificazione degli adeguamenti impiantistici e gestionali per la riduzione dei rischi e l'aggiornamento.

Si tratta di aspetti tutti chiaramente riconducibili agli elementi fondamentali del SGS-PIR, che vanno a confermare ed integrare quanto già evidenziato nell'analisi effettuata in passato [1], prima degli aggiornamenti normativi qui approfonditi.

5. Conclusioni

La gestione efficace del rischio di esplosione negli stabilimenti soggetti alla direttiva Seveso in cui la presenza di sostanze infiammabili può generare atmosfere esplosive richiede un'integrazione coerente tra gli adempimenti previsti dalle normative concorrenti sia direttamente che indirettamente, normative che la presente memoria ha posto a confronto. La semplice conformità alla normativa ATEX non è sufficiente, gli elementi valutativi del DPE devono essere recepiti anche nel SGS-PIR, così da garantire una visione unitaria dei pericoli e delle misure di controllo.

In particolare, il DPE deve essere considerato uno strumento funzionale alla corretta impostazione del SGS-PIR, così come il rapporto di sicurezza o il documento di analisi dei rischi lo sono per la corretta impostazione delle misure di prevenzione e protezione dei lavoratori ai sensi del d.lgs. 81/2008. Gli esiti delle prove, delle verifiche e delle valutazioni ATEX devono contribuire alla caratterizzazione delle aree di danno, alla definizione degli scenari incidentali e alla scelta delle barriere tecniche e organizzative adottate dal gestore.

Mantenere allineati gli strumenti normativi e garantire la coerenza tra valutazioni, impianti e procedure consente di sfruttare approcci complementari per innalzare il livello di sicurezza dello stabilimento. Ciò rappresenta un requisito imprescindibile per la corretta pianificazione degli adeguamenti impiantistici e gestionali e per la riduzione effettiva del rischio di incidente rilevante.

Le valutazioni specifiche effettuate nell'ambito delle misure di controllo previste all'art.27 del d.lgs. 105/2015 continuano ad offrire un'occasione unica per il gestore/datore di lavoro, di "verifica e confronto" con le istituzioni relativamente alla gestione dei rischi d'esplosione in un ambiente di lavoro di criticità potenzialmente elevata.

Bibliografia

[1] Bemporad, E., Di Tosto F., Berardi S., 2012 Sinergia tra d.lgs. 334/1999 e titolo XI del D.Lgs. 81/2008 nella valutazione del rischio di esplosione per gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, Atti del VGR 2012, VII Edizione, Pisa, 3-5 ottobre 2012

[2] UNI EN 1127-1: 2019 Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia

[3] CEI 31-35;Ab, 2018-10 Atmosfere esplosive Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87)

[4] CEI 31-35/A;Ab, 2018-10 Atmosfere esplosive Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87): esempi di applicazione

[5] Ministero dell'Interno Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile, Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica, Area Rischi Industriali, "Tutela e sicurezza sul lavoro negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante", Lettera Circolare Prot. DCPST/A4/RS/3200, Roma, 11/09/2007

[6] Ministero dell'Interno Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile, Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica, Area Rischi Industriali, "Sicurezza dei lavoratori nelle attività a rischio di incidente rilevante", Lettera Circolare Prot. DCPST/A4/RS/1650, Roma, 4/05/2006

[7] Joint Research Center, MAHB Major Accident Hazards Bureau, Technology Innovation in Security Unit Seveso Inspection Series Tools - Common inspection criteria, Number 14, 2023, Avoiding Ignition Sources [on line: https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/technical_working_group_2_seveso_inspections/seveso_inspection_series]

[8] UNI EN 1755: 2024 Carrelli industriali - Requisiti di sicurezza e verifica - Requisiti supplementari per l'Impiego in atmosfere potenzialmente esplosive (in vigore dal 23/05/2024)

[9] UNI EN 1755: 2015 Carrelli industriali - Requisiti di sicurezza e verifica - Requisiti supplementari per l'Impiego in atmosfere potenzialmente esplosive (in vigore dal 10/12/2015 – ritirata con sostituzione il 23/05/2024)

[10] Baldissin M. Misure per prevenire la formazione di atmosfere esplosive. Inertizzazione. Affidabilità del sistema di monitoraggio e controllo – Esempio, Regione Lombardia, ASL Milano, Quaderno Tecnico, Rev.00 Gennaio 2015 [on line: https://www.assolombarda.it/servizi/salute-e-sicurezza-sul-lavoro/documenti/misure-per-prevenire-la-formazione-di-atmosfere-esplosive.-inertizzazione.-affidabilita-del-sistema-di-monitoraggio-e-controllo/]

[11] CEI EN IEC 60079-17 (2024-04) Atmosfere esplosive Parte 17: Verifica e manutenzione degli impianti elettrici (in vigore dal 05-2024)
[12] CEI EN 60079-17 (2015-03) Atmosfere esplosive Parte 17: Verifica e manutenzione degli impianti elettrici (applicabile fino al 5/01/2027)
[13] CEN/TR 15281:2022 Potentially explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Guidance on inerting for the prevention of explosions
[14] CEI EN 61508 (2011-02) Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza:
1. Parte 1: Requisiti generali
2. Parte 2: Requisiti per i sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza
3. Parte 3: Requisiti del software
[15] CEI EN 61511-1 (2017-10) Sicurezza funzionale - Sistemi strumentati di sicurezza per il settore dell'industria di processo
1. +/A1 (2018-03) Parte 1: Struttura, definizioni, sistema, prescrizioni per l'hardware e il software
2. Parte 2 Linee guida per l'applicazione della IEC 61511-1
3. Parte 3 Guida per la determinazione dei livelli di integrità di sicurezza richiesti

Aspetti di safety e security nella considerazione dell'interfaccia uomo-macchina per la gestione dei siti Seveso

R. Marrazzo[1], D. Barone[2]

[1] ISPRA
[2] Tecnologie Sicurezza Industriale Srl. Milano

Sommario
La Direttiva Seveso III 2012/18/UE impone l'obbligo di tenere in debita considerazione i fattori umani e le interfacce tra operatori, processi e impianti, nell'ambito dell'implementazione del Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti dei siti industriali. Considerando l'aumentata possibilità di attacchi intenzionali come sabotaggio, terrorismo e ritorsioni, e gli effetti sulla gestione dei processi caratterizzati dalla presenza di sostanze pericolose, con il conseguente possibile verificarsi di incidenti industriali rilevanti, è necessario prendere in considerazione adeguate misure di prevenzione e mitigazione della Security. La possibile integrazione tra i sistemi di safety e security non può prescindere quindi dalla considerazione di misure comuni, per gli impianti di processo, appartenenti agli ambiti di prevenzione e mitigazione. Un'attenzione specifica deve essere rivolta all'interfaccia uomo-macchina (Human Machine Interface - HMI), oltre che alla prevenzione e valutazione dell'errore umano, un aspetto fondamentale della gestione della sicurezza di processo. Un'interfaccia uomo-macchina ben progettata consente di ridurre al minimo la possibilità di errore dell'operatore, sia in condizioni operative normali che in situazioni emergenziali. La prevenzione dell'errore umano non può, a sua volta, prescindere dalla conoscenza delle potenziali conseguenze negative derivanti dal mancato rispetto delle procedure di sistema, con la possibilità di un incidente rilevante. Le misure di prevenzione e mitigazione della sicurezza riguardano quindi sia la protezione fisica che informatica delle attività Seveso e delle persone presenti. L'analisi delle vulnerabilità di sicurezza dovute ad attacchi intenzionali quali sabotaggio, terrorismo e ritorsione, consente di individuare le misure per la riduzione del rischio relativo secondo le migliori pratiche del settore.

1. Introduzione

La Direttiva Seveso III 2012/18/UE [1], recepita in Italia con il d.lgs. 105/2015 [2], è finalizzata alla prevenzione degli incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. Il d.lgs. 105/2015 riguarda gli stabilimenti in cui possono essere presenti sostanze pericolose (ad esempio durante la lavorazione o lo stoccaggio) in quantità superiori a determinate soglie. I gestori degli stabilimenti sono tenuti a adottare tutte le misure necessarie per prevenire incidenti rilevanti e limitarne le conseguenze per la salute umana e l'ambiente. A seconda della quantità di sostanze pericolose presenti, gli

stabilimenti sono classificati in soglia inferiore e superiore, con obblighi diversi. I requisiti includono, tra gli altri: la notifica di tutti gli stabilimenti interessati; la predisposizione di una Politica di Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (PPIR) attraverso l'implementazione di un Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR); la redazione di un Rapporto di Sicurezza (RdS) per gli stabilimenti di soglia superiore; la redazione di un Piano di Emergenza Interna (PEI) per gli stabilimenti di soglia superiore; fornire informazioni in caso di incidenti. Nell'ambito dell'implementazione del SGS, il d.lgs. 105/2015 impone l'obbligo di tenere in debita considerazione il fattore umano e le interfacce tra operatori, processi e impianti. Durante le attività di controllo è infatti necessario verificare che vengano implementati programmi di formazione ed esercitazioni di emergenza per migliorare il comportamento degli operatori. È quindi fondamentale che nell'analisi dei rischi si tenga conto del fattore umano e delle condizioni in cui devono essere svolte le attività significative per la sicurezza dello stabilimento, prestando particolare attenzione alle interfacce tra operatori e processi nella fase di controllo operativo degli impianti.
Alla luce delle suddette considerazioni, è possibile indicare lo scopo del presente lavoro: l'adeguata considerazione dei fattori umani e delle interfacce tra operatori, processi e impianti, nella corretta implementazione di un sistema di gestione della sicurezza, tenendo conto di misure comuni per i processi industriali, appartenenti agli ambiti di prevenzione e mitigazione, nell’ottica di assicurare l’integrazione tra i sistemi di safety e security.

2. Le attività di controllo: fattori umani e HMI

2.1 Fattori umani nelle attività di controllo

In Italia, le ispezioni SGS vengono condotte per verificare l'idoneità della PPIR del gestore effettuando un esame pianificato e sistematico dei sistemi impiegati nello stabilimento, siano essi di natura tecnica, organizzativa o gestionale. I fattori umani e le interfacce tra operatori, processi e impianti sono specifici elementi di interesse durante l'attività di controllo SGS [3]. Infatti, la commissione deve: Verificare che esistano e siano implementati programmi di formazione e addestramento per migliorare il comportamento dell'operatore; Verificare che i turni di lavoro e la distribuzione dei compiti siano stati stabiliti tenendo conto dello stress psicofisico a cui sono sottoposti i lavoratori e che siano messi in atto meccanismi per verificare il mantenimento delle idonee condizioni psicofisiche. Tra gli strumenti a disposizione della commissione ispettiva durante l’analisi documentale, è possibile verificare direttamente, anche consultando la documentazione relativa ad aspetti legati alla salute e sicurezza sul lavoro, il rispetto delle indicazioni relative al mantenimento di idonee condizioni psicofisiche dei lavoratori. Durante la visita “in situ”, gli approfondimenti possibili riguardano interviste ai dipendenti sia sulle modalità di gestione della gestione ordinaria e straordinaria, della manutenzione, degli interventi

di emergenza, sia sul loro coinvolgimento nella stesura e/o revisione delle istruzioni operative.

2.2 La considerazione dell'HMI e dell'errore umano

La norma tecnica nazionale UNI 10616:2022 (Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'attuazione della norma UNI 10617) [4] fornisce le linee guida per l'implementazione di un sistema di gestione della sicurezza, descrivendo le procedure e gli strumenti tecnici utili al raggiungimento di obiettivi specifici per la prevenzione degli incidenti rilevanti negli stabilimenti industriali (norma tecnica nazionale UNI 10617:2019) [5]. Essa affronta la maggior parte dei pericoli e dei rischi di incidente rilevante presenti sia in stabilimenti semplici sia in stabilimenti più complessi dove i rischi di processo possono essere preponderanti rispetto a quelli connessi alla semplice perdita di contenimento. L'applicazione dei contenuti della norma deve essere commisurata alle specificità dei pericoli di incidente rilevante presenti nello stabilimento. Nella norma, specifica attenzione è rivolta all'interfaccia uomo-macchina (HMI), ovvero al sistema che separa l'operatore, che sta utilizzando una macchina (es. il pannello di controllo situato nella sala controllo nel caso dell'industria di processo), dalla macchina stessa, garantendone al contempo una connessione costante. Tra gli obiettivi per il miglioramento continuo dell'SGS-PIR, che scaturiscono dai risultati dell'identificazione dei pericoli e dalla valutazione dei rischi di incidente rilevante, può essere incluso anche il miglioramento della qualità dell'interfaccia tra l'operatore e l'impianto/processo (ovvero tempestività, accuratezza e puntualità nella segnalazione delle anomalie). In stretta connessione con l'HMI, si considerano la prevenzione e la valutazione dell'errore umano, aspetto fondamentale della gestione della sicurezza di processo. Per rafforzare e diffondere la cultura della sicurezza, il responsabile di sito dovrebbe operare anche attraverso l'implementazione di una politica aziendale che individui in modo chiaro e trasparente i criteri per distinguere i comportamenti accettabili da quelli non considerabili tali, distinguendo le situazioni di condotta dolosa da quelle di errore umano attribuibili a cause organizzative. La consapevolezza delle persone che svolgono un'attività lavorativa nello stabilimento, coinvolte in attività rilevanti per la sicurezza, può infatti essere verificata attraverso la conoscenza delle potenziali conseguenze negative derivanti dal mancato rispetto delle procedure specificate, con conseguente errore umano, e dalla possibilità di un incidente anche rilevante. La necessità di verificare le procedure del sistema, d'altro canto, può derivare dall'eventuale analisi degli incidenti e/o dei quasi incidenti connessi all'errore umano accertato.

3. Progettazione e schemi per prevenire l'errore umano

3.1 Progettazione dell'interfaccia uomo-macchina

La funzionalità delle interfacce tra operatori, processo e sistemi, costituite dalla strumentazione ubicata in sala controllo con relativi quadri/monitor/pulsanti/pannelli di segnalazione ottica e acustica, inclusi i dispositivi wireless, deve essere garantita attraverso il programma di verifica periodica dei sistemi di sicurezza attiva, costituiti da rilevatori di gas tossici e/o infiammabili, rilevatori di incendio, allarmi e blocchi per parametri operativi critici. I display devono riportare variabili di processo, allarmi, blocchi automatici, registrazioni, nonché attuatori per azioni di controllo sul processo, come avvio/arresto di pompe e compressori, apertura/chiusura di valvole, modifica dei parametri di regolazione e operativi impostati. Le principali funzioni di un'interfaccia sono: Presentazione delle informazioni di processo; Esecuzione immediata delle azioni di controllo; Supporto alla diagnosi, al processo decisionale o alla pianificazione. Elementi importanti di un'interfaccia sono l'usabilità, per rendere l'HMI facile da usare (riducendo la possibilità di errori), e l'accessibilità da parte dell'operatore del pannello. Una corretta progettazione dei sistemi di controllo, allarme e blocco automatico deve considerare l'analisi delle mansioni dell'operatore al quadro elettrico e i fattori ergonomici e ambientali specifici ottimali per il corretto funzionamento dei sistemi e degli impianti. Una buona interfaccia uomo-macchina, progettata e realizzata, nella sala controllo di un impianto di processo consente di ridurre al minimo la possibilità di errore dell'operatore sul pannello, sia in condizioni di normale funzionamento che in situazioni di emergenza, durante tutto il ciclo di vita del processo e in caso di modifiche all'impianto o al processo. Tali interfacce devono essere considerate durante tutto il ciclo di vita del processo e durante le modifiche all'impianto o al processo. Devono infatti essere adottate disposizioni di controllo per gestire eventuali modifiche/cambiamenti apportati, in condizioni di necessità e sotto specifica responsabilità, ai quadri elettrici o alle apparecchiature di controllo. Ovviamente, tali modifiche non devono ridurre le caratteristiche ergonomiche di progettazione e devono tenere conto di altri requisiti di progetto, come l'accessibilità per la manutenzione o i controlli periodici.

3.2 Schemi pratici delle sale di controllo

Per rappresentare alcuni esempi pratici di sala controllo [6], con la relativa rappresentazione dei parametri di processo e dei dati sullo schermo di un DCS (Distributed Control System), è stato indagato il caso di una tipica industria di processo. Di seguito, vengono presentati schemi di corretta progettazione e distribuzione degli spazi in una sala controllo, con i relativi requisiti minimi [7]: Figura 1: Definizioni visualizzazione delle postazioni di lavoro; Figura 2: Visibilità di schermi di grandi dimensioni e larghezze dei corridoi; Figura 3: Percorsi di viaggio e funzionamento collaborativo tra le unità.

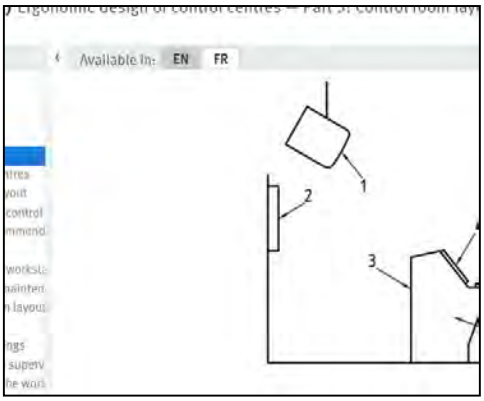


Figura 1. Definizioni visualizzazione delle postazioni di lavoro (T. Naito et al, 2011)

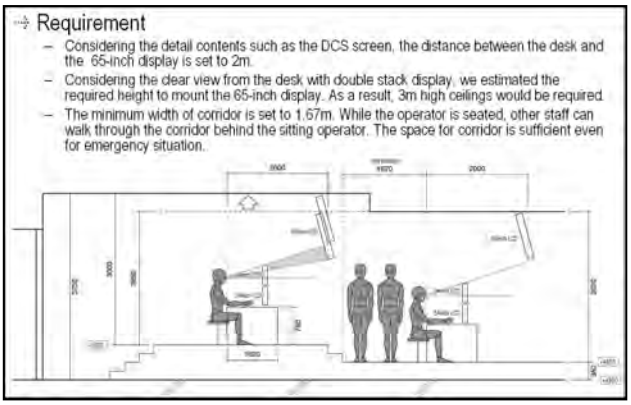


Figura 2. Visibilità dei grandi schermi e larghezza dei corridoi (Naito et al, 2011)

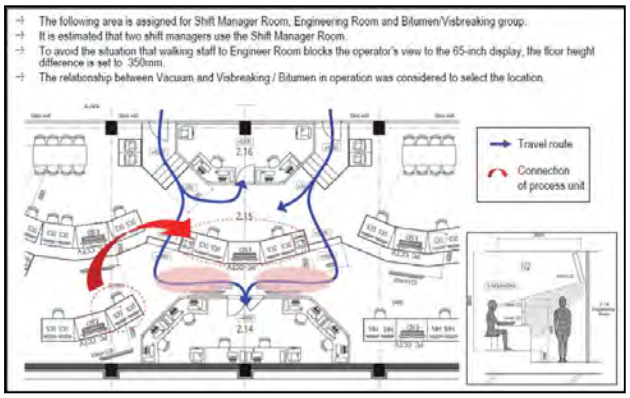


Figura 3. Percorsi di viaggio e funzionamento collaborativo tra le unità (T. Naito et al, 2011)

I punti chiave per una rappresentazione adeguata dei dati e delle informazioni su uno schermo, al fine di migliorare le interfacce grafiche uomo-macchina [8], sono: Rappresentazione grafica a colori (Figura 4); Visualizzazione dello stato del dispositivo (Figura 5); Rappresentazione dei valori dei dati (Figura 6).



Figura 4. Rappresentazione grafica a colori (R. Kowalski et al, 2017)

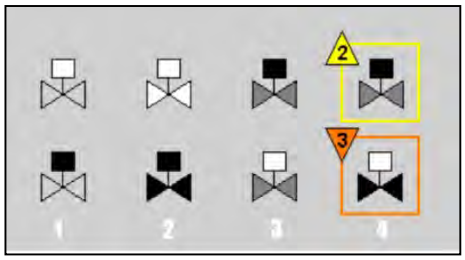


Figura 5. Visualizzazione dello stato del dispositivo (R. Kowalski et al, 2017)

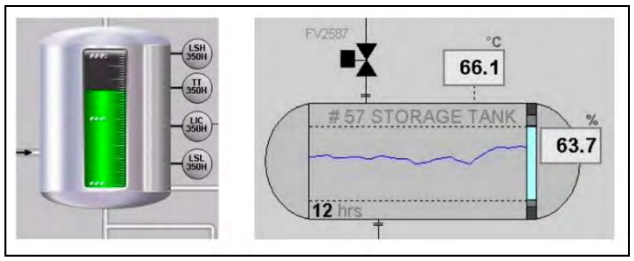


Figura 6. Rappresentazione dei valori dei dati (R. Kowalski et al, 2017)

Di seguito sono infine riportati alcuni esempi tipici di pannelli di controllo, tratti dal DCS nella sala controllo [9]: Figura 7: Panoramica dell'impianto; Figura 8: Unità di processo dell'aria di processo.

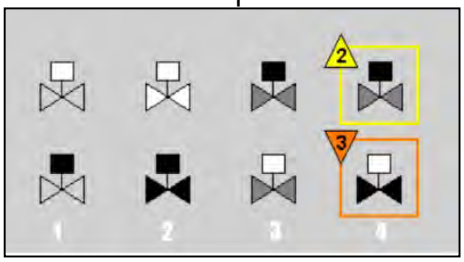


Figura 7. Panoramica dell'impianto (ANSI/ISA, 2015)

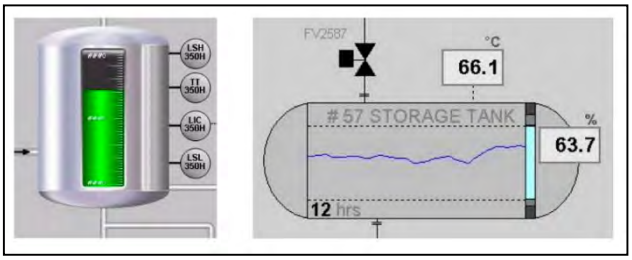


Figura 8. Unità di processo dell'aria (ANSI/ISA, 2015)

3.3 La prevenzione dell'errore umano in un impianto di processo

La prevenzione dell'errore umano non può prescindere dalla conoscenza delle potenziali conseguenze negative derivanti dal mancato rispetto delle procedure di sistema, con la possibilità di un incidente rilevante. La valutazione della possibilità di errore umano deve essere utilizzata nell'analisi di affidabilità per verificare se le procedure e i controlli operativi adottati per migliorare il comportamento dell'operatore o i controlli strumentali diano il miglior contributo alla sicurezza del sistema. La gestione da parte dei lavoratori di anomalie operative e/o situazioni di emergenza deve essere verificata sia nelle reali condizioni di accadimento degli eventi sia nelle simulazioni, al fine di evidenziare eventuali carenze connesse al fattore umano. L'analisi delle non conformità relative a procedure, normative, istruzioni operative, rilevate a seguito di ispezioni e/o incidenti/quasi incidenti, generalmente legate all'errore umano, può evidenziare carenze relative al comportamento delle persone, all'organizzazione e all'ambiente di lavoro. Tali carenze devono essere oggetto di appropriate azioni correttive. Le esercitazioni di emergenza costituiscono un importante elemento di valutazione. Devono essere svolte secondo un percorso specifico che va dalla pianificazione all'analisi critica dei risultati, al fine di predisporre eventuali azioni correttive, anche in termini di tempi di risposta e gestione delle emergenze degli operatori al fine di ridurre la possibilità di incidenti legati all'errore umano.

4. La considerazione del fattore umano nel SGS

Sulla base dell'esperienza maturata con le attività di controllo condotte su alcuni stabilimenti Seveso italiani, di seguito vengono forniti esempi e indicazioni di situazioni particolari o ricorrenti in merito alla considerazione del fattore umano nel SGS. Le ispezioni devono essere principalmente finalizzate a valutare quanto la politica aziendale, e quindi il sistema di gestione, richieda che i fattori umani siano presi in considerazione nello svolgimento delle attività dello stabilimento, individuando eventuali carenze. Gli aspetti da prendere in considerazione sono gli elementi organizzativi, la politica e gli standard seguiti nelle fasi di progettazione e modifica degli impianti, le condizioni operative, incluse le problematiche relative alla gestione dei processi, e gli ambienti di lavoro. Per quanto riguarda le fasi di progettazione di nuovi processi o sistemi operativi, deve essere evidente che la politica aziendale o gli standard adottati prevedano la considerazione dei fattori umani. Indicativo del fatto che i fattori umani siano stati considerati è, ad esempio, l'evidenza dell'analisi degli aspetti relativi agli spazi a disposizione degli operatori, all'accessibilità delle apparecchiature, alla corretta costruzione e collocazione dei quadri di controllo e all'utilizzo di prototipi e impianti pilota anche per l'analisi e la revisione dell'interfaccia operatore-impianto. A livello operativo, devono essere acquisite informazioni sui turni di lavoro, ad esempio verificando che le risorse disponibili siano distribuite in modo omogeneo, o comunque congruente con il carico di lavoro, che le responsabilità siano state chiaramente identificate e siano commisurate all'esperienza e alla capacità del dipendente di individuare la causa di un errore che può anche causare un incidente rilevante. Bisogna infatti considerare che stress e affaticamento possono essere la conseguenza di una non corretta gestione del personale. Per individuare un'eventuale carenza in tal senso, si potrebbe, ad esempio, analizzare i criteri di allocazione delle risorse all'interno delle diverse aree operative, verificando se siano state specificate sia le caratteristiche fisiche e attitudinali sia il grado di esperienza che deve essere posseduto dal responsabile dei compiti critici dell'impianto. Per quanto riguarda le procedure operative a disposizione degli operatori, gli aspetti principali da considerare sono che queste siano chiare e complete, redatte in un linguaggio comprensibile per gli operatori, che sia stato previsto il loro coinvolgimento nella stesura e revisione e, soprattutto, che tali procedure forniscano ai dipendenti tutti gli elementi che consentano loro di individuare e gestire situazioni impreviste. Va ricordato che anche le condizioni dell'ambiente di lavoro (illuminazione, temperatura, esposizione a rumore, vibrazioni o agenti chimici, ecc.) svolgono un ruolo fondamentale nella capacità del dipendente di interagire con i sistemi e le attrezzature. A tal proposito, sarà importante verificare non tanto che i valori di questi parametri siano compatibili con l'attività svolta, quanto piuttosto che nell'organizzazione dell'attività siano state considerate le norme nazionali e internazionali per la definizione delle condizioni ottimali sul posto di lavoro, prevedendo, nelle procedure, le analisi per stabilire quali

siano i livelli che consentono di garantire efficienza e sicurezza. Infine, occorre considerare che il sistema deve prevedere la misurazione periodica di questi parametri, per verificare che i limiti prefissati vengano rispettati, adottando misure compensative nel caso in cui non sia possibile rispettare il limite.

5. Conclusioni

La considerazione dei fattori umani e delle interfacce tra operatori, processi e impianti, nella corretta implementazione di un sistema di gestione della sicurezza deve basarsi su: 1) L'individuazione di eventuali problemi alle interfacce, grazie alle informazioni e feedback provenienti sia dagli operatori che dai manutentori; 2) Il monitoraggio dello stato di apparecchiature e sistemi. È importante che le apparecchiature siano ispezionate visivamente durante tutto il turno di lavoro. La lettura degli strumenti posti sulle apparecchiature consente di verificare l'affidabilità dei parametri segnalati dai sistemi di controllo remoto in sala controllo. Inoltre, solo attraverso ispezioni visive è possibile individuare tempestivamente situazioni anomale. Le informazioni riscontrate devono essere registrate su apposite check-list che devono essere riviste periodicamente dai responsabili affinché quanto segnalato sia coerente con gli altri dati e che eventuali situazioni anomale siano prontamente risolte. Inoltre, è buona norma integrare i controlli delle apparecchiature con le normali operazioni; 3) Un'adeguata manutenzione degli strumenti e delle attrezzature di lavoro, incluso il mantenimento di buone condizioni di pulizia e ordine sul posto di lavoro (c.d. housekeeping); 4) L'utilizzo di una corretta etichettatura e segnalazione di contenitori, tubazioni, apparecchiature, ecc., anche attraverso opportuni codici colore, per consentire l'immediata conoscenza dei rischi e l'identificazione di impianti e componenti. Di particolare importanza, ad esempio, sono le modalità di segnalazione dei blocchi automatici al quadro, soprattutto in caso di bypass per esigenze impiantistiche contingenti, con la relativa procedura di gestione operativa; 5) Il mantenimento di buone condizioni di illuminazione, essenziali per l'identificazione delle apparecchiature, la lettura degli strumenti e l'individuazione di possibili problemi; 6) Il miglioramento dell'affidabilità delle prestazioni degli operatori. Particolare attenzione dovrà essere posta alle procedure di passaggio delle consegne tra capi turno e/o centralinisti durante i cambi turno in impianto e in sala controllo, mantenendo adeguata traccia nella documentazione di impianto; 7) L'implementazione di un efficace sistema di controlli operativi basato su procedure, permessi, ispezioni, ecc., che consenta di prevenire o individuare tempestivamente eventuali errori umani prima che causino incidenti; 8) La funzionalità delle interfacce operatore/processo e operatore/apparecchiatura per facilitare all'operatore il monitoraggio del processo, l'identificazione di eventuali anomalie o situazioni di emergenza e l'attuazione delle modalità di intervento previste. Si pensi, ad esempio, al problema di gestire il numero massimo di allarmi a schermo in caso di emergenza generalizzata, oppure al problema di valutare l'affidabilità/ridondanza per gli allarmi critici (in caso di interruzione di corrente).

Bibliografia e sitografia

[1] Direttiva 2012/18/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2012, sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose, recante modifica e successiva abrogazione della direttiva 96/82/CE del Consiglio (Gazzetta ufficiale dell'Unione europea 55 L197). (2012).

[2] DECRETO LEGISLATIVO 26 giugno 2015, n. 105 “Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose”. (Gazz . Uff. 14 luglio 2015, n. 161, SO). (2015)

[3] APAT. Linee guida per lo svolgimento delle verifiche ispettive sui sistemi di gestione della sicurezza in impianti a rischio di incidente rilevante. Manuali e linee guida 23/2003. ISBN 88-448-0095-0. (2003).

[4] UNI 10616:2022. Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Linee guida per l'applicazione della UNI 10617. (2022).

[5] UNI 10617:2019. Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Sistemi di gestione della sicurezza - Requisiti essenziali. (2019).

[6] ISO 11064-3:1999. Progettazione ergonomica dei centri di controllo — Parte 3: Disposizione della sala di controllo. (1999).

[7] T. Naito et al. Progettazione della sala di controllo per un funzionamento efficiente dell'impianto. Rapporto tecnico Yokogawa, edizione inglese, vol. 54, n. 1. (2011).

[8] https://boomtsps.medium.com (20/03/2023).

[9] R. Kowalski et al. INTERFACCE UOMO-MACCHINA SCADA AD ALTE PRESTAZIONI DI NUOVA GENERAZIONE - Configurazione di HMI per visualizzare informazioni "incentrate sull'operatore". Arcadis 2016. (2017)

Invecchiamento degli impianti Seveso: da un vecchio problema a una nuova emergenza

P. Bragatto[1], M.F. Milazzo[2]

[1]Università Campus Bio-Medico, Facoltà Dipartimentale di Ingegneria, Roma
[2]Università di Messina, Dipartimento di Ingegneria, Messina

Sommario
La definizione dell'invecchiamento degli impianti include tre aspetti diversi: degrado fisico, obsolescenza tecnologica e invecchiamento organizzativo. Mentre in passato l'attenzione era tutta sul degrado, oggi si da molta importanza all'obsolescenza. Spinta dalla transizione energetica e digitale, la rapidità dell'innovazione rende obsoleti processi, prodotti, materiali, attrezzature e organizzazioni. Questa obsolescenza si intreccia con i più noti processi di deterioramento dei materiali, come corrosione, erosione, fatica e usura, amplificando i pericoli di guasti, malfunzionamenti, fermi operativi, incidenti sul posto di lavoro e disastri gravi. Il presente studio intende riempire i vuoti conoscitivi sull'invecchiamento e indagare i rischi complessi che stanno emergendo per l'effetto combinato di transizione energetica, transizione digitale e cambiamenti climatici, con lo scopo di sviluppare approcci di controllo efficaci per questo contesto di cambiamenti che possiamo definire esponenziali. L'approccio suggerito identifica in modo approfondito i vari fattori che incidono su obsolescenza e degrado ed elabora una risposta proporzionata alla intricata natura del problema, basandosi sull'analisi di Ishikawa (diagramma *fishbone*).

1. Introduzione

La Direttiva Europea Seveso III del 2012 aveva, già all'epoca, riconosciuto l'importanza di gestire l'invecchiamento delle attrezzature al fine di controllare il rischio di incidenti gravi e incluso l'obbligo per l'operatore dell'impianto di attuare un piano per controllare il rischio di invecchiamento e per gli ispettori di verificarne l'adeguatezza. Numerosi studi confermano come l'invecchiamento degli impianti sia una delle maggiori cause degli incidenti nel settore Seveso [1,2]. La pubblicazione della Direttiva stimolò ulteriori studi tecnici e scientifici sulla questione. L'Italia era stata fra i primi paesi europei a sviluppare un metodo per la valutazione dell'invecchiamento nell'ambito delle ispezioni Seveso, seguita da altri paesi europei [3]. L'argomento sembrava sufficientemente consolidato da risultare meno attraente per la discussione scientifica. Le accelerazioni della transizione digitale ed energetica hanno però cambiato radicalmente il contesto ed è necessario rivedere il problema dell'invecchiamento [4]. Mentre fino a pochi anni fa l'attenzione era sul degrado fisico dei materiali (p.e. corrosione, erosione, fatica), oggi si sta spostando verso l'obsolescenza. All'innovazione sempre più rapida corrisponde, infatti,

un'obsolescenza altrettanto rapida. Sebbene il degrado fisico sia associato a meccanismi deterministici ben noti e teoricamente controllabili, le varie forme di obsolescenza e gli effetti sul rischio sono aspetti meno noti e studiati. Il presente lavoro approfondisce la questione dell'invecchiamento degli impianti di processo, prestando maggiore attenzione all'obsolescenza, un aspetto che nelle industrie di processo è stato finora trascurato, rispetto all'importanza della corrosione e di altri tipi di degrado, che interessano in particolare i sistemi di contenimento primari.

2. Invecchiamento impianti: i diversi aspetti

L'invecchiamento degli impianti include il degrado fisico, l'obsolescenza e l'invecchiamento organizzativo [5]. Di seguito i tre diversi aspetti sono analizzati nel dettaglio.

2.1 Degrado fisico

Il degrado fisico si riferisce al deterioramento delle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche di un materiale nel tempo a causa di vari meccanismi, tra cui usura, fatica, erosione e corrosione. Solo nel settore petrolifero, sono stati classificati 66 principali tipi di diversi meccanismi di degradazione che affliggono i sistemi di contenimento primario. In altri settori esistono anche altri tipi di deterioramento dovuti alle diverse sostanze chimiche utilizzate e ai parametri operativi (ad esempio pressione, temperatura). Il degrado può anche essere accelerato da fenomeni naturali (ad esempio terremoti, allagamenti, fulmini) e da piccoli incidenti (ad esempio urti, scosse, surriscaldamento, sovrappressioni temporanee). Il degrado provoca guasti e rotture dei sistemi tecnici, che a loro volta potrebbero scatenare incidenti, con possibili gravi conseguenze per lavoratori, beni e ambiente. Per controllare il degrado del sistema di contenimento, nel corso degli anni sono state sviluppate tecniche avanzate, tra cui l'ispezione basata sul rischio RBI. Si basa su tre pilastri: la solida conoscenza dei diversi meccanismi di danno che influenzano i materiali, informazioni aggiornate e dettagliate sulla storia delle attrezzature e l'uso delle migliori tecniche di ispezione disponibili. La RBI è stata sviluppata dai primi anni 2000 dall'American Petroleum Institute ed è ora adottata in tutte le industrie del settore oil & gas. Anche se i documenti API sono focalizzati sui sistemi di contenimento statico primario, sono stati fatti molti sforzi per estendere l'ambito della RBI ad altre industrie di processo (ad esempio chimica ed energetica) e ad altri sistemi, incluse le macchine rotanti [6].

2.2 Obsolescenza

L'obsolescenza è un altro aspetto dell'invecchiamento. Essa può essere definita come la difficoltà e persino l'incapacità di reagire ai cambiamenti del contesto esterno. Il degrado fisico, dovuto all'accumulo lento di micro-danni causati da fenomeni noti e teoricamente controllabili è un fenomeno, di solito, lento, mentre l'obsolescenza è molto più rapida. L'emergere di nuovi prodotti, nuove tecnologie, nuovi standard, nuove regolamentazioni, nuove leggi, può rendere, da un giorno all'altro, un sistema

tecnico parzialmente o completamente inadatto a svolgere le sue funzioni, anche se fosse ancora in condizioni perfette. I sistemi elettrici ed elettronici sono soggetti a varie forme di degrado fisico, tra cui ossidazione, vibrazione, urti, sovratensioni e surriscaldamento, ma spesso l'obsolescenza arriva molto prima del degrado fisico. Le tecnologie digitali, tra cui le tecnologie dell'informazione (IT) e le tecnologie operative (OT), sono praticamente immuni dai fenomeni di degrado fisico, ma molto soggette all'obsolescenza. L'obsolescenza può essere considerata, in qualche modo, il lato oscuro dell'innovazione tecnologica: più veloce è l'innovazione, più difficile da controllare è l'obsolescenza [7].

2.3 *Invecchiamento organizzativo*

Un ulteriore aspetto dell'invecchiamento menzionato nella letteratura è il cosiddetto "Invecchiamento Organizzativo". Questo termine è stato introdotto inizialmente per situazioni in cui manca un naturale turnover del personale, e molte figure si ritirano senza poter trasferire le proprie competenze. Più in generale, si riconosce che l'esperienza e la conoscenza ingegneristica sono una risorsa preziosa, ma il trasferimento tra generazioni è minacciato da tagli al personale, cambiamenti aziendali ed esternalizzazione [8]. In modo più generale, l'invecchiamento organizzativo è l'incapacità di adattare modelli, processi e procedure organizzative al contesto in evoluzione. Anche le risorse di conoscenza ed esperienza, senza un continuo rilancio, possono diventare inutili a causa di bisogni in evoluzione. Questo fenomeno è analogo all'obsolescenza, ma colpisce lo strato intangibile dell'organizzazione, che ovviamente non subisce un processo di degrado, ma diventa rapidamente inadeguato al contesto interno ed esterno. L'invecchiamento organizzativo, alla fine, è una particolare forma di obsolescenza, infatti si verifica quando l'organizzazione, in risposta ai cambiamenti nel contesto esterno, non è in grado di adattare modelli, processi, procedure e risorse, rendendoli inadeguati a svolgere i propri compiti. Il termine più accurato, a nostro avviso, sarebbe "*obsolescenza organizzativa*", complementare all'obsolescenza tecnologica. Nonostante il degrado fisico, l'obsolescenza tecnologica e organizzativa presentano comportamenti non lineari che non sono facili da controllare.

2.4 Interdipendenza tra degrado e obsolescenza

Degrado, Obsolescenza Tecnologica e Obsolescenza Organizzativa sono intrecciati in modo complesso. Per controllare il degrado fisico, le attività di ispezione e manutenzione richiedono elevate prestazioni delle risorse tecniche e organizzative, che a loro volta potrebbero essere interrotte dall'obsolescenza e dall'invecchiamento organizzativo. Il fatto che processi e prodotti non soddisfino i nuovi criteri di sostenibilità riduce le opportunità di mercato, i margini di profitto e, in ultima analisi, le risorse necessarie per la manutenzione e il rinnovo degli impianti. I materiali ampiamente utilizzati in passato per costruire tipi critici di apparecchiature si sono dimostrati particolarmente vulnerabili ad alcuni fenomeni di degrado durante il

funzionamento prolungato. I risultati delle ricerche successive hanno sviluppato materiali molto più resistenti, ma quelli vecchi rimangono in uso, perché si preferisce prolungare la vita delle attrezzature esistenti e aumentare i costi operativi, piuttosto che investire in nuovi impianti. Questo può essere definito come "obsolescenza materiale". Un buon esempio di obsolescenza dei materiali è il problema del "creep" nelle raffinerie. Il creep, o scorrimento viscoso, è la deformazione plastica di un materiale sottoposto a sollecitazioni costanti che si verifica in materiali tenuti per lunghi periodi ad alte temperature. È una preoccupazione importante per gli impianti che operano ad alte temperature. I danni da creep si riscontrano in apparecchiature ad alta temperatura che operano sopra il range di creep, sono difficili da rilevare in anticipo e possono causare rotture catastrofiche, con gravi conseguenze per la vita umana e l'ambiente [9]. Nuove leghe resistenti ad alta pressione e temperatura furono sviluppate già negli anni '90. Tra questi figurano P91, P92 ed E911, con una soglia di creep molto più alta rispetto al materiale tradizionale (ad esempio acciaio al carbonio) e adatto all'uso sicuro negli impianti di raffinazione [10]. Molti impianti costruiti in precedenza sono però ancora in funzione e, di conseguenza, il creep è ancora una preoccupazione importante nelle raffinerie. Anche se il creep e fenomeni simili (p.e. sulfidazione a caldo) sono gestiti come degrado fisico, non si può ignorare come l'obsolescenza dei materiali sia alla base di questi problemi.

3. L'invecchiamento come rischio emergente.

Il problema invecchiamento era noto da anni, ma le ricadute di transizione digitale, transizione energetica e cambiamenti climatici ne stanno cambiano completamente le dimensioni, trasformandolo da rischio ben conosciuto a rischio emergente da valutare e gestire con adeguata intelligenza.

3.1 Transizione digitale

La transizione digitale sta trasformando molto rapidamente il nostro modo di lavorare in tutti i settori, ma d'altra parte rende obsolete molte tecnologie e competenze ancora in uso in molti impianti industriali. Molti problemi di cybersecurity, in particolare quelli riguardanti le tecnologie operative (OT), sono legati al fatto che i sistemi hardware e software che controllano i processi industriali, sviluppati molti anni fa, sono ora estremamente vulnerabili a tipi di attacchi esterni che all'epoca erano impensabili [11]. La modernizzazione e la gestione remota hanno collegato la OT a reti esterne, esponendole a minacce basate su internet [12]. Anche qui i problemi si intrecciano, perché se il degrado fisico è già a un certo livello, l'aggiornamento di tutta la tecnologia operativa può essere insostenibile, creando nuovi fattori di rischio. Nel settore Seveso, gli ispettori che, nell'applicazione della direttiva, visitano impianti industriali confermano che l'invecchiamento è uno dei rischi emergenti e dovrebbe essere visto come una combinazione di degrado fisico e obsolescenza tecnica e organizzativa [13].

3.2 Transizione energetica

La transizione energetica spinge fortemente verso nuovi processi, nuovi prodotti e nuove tecnologie, in linea con le esigenze di sostenibilità ambientale, ma si prevede che i combustibili fossili siano in uso per almeno due decenni [14]. La costruzione di nuovi impianti, basati su tecnologie verdi, attrae la maggior parte delle risorse disponibili [15], il che implicherà che i vecchi impianti, basati su combustibili fossili, continueranno a essere operativi e, senza nuovi investimenti, il problema dell'invecchiamento diventerà ancora più urgente. La maggior parte degli impianti petroliferi si troverà presto in una situazione critica. In realtà, sono obsoleti perché l'intero processo produttivo, dalla materia prima ai prodotti finiti, non è più compatibile con gli obiettivi di sostenibilità fissati a livello nazionale e internazionale. Anche se gli obiettivi non sono vincolanti, l'impegno a raggiungerli è comunque vincolante e quindi deve essere considerato, ad esempio, con una politica di sostituzione graduale. A livello locale, gli impegni vengono spesso rafforzati, aumentando ulteriormente il divario tra la direzione dello stabilimento e il contesto politico e sociale. La maggior parte degli impianti petroliferi ha molti decenni di esercizio alle spalle e l'adattamento tecnologico, sia per la parte elettrica ed elettronica sia per quella meccanica, è molto urgente, ma la dirigenza tende di solito a procrastinare, temendo che la vita residua dell'impianto possa essere più breve del tempo di ritorno dell'investimento. La mancanza di prospettive e di investimenti a lungo termine può anche avere effetti negativi sui modelli organizzativi e sulle procedure obsolete, sulla mancanza di turnover del personale con la perdita di esperienza, e sulla mancanza di formazione e motivazione del personale. In estrema sintesi, dall'obsolescenza tecnica arriviamo facilmente all'obsolescenza organizzativa.

3.3 Cambiamenti climatici.

Anche gli eventi naturali contribuiscono all'invecchiamento. Negli ultimi decenni, si è registrato un aumento dell'intensità e della frequenza dei fenomeni meteorologici, tra cui fulmini, tempeste e inondazioni, in molte regioni, presumibilmente causati dal cambiamento climatico. Questo contribuisce ad accelerare il degrado fisico di strutture e attrezzature, mentre il degrado dei materiali ne riduce la resistenza ai fenomeni naturali e a sua volta aumenta le conseguenze. La sovrapposizione tra transizione digitale, transizione energetica e cambiamento climatico, se non gestita, potrebbe trasformarsi in una "tempesta perfetta" [16].

3.4 le diverse dimensioni del problema

Il problema dell'invecchiamento degli impianti industriali, che comprende varie forme di deterioramento insieme all'obsolescenza tecnologica e gestionale, rappresenta una preoccupazione crescente, sebbene non del tutto nuova, dato il ritmo senza precedenti dei progressi in tutti i settori. La rapida innovazione rende obsoleti processi, prodotti, materiali, macchinari e strutture, il che a sua volta intensifica i problemi di degrado, causando usura dei materiali, compromissione dell'integrità

strutturale e riduzione dell'efficienza operativa. Questi elementi aumentano complessivamente le probabilità di guasti, perdite, tempi di inattività operativa, infortuni sul lavoro e incidenti gravi. Per comprendere i fattori di rischi associati all'invecchiamento, è necessario esaminare cinque dimensioni: 1) conoscenza, 2) complessità, 3) aspetti temporali, 4) controllabilità e 5) comportamento umano. I fattori nella dimensione della **conoscenza** includono effetti sconosciuti nell'organizzazione interna relativi all'obsolescenza di prodotti e processi, tasso di corrosione sconosciuto di vecchi materiali utilizzati per nuovi prodotti, dati insufficienti sulla probabilità di eventi indesiderati (ad esempio anomalie, guasti, incidenti e sinistri) correlati all'effetto combinato di obsolescenza e degrado, mancanza di un metodo per lo smaltimento di tecnologie in declino.
I fattori nella dimensione della **complessità** includono l'interconnessione tra vecchi e nuovi meccanismi di danno, l'equilibrio tra innovazione e obsolescenza, il ciclo di vita delle tecnologie innovative, l'innovazione nelle tecnologie di ispezione (ad esempio robot e intelligenza artificiale), dati insufficienti sulle conseguenze di potenziali decisioni sull'innovazione tecnologica e organizzativa.
I fattori della **dimensione temporale** includono la maggiore velocità di cambiamento nel contesto esterno (ad esempio, politica locale, nazionale e internazionale) e nel contesto interno (p.e. cambio di proprietà, fusioni e divisioni, turnover del personale, tagli finanziari e di personale).
I fattori nella dimensione della **controllabilità** includono gli effetti di fattori fuori dal controllo dell'organizzazione (ad esempio, pericoli naturali, cambiamenti nella legislazione e nei regolamenti nazionali e internazionali).
I fattori **comportamento umano** includono gli effetti dei cambiamenti di contesto su lavoratori e dirigenti. Esempi includono la scarsa familiarità e comprensione degli scenari emergenti derivanti dal passaggio a sistemi energetici digitali e sostenibili; visioni distorte e valutazioni errate dei pericoli interconnessi nelle strutture obsolete che affrontano queste transizioni. Scorciatoie mentali, come il sovraccarico dovuto a dati eccessivi, possono influenzare notevolmente il modo in cui vengono percepite le nuove minacce. Un altro esempio è la vulnerabilità alla supervisione. La natura multiforme di questi cambiamenti, combinata con le sfide sovrapposte dell'invecchiamento e dell'obsolescenza, spesso fa sì che gli individui siano sopraffatti dai dettagli, senza una comprensione fondamentale delle problematiche sottostanti.

4. Strumenti per valutazione e gestione del rischio invecchiamento

Le diverse linee guida tecniche sviluppate nell'ultimo decennio sulla gestione dell'invecchiamento sono tutte focalizzate sulla gestione dei rischi legati al degrado fisico e affrontano marginalmente gli aspetti dell'obsolescenza tecnica e organizzativa. La formidabile accelerazione della transizione digitale e le grandi incertezze (soprattutto politiche) che la accompagnano impongono un completo ribaltamento di paradigma. L'industria di processo dispone già di tutti gli strumenti scientifici e tecnici per controllare il degrado fisico e prolungare in sicurezza la vita

utile degli impianti, ottimizzare ispezioni e manutenzione, mentre mancano metodi per gli impianti che devono attraversare rapide transizioni tecnologiche, raccogliendo i benefici dei cambiamenti del contesto tecnologico e organizzativo e controllando i rischi che l'obsolescenza, l'inevitabile ombra dell'innovazione.

4.1 Fishbone

Per analizzare problemi generali come questo, il metodo Ishikawa (noto anche come metodo "fishbone") è ancora il più adatto. Cinque fattori principali da considerare quando si valuta l'invecchiamento come rischio emergente sono già stati descritti nel §3.4. Per completare il quadro necessario a comprendere il rischio di invecchiamento, c'è un solo tipo di fattore da aggiungere: i fattori riferiti al passato o fattori di background. Si riferiscono a ciò che è accaduto nella storia dell'impianto e che determinano le condizioni attuali e condizionano quelle future. I fattori di background si riferiscono alla storia fisica e alla storia organizzativa. La Figura 1 rappresenta schematicamente la spina di pesce dell'invecchiamento, visto come rischio emergente. La rappresentazione del disegno è limitata al primo livello.

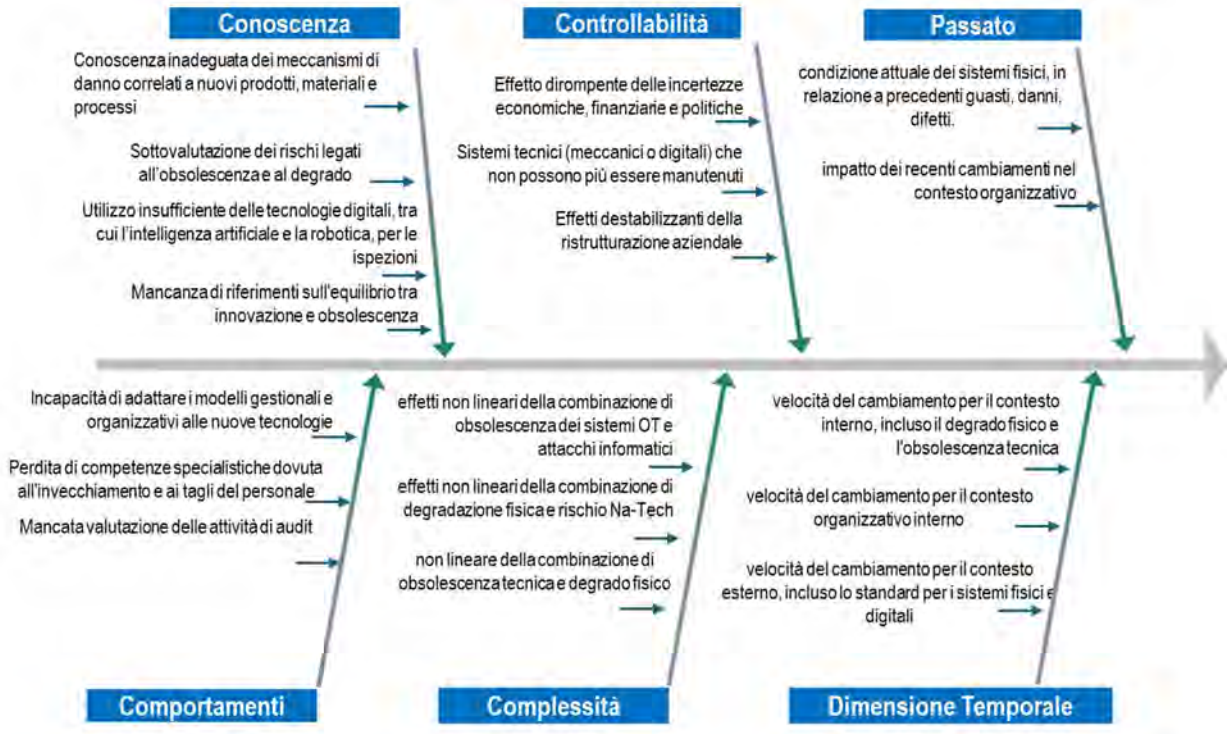


Figura 1. I fattori determinanti per l'invecchiamento rappresentati con un diagramma di Ishikawa

4.2 Check List

Il fishbone dell'invecchiamento è stato utilizzato per proporre una checklist che analizza uno per uno i fattori e i sotto fattori dell'invecchiamento, effettuando una diagnosi della capacità dell'organizzazione di gestire l'invecchiamento. Questa revisione può essere effettuata dal management in modo da poter prendere le decisioni migliori per aumentare la potenziale longevità dell'impianto. Anche negli

audit di terza parte, la spina di pesce dell'invecchiamento può essere utile per capire su quali punti è ancora possibile lavorare per arginare i danni del tempo. Nella checklist proposta si fa una prima distinzione tra fattori acceleranti e deceleranti. Questa distinzione era già stata introdotta nel nostro precedente lavoro incentrato sul degrado fisico [17] e qui è stata ripresa sottolineando il fatto che un fattore accelerante corrisponde a situazioni oggettive che non possono più essere modificate, mentre il fattore decelerante corrisponde sempre a una decisione o a un'attività che può essere intrapresa.

Fattori relative alla dimensione temporale. ACC.	1. per ogni E.C.F. controlla la durata effettiva e prevista
	2. per ogni E.C.D. verificare l'eventuale inadeguatezza ai nuovi standard industriali
	3. per ogni E.C.F. verificare eventuali nuovi standard
	4. per ogni tipo di E.C.F. rivedere e aggiornare i valori di tasso di guasto e velocità di corrosione
	5. per ogni E.C.F. valutare il tempo di attesa per il rilevamento dei danni
	6. per I.S. valutare la velocità del cambiamento del contesto organizzativo
Fattori relative al passato. Acceleranti	7. per ogni E.C.F. considerare i danni e i difetti registrati in passato
	8. per ogni E.C.F. considerare la riparazione e la modifica registrate in passato
	9. per ogni E.C.F. considerare i guasti registrati in passato
	10. per ogni E.C.F. considerare gli incidenti di processo registrati in passato
	11. per ogni E.C.F. considerare i possibili danni derivanti da eventi naturali passati
	12. per I.S. considerare l'impatto dei cambiamenti organizzativi nel recente passato
Fattori relative alla complessità. Acceleranti	13. per ogni E.C.F. comprendere i meccanismi di danno, relativi a carica, materiale, processo
	14. per ogni E.C.D. obsoleto comprendere gli effetti non lineari di possibili attacchi informatici
	15. per ogni E.C.F., comprendere effetti non lineari invecchiamento su vulnerabilità Na-Tech
	16. per ogni E.C.F., comprendere gli effetti non lineari dell'obsolescenza sul degrado
Fattori relative alla controllabilità. Acceleranti	17. per ogni E.C.F. considerare la possibile mancanza di assistenza o pezzi di ricambio
	18. per ogni E.C.D. considerare la possibile mancanza di aggiornamento o patch
	19. per I.S. considerare i possibili impatti dirompenti delle incertezze del mercato
	20. per I.S. considerare l'impatto delle incertezze politiche locali, nazionali e internazionali
	21. per I.S. considerare i possibili impatti dirompenti del contesto finanziario
	22. per I.S. considerare i possibili impatti dirompenti dei cambiamenti organizzativi
Fattori relativi al comporta-mento Deceleranti	23. Per I.S. valutare l'adeguatezza dell'impegno per la sicurezza, della leadership e della cultura
	24. Per I.S. valutare l'adeguatezza della politica di invecchiamento, se presente
	25. Per I.S. valutare l'adeguatezza delle risorse per l'attuazione della politica di invecchiamento
	26. Per I.S. considerare la certificazione degli ispettori secondo standard riconosciuti
	27. Per I.S. considerare i risultati di ispezioni/audit indipendenti su sicurezza e l'invecchiamento
Fattori relative alla conoscenza Deceleranti	28. Per I.S. verificare conoscenza interna su nuovi e vecchi meccanismi di degrado fisico
	29. Per I.S. verificare conoscenza delle tecniche usate per valutazione rischio invecchiamento
	30. Per I.S. verificare conoscenza su tecniche attive e passive protezione da corrosione
	31. Per I.S. verificare conoscenza delle tecniche di analisi degli incidenti e dei guasti
	32. Per I.S. verificare l'adeguatezza del documento sull'integrità delle risorse e sulla tecnologia
	33. Per I.S. verificare disponibilità linee guida sul controllo dell'invecchiamento / obsolescenza
	34. Per I.S. conoscere i vantaggi delle ispezioni digitali e robotiche, inclusi i modelli predittivi AI

Tabella 1. Proposta per una "Checklist per l'invecchiamento".

Legenda E.F.C.= Elemento Fisico Critico, E.D.C.= Articolo Digitale Critico, I.S. Intero Stabilimento.

Fattori diversi possono avere pesi diversi, ma questo deve essere deciso dall'utente in base al contesto specifico; deve essere mantenuto solo il segno negativo per i fattori acceleranti e positivo per i fattori deceleranti.
Un'ulteriore distinzione riguarda i fattori da valutare per l'intero stabilimento e i fattori da valutare separatamente per ciascun elemento critico. Gli elementi critici digitali e fisici vengono a loro volta discriminati, poiché i primi sono soggetti solo a obsolescenza, mentre i secondi sono soggetti sia a obsolescenza che a degrado fisico. Nella tabella 1 è riportata, in forma sintetica, la checklist proposta.
La checklist dovrebbe essere utilizzata per individuare le debolezze e sviluppare un adeguato Piano di Gestione dell'Invecchiamento. La checklist potrebbe essere utile per ispezioni obbligatorie nei siti Seveso. La checklist proposta è organizzata in modo analogo a quella utilizzata per l'ispezione Seveso in Italia dal 2018 [18], ma differisce per l'ambito, che è molto più ampio includendo, oltre al degrado fisico, tutti gli aspetti immateriali dell'invecchiamento.

5. Conclusioni

La gestione dell'invecchiamento è un obiettivo a livello organizzativo, non solo una questione tecnica, che coinvolge più reparti come ispezione, manutenzione, sicurezza, produzione, IT, acquisti, legale e personale. Richiede risorse adeguate e un impegno di alto livello, con l'invecchiamento sicuro integrato come obiettivo strategico nella politica di prevenzione dei grandi incidenti per favorire la cooperazione fra i diversi reparti.
Gli enti di controllo nel settore Seveso da tempo hanno incluso, fra i punti da verificare nelle ispezioni, il deterioramento dei sistemi di contenimento critici ai fini dell'incidente rilevante, ma oggi devono migliorare le loro pratiche ispettive per estendere l'attenzione a tutta la questione invecchiamento, includendo anche l'obsolescenza, che interessa tutti i sistemi dell'impianto, sia quelli meccanici che quelli elettrici, elettronici e informatici.

Bibliografia

[1] Vitale, M., Shi, H., Rodriguez, D. J. C., Barresi, A., & Demichela, M., 2024, Aging in Process Industry: Identification of Material Degradation from Past Accidents Analysis. IFAC-PapersOnLine, 58(4), 568-573.

[2] Wood, M. H., Arellano, A. V., & Van Wijk, L. 2013, Corrosion related accidents in petroleum refineries. EU Commission Joint Research Centre, rep.no. EUR, 26331.

[3] Bragatto P., Milazzo M.F., Vairo T., Hansler R., Bellamy L.J., 2022, Control of plant aging at Seveso sites: achievements in research and transfer to current practice, Chemical Engineering Transactions, 90, 703-708.

[4] Ancione, G., Ansaldi, S., Bragatto, P., Agnello, P., & Milazzo, M. 2024, An ontological approach increasing the knowledge about equipment ageing including the effects of current transitions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries.

[5] Petterson, L. & Simola, K.,2006, Aging of Components and Systems. An ESReDA Working Group Report. Det Norske Veritas, Høvik, Norway

[6] Tomala, M., Rusin, A., & Wojaczek, A., 2020, Risk-based planning of diagnostic testing of turbines operating with increased flexibility. Energies, 13(13), 3464.
[7] Luo, H., Yang, B., Liu, Z., Ding, C.J., Liu, B., 2024, The bright and dark sides: Unpacking the effect of digital economy on resource curse. Journal of Cleaner Production, 485, art. no. 144351
[8] Kamps, M., van den Boomen, M., van den Bogaard, J., Hertogh, M., 2024, Intergenerational transfer of engineering expertise: knowledge continuity management in storm surge barrier engineering. Built Environment Project and Asset Management, 14 (6), 874-891.
[9] Darling, K., Rajagopalan, M., Komarasamy, M., Bhatia, M., Hornbuckle, B., Mishra, R., & Solanki, K., 2016, Extreme creep resistance in a microstructurally stable nanocrystalline alloy. Nature, 537, 378-381.
[10] Ennis, P.J., Czyrska-Filemonowicz, A., 2003, Recent advances in creep-resistant steels for power plant applications. Sadhana 28, 709–730
[11] Kayan, H., Nunes, M., Rana, O., Burnap, P., & Perera, C.,2021, Cybersecurity of Industrial Cyber-Physical Systems: Review. ACM Computing Surveys (CSUR), 54, 1-35.
[12] Aslam, M., Tufail, A., Apong, R., De Silva, L., & Raza, M., 2024, Scrutinizing Security in Industrial Control Systems: An Architectural Vulnerabilities and Communication Network Perspective. IEEE Access, 12, 67537-67573.
[13] Kotek, L., Křivánek, D., Mukhametzianova, L., Machátová, Z., Trávníček, P., 2024, Ageing Management in the Prevention of Major Accidents in the Czech Republic Chemical Engineering Transactions, 111, 13-18
[14] Holechek, J., Geli, H., Sawalhah, M., & Valdez, R., 2022, A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?. Sustainability.
[15] Plantinga, A., & Scholtens, B., 2021, The financial impact of fossil fuel divestment Climate Policy, 21(1), 107–119.
[16] Dwivedi, Y.K. et al. 2022 Climate change and COP26: Are digital technologies and information management part of the problem or the solution? An editorial reflection and call to action. Int. J. Inf. Manag., 63 102456.
[17] Bragatto, P. Bemporad, E. Delle Site, C. Pirone, A. Vallerotonda, M.R. Bellamino, F. Vairo, T. Milazzo, M.F., 2021, L'approccio gestionale al problema "invecchiamento" negli stabilimenti Seveso Atti Safap INAIL ISBN 978-88-7484-709-9.
[18] Milazzo, M. F., & Bragatto, P. 2019. A framework addressing a safe ageing management in complex industrial sites: The Italian experience in «Seveso» establishments. Journal of Loss Prevention in the process industries, 58, 70-81.

L’analisi del controllo operativo nelle ispezioni “Seveso”: risultati dai rapporti finale di ispezione nei primi anni di applicazione del D.lgs. 105/2015

M. R. Vallerotonda[1], A. Pirone[1], C. Delle Site[1]

[1]Inail – Dit

Sommario
I gestori degli impianti industriali assoggettati al d.lgs. 105/2015 sono obbligati a redigere un documento nel quale sia definita la propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti. La normativa prevede che siano effettuate ispezioni sul sistema di gestione della sicurezza (SGS PIR) da parte di commissioni interdisciplinari incaricate, al termine dell’attività, di redigere un rapporto finale (RFI) contenente gli esiti dell’ispezione stessa. L’Inail è organo tecnico per le Autorità competenti ai fini dell’applicazione del decreto ed i tecnici dell’Istituto partecipano anche all’attività ispettiva. A partire dal 2016, con l’entrata in vigore del d.lgs. 105/2015, l’Istituto monitora periodicamente lo stato di attuazione delle ispezioni e, contestualmente, effettua una raccolta documentale, comprensiva dei RFI, finalizzata alla definizione di strumenti ed indirizzi, quali prodotti dell’attività di ricerca, per il miglioramento della sicurezza negli impianti industriali. Partendo dalle raccomandazioni e proposte di prescrizione riportate nei rapporti di ispezione redatti in circa un decennio dall’entrata in vigore del decreto ed in particolare dal 2016 al 2023, il presente lavoro effettua un’ analisi generale di quelle formulate in relazione al controllo operativo, l’elemento del SGS PIR fondamentalmente correlato alla gestione operativa dell’impianto con particolare riferimento alle apparecchiature critiche che possono essere interessate da una perdita di contenimento più o meno rilevante.

1. Introduzione

I gestori degli stabilimenti soggetti alla normativa sul controllo del pericolo di incidente rilevante (“Seveso”) sono responsabili dell'attuazione di strategie efficaci per prevenire il verificarsi di incidenti e per mitigarne le conseguenze sulla salute umana e sull'ambiente [7]. In linea con la precedente normativa, la Direttiva 2012/18/EU [4] ha confermato l’importanza del sistema di gestione della sicurezza per il controllo del pericolo di incidente rilevante (SGS PIR) in quanto rappresenta uno degli strumenti fondamentali a disposizione dei gestori per prevenire gli incidenti in un’ottica di miglioramento continuo. Basso et al. (2004) [1], Wood (2005) [9] e Bragatto et al. (2017) [2] riportano, a tal proposito, che il sistema delle ispezioni Seveso è lo strumento più potente ed efficace a disposizione delle Autorità per garantire la conformità legislativa e prevenire gli incidenti rilevanti. In attuazione della Direttiva, il D.lgs. 26 giugno 2015, n.105 [5] richiede ai gestori di redigere un documento nel quale sia definita la propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti, allegando allo

stesso il programma adottato per l'attuazione del sistema di gestione della sicurezza (SGS PIR) predisposto conformemente in conformità all'allegato 3 del decreto e alle linee guida definite nell'allegato B. Al contempo, la normativa, sia europea che nazionale, individua nelle ispezioni sul SGS PIR che siano effettuate ispezioni sul SGS PIR uno strumento per garantire e mantenere un elevato livello di sicurezza negli impianti attraverso un approccio di verifica multidisciplinare e consolidato negli anni. Il d.lgs. 105/2015 non solo ha confermato, ma ha anche rafforzato il sistema delle ispezioni. Le modalità per lo svolgimento delle ispezioni sono dettagliamene riportate nell'allegato H del decreto che prevede anche l'utilizzo di format specifici, tra cui una lista di riscontro. Si tratta di un articolata checklist che fa riferimento agli elementi fondamentali del SGS PIR (così come richiamati nell'allegato 3) e che, attraverso una serie di sottopunti, permette di approfondire l'analisi dei singoli aspetti da esaminare. Le ispezioni sono effettuate da una Commissione che, al termine dell'attività, redige un rapporto (chiamato "rapporto finale di ispezione" – RFI) contenente le conclusioni della disamina effettuata. Il RFI è lo strumento attraverso il quale la Commissione valuta il SGS PIR ed il suo livello di implementazione. Ad oggi, non sono disponibili studi specifici in termini di valutazione generale dei contenuti del RFI redatti in seguito alle ispezioni effettuate a partire dall'entrata in vigore del d.lgs. 105/2015 e, soprattutto, sui singoli aspetti del SGS PIR. La maggior parte degli studi si focalizza principalmente sull'analisi di incidenti con l'obiettivo di analizzarne le cause e condividere le lezioni apprese in seguito al verificarsi di un evento indesiderato, purtroppo il più delle volte catastrofico. Un esempio dell'approccio adottato per l'analisi di tali eventi è riportato da Marrazzo et al. (2020) [6] che hanno discusso le lezioni apprese, sia dal punto di vista organizzativo che tecnico, per un incidente avvenuto in un impianto chimico. Lo studio presentato in questo articolo si focalizza sugli esiti delle valutazioni ottenute durante le ispezioni sul SGS PIR. L'obiettivo dell'articolo è chiaramente riportato nel paragrafo 2; la successiva organizzazione prevede la descrizione della documentazione di riferimento e della metodologia di analisi utilizzata (rispettivamente paragrafi 3 e 4) e la discussione dei primi risultati ottenuti (paragrafi 6).

2. Obiettivo

Dal 2016, con l'entrata in vigore del d.lgs. 105/2015, l'Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (Inail) effettua monitoraggi periodici sulle ispezioni SGS PIR per verificarne il loro stato di attuazione e raccogliere sistematicamente la documentazione prodotta a conclusione delle ispezioni, inclusi i rapporti finali di ispezione (RFI). Le attività di monitoraggio riguardano gli stabilimenti di soglia superiore soggetti alla normativa ed interessano tutto il territorio nazionale. Il presente lavoro ha l'obiettivo di presentare, in forma anonima e aggregata, gli esiti delle valutazioni effettuate dalle Commissioni, in termini di raccomandazioni e proposte di prescrizione, a partire dall'entrata in vigore del decreto focalizzando l'attenzione principalmente sul controllo operativo. Le valutazioni si basano sui RFI

pervenuti in seguito all'attività di monitoraggio; il periodo di riferimento considerato ai fini dell'analisi è relativo agli anni dal 2016 al 2023 (anno a cui corrisponde l'ultimo monitoraggio secondo le modalità di seguito descritte) che di fatto sono gli anni di prima applicazione del D.lgs. 105/2015. Ad essi si aggiungono anche alcuni rapporti pervenuti nel 2024 da parte degli ispettori dell'Istituto.

3. Materiali

3.1 Le ispezioni SGS PIR

Gli elementi che sostanziano il SGS PIR, come indicato nel paragrafo 2, sono indicati nell'Allegato 3 del decreto e sono: organizzazione e personale, identificazione e valutazione di pericoli, controllo operativo, gestione delle modifiche, pianificazione delle emergenze, monitoraggio delle prestazioni e controllo e revisione. La normativa, inoltre, specifica che il sistema di gestione della sicurezza deve essere proporzionato ai pericoli, alle attività industriali e alla complessità dell'organizzazione dell'impianto e deve basarsi sull' analisi di rischio. Il SGS PIR è soggetto ad ispezioni i cui criteri per la pianificazione, la programmazione e l'esecuzione sono specificati nell'Allegato H. Le ispezioni consistono in un esame pianificato e sistematico dei sistemi tecnici, organizzativi e di gestione applicati nell'impianto e mirano a verificare la conformità di quanto dichiarato nel Documento di politica di prevenzione degli incidenti rilevanti in termini di impegno del gestore in un'ottica di miglioramento continuo, oltre che a valutare il livello di consapevolezza dei rappresentanti aziendali in relazione ai diversi livelli delle figure coinvolte nell' applicazione del sistema di gestione ed il coinvolgimento degli stakeholders. Le ispezioni sono svolte sulla base di una pianificazione triennale, predisposta delle Autorità competenti, alla quale segue, a livello regionale, la programmazione annuale delle ispezioni presso gli stabilimenti di competenza effettuata dai Comitati tecnici regionali (CTR). Tutti gli stabilimenti notificati ai sensi dell'art. 13 del d.lgs. 105/2015 devono essere inseriti nella specifica programmazione regionale. Le ispezioni sono effettuate da una commissione interdisciplinare secondo le procedure definite dalla normativa Seveso. La procedura prevede che le Commissioni acquisiscano specifici format compilati dal gestore prima dell'avvio dell'ispezione e poi esaminino gli elementi del sistema di gestione utilizzando la "lista di riscontro".

3.2 I rapporti finale di ispezione

Al termine dell'ispezione la Commissione redige un rapporto nel quale riporta gli esiti della stessa. I contenuti del rapporto sono ben definiti dalla normativa e possono essere descritti facendo riferimento essenzialmente ad una parte iniziale ed alla specifica valutazione del SGS PIR sulla base della lista di riscontro. Le sezioni iniziali sono sostanzialmente descrittive dello stabilimento e mirano a fornire un quadro il più possibile aggiornato dello stesso in termini di attività, posizione rispetto all'ambiente ed al territorio in cui si trova e rispetto alla presenza di altre attività

industriali, modifiche intervenute nel tempo, informazioni connesse agli adempimenti di legge (notifica, rapporto di sicurezza, pianificazione di emergenza, informazione alla popolazione, ecc,); successivamente è riportata una descrizione "dettagliata" di quanto riscontrato nel corso dell'ispezione per accertare l'adeguatezza della politica posta in atto dal gestore e del relativo sistema di gestione. Per ogni elemento del SGS PIR, sulla base delle richieste di verifica inserite nella lista di riscontro, è necessario indicare i riscontri della Commissione, le evidenze che sono state presentate e richieste a supporto di quanto dichiarato a livello documentale e gli eventuali rilievi emersi nel caso in cui la Commissione abbia rilevato una non conformità (NC). In relazione all'entità del rilievo effettuato, le NC possono essere "minori" o maggiori", così come definite rispettivamente al paragrafo 1, lettere c e d dell'allegato H. A sua volta, sulla base del tipo di NC, la Commissione formula proposte di raccomandazione (nel caso di una NC minore) oppure proposte di prescrizione (nel caso di una NC maggiore). Il RFI, datato e sottoscritto, è inviato al CTR che, in seduta collegiale, valuta le raccomandazioni e le proposte di prescrizione e decide se notificarle tal quali alla società indicando un termine ultimo di adempimento.

3.3 Raccolta documentale Inail ed ispezioni SGS PIR

L'Inail è organo tecnico per i Ministeri competenti ai fini dell'attuazione del decreto ed i tecnici dell'Istituto, sia a livello centrale che territoriale, partecipano alle ispezioni effettuate sul SGS PIR. Il Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici (Dit) ha un ruolo attivo nel sistema delle ispezioni; infatti, gestisce le designazioni, a livello nazionale, dei tecnici dell'Istituto nelle commissioni ispettive previa verifica della corrispondenza ai requisiti richiesti dal decreto e ai criteri interni di designazione; inoltre, monitora la formazione e l'addestramento degli ispettori. Con cadenza triennale, in linea con la pianificazione nazionale, l'Istituto effettua il monitoraggio dello stato delle ispezioni programmate annualmente dai CTR e richiede l'invio di format compilati dal gestore ed acquisiti dalle Commissioni, nonché dei RFI. La documentazione raccolta rappresenta il punto di partenza per la definizione di strumenti ed indirizzi, quali prodotti dell'attività di ricerca, per il miglioramento della sicurezza negli impianti industriali.

4. Metodologia

Per le finalità dello studio, gli stabilimenti sono stati raggruppati in 7 macrosettori. Ogni macrosettore comprende le tipologie ad esso riconducibili (in virtù dell'affinità di attività e/o di processo) che fanno riferimento all'elenco riportato nell'allegato V del decreto nel quale sono numerate in ordine crescente da 1 a 39.

La tabella 1 indica, per ogni macrosettore, le tipologie di attività considerate in relazione all'elenco dell'allegato V. Nella colonna 3 è riportato il numero totale di tutti stabilimenti per ogni macrosettore, che corrisponde alla somma del numero di

stabilimenti di soglia superiore che risultano notificati in una delle tipologie che fanno capo a quello specifico macrosettore. Il dato è aggiornato a dicembre 2025 [8].

Macrosettore	Tipologie (All. V d.lgs. 105/2015)	n° stab.
Depositi GPL/GNL	13, 14, 15	111
Impianti chimici	22, 23, 38	118
Raffinerie e Impianti petrolchimici	8, 9, 10	60
Industrie di esplosivi e pirotecniche	11, 12	26
Acciaierie e industrie metallurgiche	4, 5, 6, 7	29
Altre	1, 2, 3, (16 ÷ 21), (24 ÷ 37), 39	161
Totale		505

Tabella 1. Macrosettore e numero di stabilimenti per tipologie di attività

L'analisi presentata è stata effettuata sui RFI redatti dalle Commissioni ispettive dal 2016 al 2023 e che sono stati raccolti attraverso i monitoraggi periodici. I piani triennali di ispezione, a cura del Ministero dell'Interno e delle Autorità competenti richiamate dal decreto, sono i periodi: 2016-2018, 2019-2021 e 2022-2023. In ogni triennio, sono effettuate annualmente le ispezioni programmate a livello regionale.

.

Macrosettore	2016-2018	2019-2021	2022-2024
Depositi GPL/GNL	136	83	75
Impianti chimici	115	75	46
Raffinerie e Impianti petrolchimici	7	16	9
Industrie di esplosivi e pirotecniche	24	12	14
Acciaierie e industrie metallurgiche	14	8	8
Altre	77	52	59
Totale	373	246	211

Tabella 1. Ispezioni SGS-PIR nei trienni per macrosettori

La Tabella 2 mostra il numero totale di ispezioni programmate per ciascun macrosettore nei trienni considerati. Per l'ultimo triennio, si è tenuto conto anche di alcuni rapporti di ispezione del 2024 pervenuti.
Il monitoraggio periodico ha consentito di raccogliere la maggior parte dei rapporti elaborati dalle Commissioni; nella Tabella 3 è riportato per ogni triennio e riferito a ciascun macrosettore il numero di rapporti raccolti.

Macrosettore	2016-2018	2019-2021	2022-2024
Depositi GPL/GNL	135	82	75
Impianti chimici	114	74	46
Raffinerie e Impianti petrolchimici	6	16	8
Industrie di esplosivi e pirotecniche	24	12	14
Acciaierie e industrie metallurgiche	14	8	7
Altre	76	47	49
Totale	369	239	199

Tabella 2. RFI raccolti nei trienni e suddivisi per macrosettori

Tutti i RFI pervenuti sono stati letti ed analizzati e di seguito sono riportati i risultati relativi all'esame effettuato per il punto 4 della lista di riscontro "controllo operativo" (CO). Il CO è quella parte del SGS PIR relativa alla gestione operativa dell'impianto, prende in considerazione le apparecchiature critiche, alle attività di ispezione, controllo e manutenzione delle stesse (con particolare riguardo agli eventi incidentali ipotizzati nell'analisi di rischio), alle modalità di gestione delle ditte terze (anche in relazione alla valutazione dei rischi di interferenza) ed, in attuazione da quanto esplicitamente introdotto dalla nuova normativa, alla valutazione e gestione dell'invecchiamento e dei fenomeni di danneggiamento degli impianti con particolare riguardo alla corrosione. Si riportano per completezza, i sottopunti previsti dalla lista di riscontro per l'esame del controllo operativo:

- identificazione degli impianti e delle attrezzature soggette ai piani di verifica (4.i);
- gestione della documentazione (4.ii);
- procedure e istruzioni operative in condizioni normali, anomale e di emergenza (4.iii);
- procedure di manutenzione (4.iv);
- approvvigionamento di beni e servizi (4.v).

In analogia agli altri elementi del sistema di gestione ed ai relativi sottopunti di esame, anche questi ultimi, a loro volta, sono ulteriormente e dettagliatamente declinati negli aspetti (che di seguito sono indicati come sotto-elementi) da prendere in considerazione durante l'ispezione e rispetto ai quali chiedere ai gestori evidenze.

5. Risultati

I risultati sono stati elaborati sulla base dei rilievi delle Commissioni, cioè delle non conformità rilevate per ciascun sottopunto del controllo operativo enunciato nella lista di riscontro; in particolare, sono state considerati il numero di raccomandazioni e/o proposte di prescrizione inserite nei rapporti pervenuti.

È bene precisare che il numero di raccomandazioni e proposte di prescrizione formulate dalla Commissione ispettiva è, in linea di massima, proporzionale ai rilievi effettuati dalla Commissione, ma per ogni sottopunto è possibile che siano presenti una o più raccomandazioni/proposte di prescrizione oppure sia raccomandazioni che

proposte di prescrizione falsando in qualche modo il numero totale annoverato per le stesse. I risultati del triennio 2019-2021 sono influenzati dalle condizioni derivanti dall'emergenza pandemica come descritto da Bragatto et al. (2021) [3].

5.1 Controllo operativo: prescrizioni e raccomandazioni nelle industrie Seveso 2016-2024

Le Tabelle 4 e 5 riportano rispettivamente le raccomandazioni (R) e le proposte di prescrizione (P) formulate per ogni sottopunto del controllo operativo (CO) nel periodo 2016-2024 in tutti gli stabilimenti (indipendentemente dal macrosettore) per i quali è stato ricevuto il RFI.

Sottopunti	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
4i	69	101	108	69	20	51	78	38	26
4ii	46	75	47	30	9	21	39	13	14
4iii	33	49	48	41	14	19	30	13	17
4iv	51	79	60	50	23	46	60	28	23
4v	28	40	46	34	12	20	25	14	14

Tabella 3. R totali nelle ispezioni SGS-PIR per il CO negli anni 2016-2024

Sottopunti	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
4i	46	56	45	43	18	21	31	13	19
4ii	16	19	18	11	3	1	6	6	6
4iii	23	21	17	13	9	10	7	3	5
4iv	26	45	27	28	10	15	12	5	10
4v	13	11	11	12	3	8	5	1	5

Tabella 4**.** P totali nelle ispezioni SGS-PIR per il C.O. negli anni 2016-2024.

In generale, per quanto riguarda le raccomandazioni, i sottopunti oggetto di maggiore rilievo sono stati i sottopunti 4i e 4iv che riguardano l'identificazione e gestione delle attrezzature critiche e la loro manutenzione. Ad eccezione di alcuni picchi di variazione (come nel caso dei 4.ii), il numero di R è rimasto in linea di massima costante per tutti i sottopunti del CO; al contrario, per le P si può osservare una diminuzione del numero dei rilievi per quasi tutti i sottopunti, ad eccezione del 4.i che rimane comunque alto. Si può osservare che le P formulate per i sottopunti 4i, 4iii e 4iv sono sempre numerose e l'andamento non varia nel corso degli anni.

Per ogni sottopunto del CO, è stata riportata nel Grafico 1 nel quale le R e le P indicate nella tabella 3 e nella tabella 4 sono presentate in riferimenti al triennio.

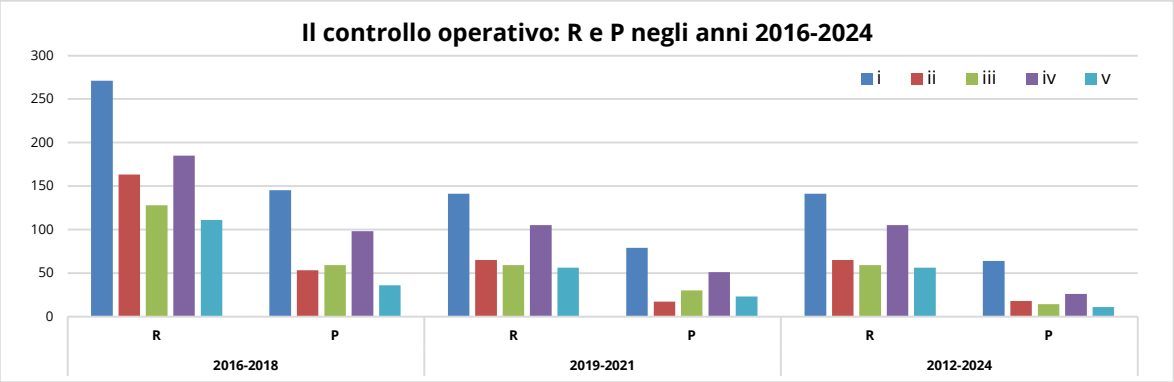


Grafico 1. Il controllo operativo nelle industrie Seveso triennio 2016-2024.

La scelta di presentare i risultati in riferimento al triennio generale risponde alla necessità di valutare le informazioni sulla base di un periodo di tempo che è riconosciuto a livello nazionale per lo svolgimento delle ispezioni. Nell'ambito del triennio, sulla base della programmazione a livello regionale, lo stabilimento è soggetto ad ispezione secondo una specifica periodicità che può essere annuale, biennale o triennale sulla base dei criteri e delle indicazioni di pianificazione nazionale. Se da una parte si deve considerare che questa specifica informazione viene persa effettuando una valutazione generale nel triennio indicato, dall'altra si può assumere comunque accettabile per una prima analisi al fine di avere indicazioni sulle problematiche da approfondire.
I valori più alti delle R sono associati al triennio 2016-2018, si tratta degli anni immediatamente successivi all'entrata in vigore del decreto nei quali si riscontra anche un numero maggiore di ispezioni. I sottopunti maggiormente critici sono il 4.i e 4.iv. Questi sottopunti sono strettamente correlati tra di loro per quanto riguarda l'identificazione delle apparecchiature critiche ed il loro successivo inserimento nei piani di ispezione, controllo e manutenzione. L'inserimento di tali elementi all'interno dei piani di manutenzione, comporta che anche il sottopunto punto 4.iv risulta quello con maggiori non conformità. La corretta identificazione degli elementi e delle attrezzature critiche è fondamentale per superare i persistenti rilievi registrati.

5.2 Presentazioni delle non conformità nei trienni

Di seguito è presentata un'analisi di dettaglio dei trienni in relazione ai macrosettori considerati nel presente studio.
Nel Grafico 2 sono presentate le R e P formulate per il punto 4 della lista di riscontro nel triennio 2016-2018. In questo triennio per tutti i macrosettori le R sono sempre più numerose delle P ed il sottopunto 4i è il più critico per tutti i macrosettori, come anticipato ciò si riflette sul punto 4.iv.

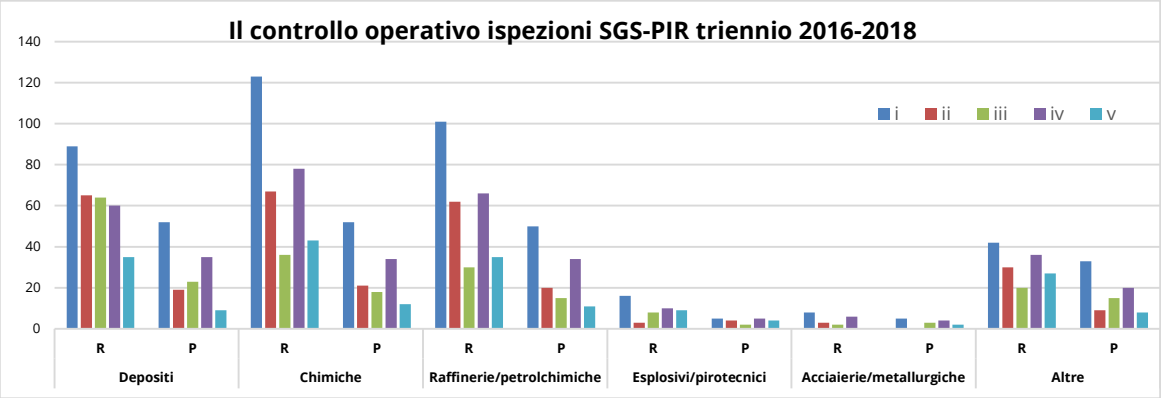


Grafico 2. Il controllo operativo nelle industrie Seveso triennio 2016-2018.

Sia per le R che per le P questi due sottopunti presentano i valori più elevati. Si osserva che, in generale, i macrosettori "industri esplosive e pirotecniche" e "acciaierie ed industrie metallurgiche" hanno i valori minori e ciò è probabilmente da ricondurre al minor numero di stabilimenti presenti nel macrosettore e di conseguenza al minor numero di ispezioni.
Nel Grafico 3 sono riportate le R e le P rilevate per il triennio 2019-2021.

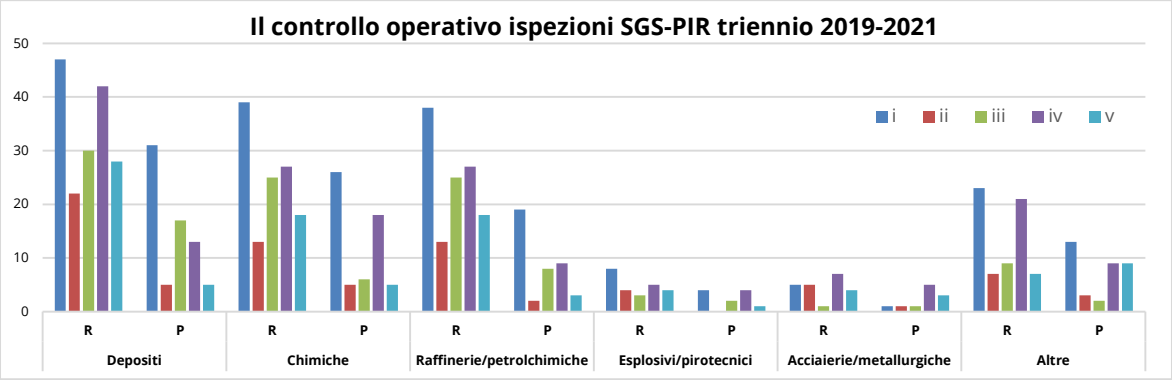


Grafico 3. Il controllo operativo nelle industrie Seveso triennio 2019-2021.

Viene confermato l'andamento critico registrato per i sottopunti 4i e 4iv, ma rispetto al triennio precedente si osserva un incremento delle raccomandazioni per il sottopunto 4iii (relativo alle procedure e istruzioni operative in condizioni normali, anomale e di emergenza) nel caso dei macrosettori depositi, industrie chimiche e raffinerie/impianti petrolchimici. Elevati sono anche i valori delle P per il sottopunto 4iii per i depositi e per le raffinerie/impianti petrolchimici.

Il Grafico 4, infine, riporta le R e P formulate nelle ispezioni del triennio 2022-2024. Per quanto riguarda le R si riscontra che la numerosità è elevata per il sottopunto 4i dei depositi e delle industrie chimiche e che per i depositi è elevato anche il numero di R formulato per il sottopunto 4iii; per i depositi e per le raffinerie/impianti petrolchimici non sono da sottovalutare il numero delle P del sottopunto 4i, confermando le criticità del sottopunto.

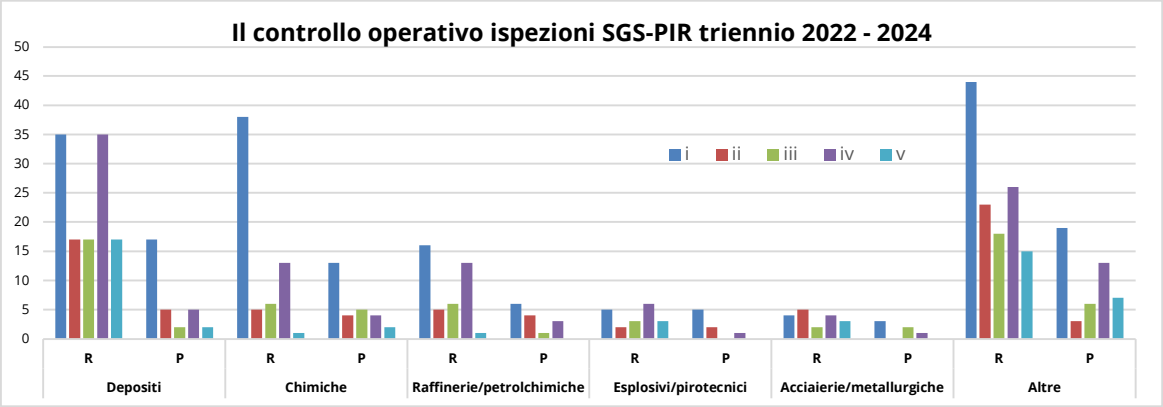


Grafico 4. Il controllo operativo nelle industrie Seveso triennio 2022-2024.

5.3 Raccomandazioni e proposte di prescrizione: principali non conformità

I dati mostrano che il maggior numero di R e P sono in corrispondenza dei sottopunti 4i, 4ii, 4iii e 4iv con un approfondimento sul rischio invecchiamento delle attrezzature.
-Sottopunto 4.i: le raccomandazioni si riferiscono sia all'identificazione degli elementi critici non corretta da parte del gestore che al relativo inserimento nel piano di manutenzione; sono registrate carenze nella regolarità di esecuzione dei test per la verifica dei sistemi di sicurezza predisposti per prevenire e/o mitigare gli scenari incidentali e nella coerenza tra le ipotesi prese a riferimento nel Rapporto di sicurezza e le periodicità adottate per i controlli e manutenzioni.
-Sottopunto 4.ii: riguarda la conservazione e l'aggiornamento della documentazione, le osservazioni delle commissioni sono relative principalmente alle sostanze coinvolte e ai materiali impiegati (richiamando in questo punto l'aggiornamento delle schede di sicurezza delle sostanze pericolose) ed alla disponibilità dei diagrammi di processo. Per quanto riguarda le proposte di prescrizioni (P) per i sottopunti 4.i e 4.ii, esse richiamano i suddetti aspetti, ma in occasione di riscontri con carenze gravi rilevati anche in riferimento a mancate ottemperanze di precedenti raccomandazioni.
-Sottopunto 4.iii: le non conformità minori più numerose sono state formulate in merito alle procedure di avvio e fermata delle attrezzature sia in condizioni di normale utilizzo che di emergenza spesso assenti. Per lo stesso sottopunto le proposte di prescrizione più numerose riguardano difetti, a monitor, nella lettura delle segnalazioni di anomalie, non visibili e/o facilmente comprensibili o la mancanza di procedure con indicazioni di messa in sicurezza degli impianti in condizioni di anomalia.
-Sottopunto 4.iv: le raccomandazioni sono successive a rilievi sui registri di manutenzione che non sono risultati compilati o aggiornati correttamente. Il maggior numero di prescrizioni è, invece, associato alla non corretta compilazione dei permessi di lavoro in ogni loro parte oppure ad un errato utilizzo, ad esempio senza una precisa identificazione in procedura del relativo impiego. Ricorrente è il rilievo emerso in relazione alla qualificazione dei lavoratori che svolgono interventi specifici.
-Invecchiamento degli impianti e delle apparecchiature: i riscontri sui rischi legati all'invecchiamento di attrezzature e impianti sono riportati nel sottopunto 4.i. del

presente lavoro; vista la rilevanza assunta con la nuova normativa si è deciso di trattare la tematica separatamente. La Direttiva 2012/18/UE ha esplicitato, tra gli elementi del SGS all'interno del controllo operativo, la necessità di gestire tale rischio ed il D.lgs. 105/2015, conseguentemente, ha introdotto per i gestori l'obbligo di adottare piani di monitoraggio e controllo. Si è trattato di una novità sia per i gestori che per gli ispettori ed al fine di supportare il processo di valutazione, nell'ambito del Coordinamento nazionale (art. 11 del decreto), è stato proposto un metodo non obbligatorio del rischio invecchiamento [8]. Nel primo triennio di ispezioni sono state formulate principalmente raccomandazioni; negli ultimi anni, invece, le Commissioni hanno richiesto il riscontro della predisposizione del piano di monitoraggio dei rischi legati all'invecchiamento che, ad oggi, è ancora assente nella maggior parte dei casi. Infine, anche l'applicazione del metodo è ad oggi fine a sé stessa poiché il risultato finale ottenuto (indice finale) non è esaminato nell'ambito del SGS PIR ai fini del miglioramento della sicurezza o del processo di revisione generale.

6. Conclusioni

Lo studio dei rapporti finali di ispezione ha permesso di evidenziare le più numerose e principali criticità emerse in merito alla parte del controllo operativo sia in relazione a specifici macrosettori che sulla base delle raccomandazioni e proposte di prescrizione formulate dalle commissioni ispettive nei primi anni di applicazione del D.lgs. 105/2015. Il numero di rapporti disponibili per ogni macrosettore considerato è risultato allineato con il numero di ispezioni effettuate e per questo motivo i risultati possono essere considerati rappresentativi dell'andamento generale della gestione del controllo operativo. I risultati ottenuti offrono una buona panoramica e rappresentano il punto di partenza per approfondimenti ulteriori sui rilievi effettuati. Nel merito delle informazioni ottenute, le criticità emerse riguardano sia aspetti che, tenuto conto della longevità normativa potremmo definire "tradizionali" (come l'identificazione degli elementi critici e la relativa manutenzione) sia punti più nuovi (in particolare, il rischio invecchiamento).

L'attività di monitoraggio svolta a livello centrale è stata condotta da un lato con l'obiettivo di evidenziare l'andamento delle non conformità rilevate e dall'altro con quello di poter fornire possibili indicazioni, procedure e politiche efficaci per il miglioramento della gestione sicura degli impianti. Tale attività sarà condotta periodicamente e permetterà di effettuare un confronto in termini di numerosità ed entità delle non conformità nel tempo al fine di produrre documentazione specifica di supporto sia alla gestione operativa degli impianti da parte dei gestori, sia alle attività svolta dagli ispettori, ad esempio nella richiesta di evidenze basate su dati reali.

Ringraziamenti

Si ringraziano gli ispettori Seveso dell'Istituto per il riscontro fornito in seguito al monitoraggio sulle ispezioni.

Bibliografia e sitografia

[1] Basso, B., Carpegna, C., Dibitonto, C., Gaido, G., Robotto, A., Zonato, C., 2004, Reviewing the safety management System by incident investigation and performance indicators. J. of Loss Prevention, 17(3), 225-231.

[2] Bragatto, P.A., Ansaldi, S.M., Pirone, A., Agnello, P., 2017, Improving the safety management systems at small Seveso establishments through the bow-tie approach Risk Analysis and Management - Trends, Challenges and Emerging Issues - Bernatik, Huang & Salvi (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group.

[3] Bragatto, P., Vairo, T., Milazzo, M.F., Fabiano, B., 2021, The impact of the COVID-19 pandemic on the safety management in Italian Seveso industries, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 70, May 2021.

[4] Direttiva 2012/18/EU Direttiva 2012/18/UE - https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0018 (ultimo accesso 28/11/2026)

[5] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose (GU Serie Gen. n.161 del 14-07-2015 - Suppl. Ord. n. 38).

[6] Marrazzo R., Bragatto P., De Rosa A., 2022, Major Accident Occurrence in a Chemical Plant: Management and Technical Factors Emerging from the Inspection Activity, Chemical Engineering Transactions, 91, 37-42.

[7] Paltrinieri, N., Reniers, G., 2017, Dynamic risk analysis for Seveso sites J. Loss Prev. Process Ind., 49 (2017), 10.1016/j.jlp.2017.03.023.

[8] Portale Seveso – Sezione pubblica www.portaleseveso.isprambiente.gov.it/RicercaStabilimentiPubblica ultimo accesso.25.02.2026

[9] Wood, M, 2005, The Mutual Joint Visit Programme on Inspections Under Seveso II: Exchanging lessons learned on inspection best practices. Institution of Chemical Engineers Symposium Series, (150), 977-994.

I quasi incidenti negli stabilimenti italiani con pericolo di incidente rilevante: risultati dell'analisi delle schede dell'esperienza operativa raccolte nel repository EsOpIA

A. Pirone[1], P. Agnello[1], M.R. Vallerotonda[1], S.M. Ansaldi[2]

[1]Inail - Dit
[2]Esperto della materia

Sommario
Negli stabilimenti regolamentati dal d.lgs. 105/2015 (di recepimento della Direttiva 2012/18/UE sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti), gli eventi significativi (incidenti e quasi incidenti, ma anche anomalie) sono riportati in un format predefinito, comunemente chiamato "scheda dell'esperienza operativa", ai fini della loro discussione e analisi. Ad oggi, soltanto la suddetta normativa prevede l'obbligo di gestire questi eventi nell'ambito di un sistema di gestione della sicurezza obbligatorio; nonostante ciò, nella letteratura scientifica non si riscontra un'analisi sistematica degli eventi occorsi negli stabilimenti italiani, soggetti alla normativa, basata su una raccolta organizzata delle schede dell'esperienza operativa (EO). La memoria prende in considerazione i quasi incidenti avvenuti negli stabilimenti di soglia superiore italiani a partire dal 2000 al fine di fornire una prima panoramica nazionale. Infatti, dal 2016, le schede EO di questi stabilimenti sono raccolte dall'Inail in un repository documentale denominato EsOpIA (Esperienza Operativa e Intelligenza Artificiale) che, sfruttando le capacità di NLP (Natural Language Processing) e le tecniche di Machine Learning (ML), consente di estrarre e classificare automaticamente concetti e relazioni e renderli disponibili, sotto forma di informazioni strutturate, per la condivisione tra diversi stakeholder. L'archivio contiene oltre 6000 documenti, utilizzati a scopo di ricerca. Per la finalità dello studio, partendo dai dati raccolti in EsOpIA, sono analizzati i quasi incidenti in riferimento alla tipologia di evento, alle attrezzature critiche coinvolte ed alle barriere implementate. L'approccio utilizzato non è meramente statistico, ma evidenzia i diversi livelli di dettaglio raggiungibili sfruttando le capacità di NLP e ML e consente di analizzare gli eventi in modo trasversale aprendo a nuove riflessioni e soluzioni per il miglioramento della sicurezza.

1. Introduzione

La gestione di incidenti e quasi incidenti ha origine in settori industriali specifici (aeronautico, nucleare e chimico) caratterizzati da basse frequenze, ma con conseguenze catastrofiche [1]. Gli incidenti e i quasi incidenti che si verificano negli stabilimenti industriali "Seveso" regolamentati dal d.lgs. 105/2015 (di recepimento della direttiva 2012/18/UE sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti) devono essere riportati in un format chiamato "Eventi incidentali: analisi dei fattori gestionali

e tecnici" (previsto dall'Allegato H, appendice 2, parte II, sezione 2), comunemente chiamato "Scheda dell'esperienza operativa", che viene compilato dai gestori in occasione delle ispezioni previste dalla normativa per la verifica della conformità del Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR) e dell'attuazione della Politica di Prevenzione degli incidenti rilevanti. Si tratta di un documento fondamentale per individuare le criticità del sistema di sicurezza e per valutare l'efficienza globale del sistema [2]. Come evidenziato nella revisione della letteratura effettuata sui sistemi di gestione dei quasi incidenti nel settore industriale [3], lo studio dei quasi incidenti è relativo principalmente ad ambiti specifici. Soltanto la normativa "Seveso" prevede l'obbligo di gestire questi eventi con uno strumento definito; nonostante ciò, nella letteratura scientifica non si riscontra un'analisi sistematica degli eventi occorsi negli stabilimenti italiani Seveso, basata su una raccolta organizzata delle schede EO. In passato, gli stessi autori [4, 5] hanno evidenziato la necessità di studiare ed analizzare tutti gli eventi registrati nelle schede in quanto offrono l'opportunità di riconoscere condizioni o situazioni pericolose e prevenire incidenti. Pertanto, al fine di valorizzare il patrimonio informativo contenuto nelle schede e condividere la "conoscenza nascosta" presente, dal 2016, l'Inail raccoglie periodicamente le schede EO che, dopo essere state organizzate, anonimizzate ed analizzate dal punto di vista informatico, sono elaborate avvalendosi di strumenti informatici per la gestione delle nformazioni. In tale contesto, nell'ambito delle attività di ricerca del Dipartimento innovazioni tecnologiche dell'Istituto, è stato sviluppato il repository documentale denominato EsOpIA (Esperienza Operativa e Intelligenza Artificiale) [6] che utilizza tecniche avanzate di intelligenza artificiale (AI), per estrarre "conoscenza" dai documenti e archiviarle in modo sicuro e recuperabile. Le tecniche di intelligenza artificiale, in particolare il machine learning, sono utilizzate per estrarre approfondimenti ed informazioni da grandi quantità di dati; applicazioni in tal senso si ritrovano in [7, 8, 9]. EsOpIA consente la condivisione delle conoscenze e supporta il processo proattivo di prevenzione, in particolare per gli incidenti maggiori, attraverso l'accesso a un sistema di conoscenza strutturato. Inoltre, a differenza di altri archivi documentali che raccolgono incidenti industriali, come il Major Accident Reporting System (eMARS) [10], il database ARIA (Analysis, Research, and Information on Accidents) [11] o il Chemical Safety Board [12] solo per citarne alcuni, EsOpIA rappresenta l'unico archivio ontologico contenente soprattutto quasi-incidenti, anomalie e non conformità.

2. Obiettivo

Partendo dai dati raccolti in EsOpIA, l'obiettivo dello studio è fornire una prima panoramica dei quasi incidenti avvenuti negli stabilimenti di soglia superiore italiani a partire dal 2000. Gli eventi sono analizzati considerando la tipologia, le attrezzature critiche coinvolte e le barriere implementate. Le informazioni riportate scaturiscano da specifiche ricerche effettuate in EsOpIA anche nell'ottica di evidenziare le potenzialità generali del sistema.

3. Materiali e metodologia

3.1 Documenti presenti in EsOpIA

EsOpIA è l'archivio documentale che raccoglie le esperienze operative avvenuti negli stabilimenti Seveso di soglia superiore italiani ed attualmente rappresenta l'unico repository di dominio pubblico, basato su ontologia, non solo per gli incidenti, ma anche per quasi incidenti, anomalie e casi di successo. Oltre alle schede EO, nell'archivio sono presenti anche altri documenti riconducibili alla sicurezza degli impianti come i rapporti su guasti di apparecchiature a pressione avvenuti in aziende italiane e le relazioni post-incidentali predisposte anch'esse in ambito d.lgs. 105/2015.

3.1.2 Schede dell'esperienza operativa Seveso

L'Inail è uno degli organi tecnici individuati dal d.lgs. 105/15 con funzione di supporto per le Autorità competenti (Ministero dell'Interno e Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica) nell'attuazione della norma ed i tecnici dell'Istituto sono componenti delle commissioni ispettive istituite ai sensi dell'articolo 27. Nel corso delle ispezioni, le Commissioni acquisiscono le schede EO (Figura 1) compilate dal gestore. Il documento mette in evidenza le possibili carenze gestionali interessate dal verificarsi di un evento indesiderato focalizzando l'attenzione sulle possibilità di miglioramento.

Eventi incidentali: analisi dei fattori gestionali e tecnici

Azienda .....

Rif. n.	Data	Titolo .....

Descrizione tecnica sintetica dell'evento **(con particolare riferimento alle cause tecniche e gestionali)**

Rottura di una guarnizione su corpo flangiato. Attivato il PEI per forte odore di ammoniaca in reparto

Sistemi tecnici critici (2): ***Corpi flangiati della linea ammoniaca-guarnizioni***

Fattore gestionale (1)	Descrizione	Azioni intraprese	Azioni previste / programmate
Es. 3.iii: adeguamenti impiantistici per la riduzione dei rischi	*Rottura di una guarnizione su corpo flangiato-materiale non idoneo-*	*Attivazione PEI* *Intercettata la perdita* *Sostituzione della guarnizione* *Inserita protezione paraspruzzi*	*Controllo/verifica delle guarnizioni sulle linee dei corrosivi. Avviato programma di sostituzione delle guarnizioni presenti sulle linee degli ammoniacali con altre di materiale idoneo (PTFE)*

Figura 1. Format "Eventi incidentali: analisi dei fattori gestionali e tecnici"
(Fonte: decreto legislativo 26 giugno 2015, n. 105)

Il format presenta una parte descrittiva dell'evento in cui indicare: la data di accadimento, un titolo sintetico ma esaustivo, una breve descrizione tecnica dell'evento (inteso come il racconto di cosa è successo e delle cause che sono state individuate dall'analisi) ed il sistema tecnico critico eventualmente coinvolto (un'attrezzatura, un sistema di controllo o di sicurezza che è stato individuato critico ai fini del SGS-PIR). Per ogni fattore gestionale individuato dal gestore come carente, non completamente attuato o non adeguato, è necessario inserire: la descrizione che illustra la non adeguatezza del fattore gestionale con riferimento alla numerazione dei punti della lista di riscontro utilizzata nelle ispezioni; le azioni intraprese al momento dell'accadimento; le azioni previste e programmate affinché l'evento non si

ripeta, cioè le attività di prevenzione che si intendono implementare. Tali azioni rientrano spesso nel piano di miglioramento aziendale aggiornato nella riunione di riesame annuale. Le schede compilate dai gestori sono acquisite dalla Commissione ispettiva per la successiva valutazione e come riferimento per la raccolta di evidenze. L'Inail effettua la raccolta delle schede EO nel corso dell'attività di ricognizione delle ispezioni, svolta con periodicità triennale in linea con la pianificazione effettuata dal Ministero dell'Interno ed in conformità con la programmazione regionale annuale a cura dei Comitati tecnici regionali (CTR). L'ultima indagine è stata condotta nel 2023, ma l'archivio viene aggiornato periodicamente grazie al contributo degli ispettori interni che provvedono spesso ad inviare documentazione una volta conclusa l'attività ispettiva svolta; pertanto, i dati presi in considerazione nello studio si riferiscono all'archivio aggiornato a dicembre 2025. Tenuto conto che la raccolta di schede EO fornite dai gestori riporta gli eventi nei dieci anni precedenti l'ispezione e che le ricognizioni effettuate dall'Inail fanno riferimento al periodo di entrata in vigore del d.lgs. 105/2015, si può ragionevolmente dedurre che le informazioni disponibili in EsOpIA si riferiscano almeno all'ultimo ventennio e forniscano una panoramica completa e credibile della situazione negli stabilimenti italiani. Ad oggi, EsOpIA conta oltre 6000 schede EO di eventi riconducibili a quasi incidenti.

3.2 Il modello EsOpIA

EsOpIA è una piattaforma di ricerca cognitiva che si compone di un repository documentale che permette la raccolta e la ricerca di documentazione relativa al mondo della sicurezza degli impianti industriali (in particolare quasi incidenti) e di un modello ontologico, ovvero un modello specifico di riconoscimento di tipo entità-relazione, che utilizza tecniche di IA. L'obiettivo è condividere le informazioni (conoscenza), opportunamente anonimizzate, presenti nelle esperienze operative relative al territorio nazionale. Il motore di ricerca utilizzato da EsOpIA per la gestione e l'analisi di incidenti e quasi incidenti, descritto in dettaglio in [5], si basa su strumenti di IA, in particolare vengono applicate tecniche di ML, basate su metodi di apprendimento supervisionato su un modello ontologico appropriato, per estrarre e classificare in modo automatico le informazioni contenute in ciascun documento, classificando i termini e mettendoli in relazione fra loro. Concetti e relazioni sono resi fruibili, sotto forma di informazioni strutturate, per la condivisione tra diversi stakeholders (ricercatori, ispettori, gestori, autorità competenti, RSPP, lavoratori, normatori).

Il modello EsOpIA contiene i principali concetti rappresentativi utilizzati nelle schede EO ovvero sono considerate le seguenti *entità*: EVENTO, APPARATO, SOSTANZA, BARRIERA, PERSONE e ATTIVITÀ. Tuttavia, le entità non sono sufficienti a rappresentare pienamente quanto riportato nella scheda ed è fondamentale capire se abbiano un ruolo significativo o irrilevante; per questo motivo, sono state previste nel modello le *relazioni*. La Figura 2 mostra il modello entità-relazioni.

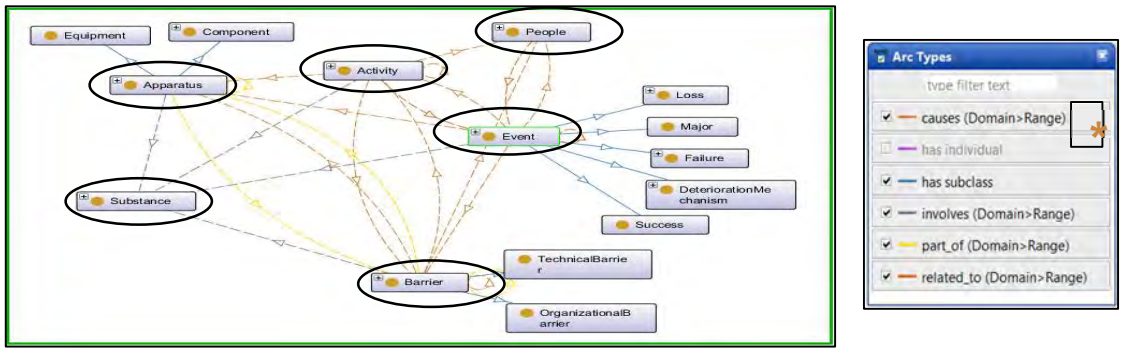


Figura 2. Modello entità- relazione (Fonte: a cura delle autrici)

L'entità EVENTO descrive ciò che è accaduto ed è specializzato nelle seguenti sotto-entità: PERDITA di contenimento; FALLIMENTO si riferisce a fallimenti, danni e eventuali errori o azioni sbagliate; DETERIORAMENTO riguarda difetti e meccanismi che causano problemi di integrità o diminuiscono l'efficienza; MAJOR gli eventi che hanno il potenziale di generare incidenti gravi; SUCCESSO: riferimento a eventi positivi che hanno contribuito a interrompere l'escalation dell'incidente. L'entità APPARATO ha due sotto-entità: ATTREZZATURA e COMPONENTE; l'entità SOSTANZA si riferisce principalmente al fluido pericoloso coinvolto; BARRIERA si riferisce alle barriere tecniche (ad esempio dispositivi) e organizzative (ad esempio procedure) coinvolte. L'entità PERSONE indica il ruolo delle persone menzionate nel rapporto e ATTIVITÀ descrive quale lavoro veniva svolto quando l'evento è avvenuto. Le entità estratte (le parole nel testo) sono quindi le istanze delle entità ontologiche.
Le relazioni considerate sono: RELATED_TO, una relazione generica tra entità, PART_OF che descrive connessioni fisiche tra entità, INVOLVES collegata a una sostanza, e CAUSES che descrive le connessioni causali tra eventi.

3.3 Metodologia: funzionalità di ricerca in EsOpIA

EsOpIA è stato progettato per fornire un supporto di conoscenza su questioni di sicurezza. Le tecniche di ML adottate utilizzano un metodo supervisionato in cui esperti della materia (ispettori Seveso) hanno annotano manualmente le parole come entità specifiche nel modello EsOpIA e le loro relazioni per addestrare il sistema di IA. Lo strumento di ML utilizzato è ©IBM Watson Knowledge Studio. Il processo di addestramento è iterativo e controllato dalla valutazione dei parametri standard (cioè precisione, richiamo, punteggio F1) [5], per raggiungere un modello con un livello accettabile di apprendimento da implementare.
Durante l'analisi di un problema, infatti, informazioni su eventi simili possono essere utili per capire come sono stati affrontati e risolti altrove. Un altro ambito di utilizzo è la possibilità di effettuare un'analisi trasversale su come alcuni rischi "storici/tradizionali" siano ancora presenti e quali siano le barriere che intervengono per evitare o mitigarne le conseguenze [4]. Un uso più innovativo è la possibilità di intercettare rischi emergenti. Questi rischi sono intesi sia come rischi tradizionali, modificati da nuovi metodi di lavoro o da nuove tecnologie introdotte nei processi e

negli impianti, sia come nuovi rischi perché derivano da nuove condizioni. Esempi sono la presenza di nuove sostanze che interagiscono con materiali vecchi o nuove sostanze con materiali nuovi. I cambiamenti nelle condizioni esterne ai processi produttivi e agli impianti sono, ad esempio, fenomeni dovuti al cambiamento climatico. EsOpIA può estrarre queste informazioni perché si basa su tecniche di ML e su un modello ontologico che interpreta i concetti allo stesso modo, quelli comuni e rilevanti per il contesto (perdita, attrezzature, persone) e quelli "al di fuori" del contesto (ad esempio pioggia, tempesta, blackout) [13]. Le funzionalità di ricerca avvengono tramite linguaggio naturale e filtri basati sulle entità estratti del modello.

4. Risultati

Per fornire una panoramica completa del settore Seveso basata sugli eventi raccolti in EsOpIA, sono stati considerati il tipo di evento, le attrezzature critiche e le barriere implementate. Per le finalità dello studio, sono stati identificati sette macro-settori (paragrafo 4.1) sulla base della tipologia di attività industriale prevista dal d.lgs. 105/2015 e, per ciascun macro-settore, sono stati ricercati i principali eventi strettamente correlati ad un potenziale incidente (paragrafo 4.2).
Per quanto riguarda le attrezzature, la ricerca si è focalizzata su serbatoi e tubazioni (paragrafo 4.3). Una delle caratteristiche di EsOpIA è il riconoscimento automatico delle relazioni tra le entità, in particolare la relazione di causa (CAUSES), che permette all'utente di estrarre ciò che ha causato un evento, un esempio è riportato nella sezione 4.4.
La ricerca è stata condotta in linguaggio naturale e sul totale dei documenti trovati, sono stati selezionati soltanto quelli classificati come "Near Miss", applicando l'apposito filtro basato sul tipo di documento.

4.1 Stabilimenti e schede dell'esperienza operativa in EsOpIA

Nel d.lgs. 105/2015 (sezione A2 dell'allegato 5) sono elencate 39 distinte tipologie industriali; tuttavia, esistono alcune affinità tra di esse, pertanto, ai fini dello studio, sono stati considerati 7 macro-settori (MS):

- MS1comprende la lavorazione ed il trattamento dei metalli;
- MS2 si riferisce alle attività industriali che coinvolgono petrolio e prodotti petroliferi;
- MS3 descrive le attività che lavorano con prodotti chimici e prodotti correlati;
- MS4 GPL/GNL riguarda le attività di stoccaggio e distribuzione di GPL e GNL;
- MS5 è il macro-settore nel quale sono inserite le attività di esplosivi e prodotti;
- MS6 si riferisce alla gestione dei rifiuti;
- MS7 comprende tutte le attività non inserite nei precedenti macro-settori.

Per ogni macro-settore, la Tabella 1 riporta il numero di stabilimenti di soglia superiore che risultano in EsOpIA ed il relativo numero di schede EO.

MS	Macro-settore (Attività All. 5 d.lgs. 105/2015)	Stab. Soglia Sup. in EsOpIA	Stab. Soglia Sup./tot (%)	EO in EsOpIA	EO/tot (%)
MS1	Lavorazione e trattamento dei metalli (4, 5 , 6, 7)	16 (29)	5%	140	2%
MS2	Petrolio e prodotti petroliferi (8, 9, 10)	45 (60)	14%	897	15%
MS3	Chimico (17,18, 19, 22, 23, 24, 38)	129 (176)	41%	3428	57%
MS4	GPL/GNL (13, 14, 15)	61 (111)	20%	506	8%
MS5	Esplosivi (11, 12))	15 (26)	5%	161	3%
MS6	Rifiuti (20, 21)	8 (11)	3%	143	2%
MS7	Altro (1, 2, 3, 16, (25 ÷ 37), 39	38 (92)	12%	707	12%
	Totale (tot)	312 (505)	100%	5982	100%

Tabella 1. Stabilimenti di soglia superiore italiani e schede EO in EsOpIA

Nel dettaglio, nella seconda colonna sono riportati i MS e sono specificate le tipologie di attività industriali richiamando la numerazione presente nell'allegato 5, la terza colonna si riferisce al numero totale di stabilimenti di doglia superiore in EsOpIA e, tra parentesi, il numero di quelli che risultano notificati, ai sensi della legislazione nazionale, nel Portale Seveso [14]. La quinta colonna contiene il numero totale di schede EO (quindi di documenti relativi a quasi incidenti) memorizzate in EsOpIA. È, inoltre, specificato il contributo percentuale degli stabilimenti e delle schede EO nel repository rispetto al totale degli stabilimenti ed al totale delle schede, rispettivamente nelle colonne 4 e 6.

Si specifica che il numero totale di documenti 5.982 non corrisponde al numero di schede EO presenti nel repository al momento dello studio (6023) perché non sono state considerate le attività minerarie (41). Rispetto al numero totale di stabilimenti notificati in ciascuno MS, quelli presenti nel repository costituiscono, nella maggior parte dei casi, quasi il 50% del totale. Preliminarmente alle successive analisi, si deve considerare che: è ragionevole dedurre che la quantità di documenti raccolti sia maggiore se il numero di ispezioni svolte nelle aziende del MS è più elevato; inoltre, ogni MS rappresenta un raggruppamento di varie attività anche se simili e ciò comporta che specifici approfondimenti sono possibili per caratterizzare meglio il MS stesso o la tipologia di azienda. A tal proposito, infatti, MS2 comprende sia le raffinerie che il settore dello stoccaggio di energia e combustibili, MS3, oltre agli impianti chimici, considera anche impianti di pesticidi e fertilizzanti e impianti farmaceutici. Il MS4 sono considerate attività altamente standardizzate in cui le schede EO contengono frequentemente rapporti di incidenti storici verificatisi in magazzini simili in Paesi europei ed extraeuropei, ma non sono inclusi in EsOpIA. Il MS 6 è un settore relativamente nuovo, quindi il numero totale di documenti è inferiore rispetto agli altri. L'elevato numero di documenti presenti in MS7 suggerisce, infine, è da ricondurre alla numerosità di attività considerate, tra le quali le attività di logistica e distruzione meriterebbero una trattazione separata. Il MS7, inoltre, contiene anche

le aziende che si notificano come "Altre attività", che potrebbe includere eventi significativi con caratteristiche meno note rispetto ai settori più generalmente studiati.

4.2 Ricerche in EsOpIA sulla base della tipologia di evento

L'entità EVENTO è il punto di partenza di questa ricerca; è sempre presente nei documenti perché è la ragione stessa della loro esistenza. È stata effettuata una ricerca tra i documenti considerando gli eventi "perdita di contenimento", "guasto", "incendio" ed "esplosione". Il numero totale di documenti, per ogni ricerca effettuata, è: Perdita (1701), Guasto (401), Incendio (612) ed Esplosione (58). L'applicazione del filtro "near miss" sul tipo di documento ha restituito i seguenti risultati: Perdita (1636), Guasto (393), Incendio (447) ed Esplosione (53). Nella Tabella 2 sono riportati, per ogni MS considerato, il numero finale di documenti relativi all'evento ricercato, ottenuti (dopo l'applicazione del filtro).

I risultati offrono una prima panoramica della situazione nei vari macro-settori relativa ai casi di perdita, guasto, incendio ed esplosione in ciascun MS. Partendo da queste informazioni, è possibile perfezionare la ricerca per caratterizzare meglio gli eventi e le attività.

MS	**Perdita**	**% $EO_{Perd.}$**	**Guasto**	**% EO_{Guasto}**	**Incendio**	**% $EO_{Inc.}$**	**Esplosione**	**% EO_{Esp}**
MS1	39	2%	18	5%	33	7%	4	8%
MS2	317	19%	46	12%	110	25%	0	0%
MS3	950	58%	209	53%	134	30%	29	55%
MS4	130	8%	74	19%	53	12%	7	13%
MS5	11	1%	3	1%	34	8%	7	13%
MS6	32	2%	3	1%	32	7%	0	0%
MS7	157	10%	40	10%	51	11%	6	11%
Totale (NM)	*1636*	*100%*	*393*	*100%*	*447*	*100%*	*53*	*100%*

Tabella 2. Schede EO - eventi per macro-settore

Il maggior numero di documenti è associato alla "perdita di contenimento"; la ricerca potrebbe essere approfondita identificando le tipologie di perdita e la loro entità. I dati mostrano che il settore MS3 è quello con il maggior numero di eventi indesiderati; questo risultato è correlato al maggior numero di documenti presenti nell'archivio e di stabilimenti considerati nel raggruppamento. Il numero di esplosioni è ragionevolmente basso perché generalmente sono associate a incidenti gravi e non a quasi incidenti. Per quanto riguarda gli incendi, la ricerca include anche i documenti che menzionano il principio d'incendio. Anche nel caso della ricerca "guasto", si potrebbero ottenere maggiori informazioni indicando specifiche apparecchiature.

Tra gli eventi che comportano una perdita di contenimento, sono stati considerati i meccanismi di deterioramento. È stata condotta in EsOpIA la ricerca usando i termini "corrosione" (286), "usura" (226), "crepa" (110), "fatica" (36) e "assottigliamento" (5).

Tra parentesi sono indicati i numeri di documenti ottenuti con applicazione del filtro “near miss”. Tra questi meccanismi, è stato maggiormente esaminato il meccanismo di danno “corrosione” sulle attrezzature. Sono state considerate quelle apparecchiature che compaiono più frequentemente: tubazioni, serbatoi e pompe. I risultati sono mostrati nella Tabella 3.

MS	Tubazioni	%Tubazioni	Serbatoi	%Serbatoi	Pompe	%Pompe
MS1	0	0%	1	0%	0	0%
MS2	24	10%	10	4%	11	5%
MS3	43	18%	40	17%	29	12%
MS4	4	2%	3	1%	0	0%
MS5	0	0%	0	0%	0	0%
MS6	0	0%	0	0%	0	0%
MS7	6	2%	1	0%	3	1%
Totale (NM)	*77*	*32%*	*55*	*23%*	*43*	*18%*

Tabella 3. Schede EO – corrosione ed attrezzature

Per i MS con una percentuale pari a zero, è certamente necessario esaminare le specifiche apparecchiature segnalate nei documenti e nelle singole attività considerate in quel MS. Infine, è stata condotta una ulteriore ricerca sulle barriere tecniche che hanno registrato guasti più frequenti, tra cui il sistema di prevenzione incendi. Il numero di eventi che hanno segnalato un guasto al sistema di prevenzione incendi per ciascuno MS è il seguente: SM1 (0), SM2 (3), SM3 (12), SM4 (17), SM5 (0), SM6 (1) e SM7 (0). Nonostante l'elevato numero di documenti riscontrato per il MS3, esso è comunque un numero basso se si considerano le tipologie di attività ricomprese e l’elevato numero di documenti registrati.

4.3 Ricerche in EsOpIA sulla base dell’attrezzatura

Negli impianti Seveso, i "sistemi tecnici critici" sono le apparecchiature, serbatoi, componenti e dispositivi di controllo, protezione e sicurezza coinvolti negli scenari incidentali ipotizzabili o desunti dall'analisi dell'esperienza operativa. La loro analisi è un aspetto fondamentale nella gestione della sicurezza. In questo studio, è stato scelto di presentare un esempio di ricerca in EsOpIA partendo da apparecchiature o componenti specifici. È stata effettuata una ricerca con il termine generico "Serbatoio" e sono stati trovati 2496 documenti totali, ridotti a 2465 applicando il filtro “near miss”. È stato applicato un ulteriore filtro sul tipo di evento, selezionando le voci “deterioramento”, “guasto” e “perdita di contenimento”. Per ciascuna voce, sono stati considerati gli eventi più frequenti. La stessa procedura è stata condotta cercando il termine "Tubazione" che ha restituito 1018 documenti contenenti totali e 902 documenti correlati alle EO e proseguendo come descritto per la ricerca precedente. I risultati degli eventi più frequenti relativi a “deterioramento”, “guasto” e “perdita di contenimento” per l’attrezzatura critica “serbatoio” e l’attrezzatura critica “tubazioni” sono riportati nella Tabella 4.

Tipo di evento	Dettaglio	Serbatoio (Nr.Schede)	Tubazione (Nr.Schede)
Deterioramento	Corrosione	81	102
	Usura	79	29
	Assottigliamento	43	72
Guasto	Danno	138	56
	Collasso	70	0
	Rottura	0	198
Perdita	Foratura	67	70
	Fuoriuscita	596	314
	Rilascio	241	316
	Sversamento	342	134

Tabella 4. Serbatoi ed attrezzature – eventi più frequenti

I dati confermano gli eventi più frequenti come quelli già noti; per i serbatoi, l'analisi può essere perfezionata selezionando i tipi di corrosione (acida, esterna, sotto-isolata, interstiziale, ecc.). Per quanto riguarda le perdite, si possono trovare diversi termini per indicare la stessa cosa ed è importante prestare attenzione all'uso e ai sinonimi.

4.4 Relazione di causa (CAUSES)

Partendo dall'evento generico "perdita", EsOpIA identifica 1109 documenti contenenti questo termine e che appartengono alle relazioni CAUSE (causa), 1 incidente grave, 10 relativi a guasti di apparecchiature a pressione, gli altri (1098) sono esperienze operative. Utilizzando i filtri è possibile ottenere una panoramica delle cause, delle apparecchiature, delle conseguenze e delle barriere coinvolte. La maggior parte dei meccanismi di deterioramento ha causato perdita di contenimento (perdite), inclusi corrosione (62), crepe (36), usura (31), ostruzione (15), vibrazione (13), sollecitazione meccanica (9), invecchiamento (5). Osservando le apparecchiature coinvolte nel meccanismo di corrosione, la condotta (30) è quella più frequentemente interessata, seguita dal serbatoio (17) e dai reattori (10). Alcune conseguenze includono l'innesco di incendi, controllati dall'intervento dei lavoratori con gli appositi dispositivi antincendio. È interessante anche esaminare i termini classificati come eventi SUCCESSO: essi riflettono il riconoscimento di tale evento (ad esempio, notare, rilevare, intercettare), altri si riferiscono ad interventi ed azioni di azioni di allarme (ad esempio, lanciare l'allarme, avvertire, interrompere, sollecitare il ripristino, segnalare).

5. Conclusioni

Questo studio rappresenta la prima analisi italiana di eventi di diversa gravità verificatisi in impianti di processo utilizzando un archivio documentale basato su un'ontologia. L'approccio utilizzato non è meramente statistico, ma evidenzia i diversi livelli di dettaglio raggiungibili sfruttando le capacità di NLP e ML e consente di

analizzare gli eventi in modo trasversale aprendo a nuove riflessioni e soluzioni per il miglioramento della sicurezza negli impianti di processo sulla base di informazioni reali e organizzate. I risultati presentati, oltre a voler evidenziare le funzionalità e le potenzialità di EsOpIA, costituiscono un punto di partenza per indagini mirate a diversi livelli di dettaglio. Certamente, come evidenziato nel testo, analisi più specifiche devono essere effettuate in relazione all'attività industriale. Lo studio presenta dei limiti da ricondurre essenzialmente alle modalità di compilazione delle schede ed alla completezza e chiarezza di informazioni riportate. Lo stesso concetto di "esperienza operativa" è talvolta diverso per esercizi e attività industriali; comunemente vengono registrate anomalie e perdita di contenimento dei dispositivi, in alcuni casi vengono rilevate anche condizioni e situazioni non sicure. Questa diversità rappresenta un quadro autentico degli eventi accaduti, ma mostra anche i diversi livelli di attenzione alle questioni di sicurezza. Un risultato elevato può riflettere una maggiore sensibilità nel rilevare e registrare i quasi incidenti e un livello più elevato di cultura della sicurezza. Inoltre, il riconoscimento semantico delle singole parole non è sufficiente per comprendere la storia; in realtà, un termine può essere presente nel documento senza avere un ruolo diretto nell'evento. I termini usati per la ricerca possono sembrare ovvi e troppo generali sia per il contesto che per le capacità dell'archivio, ma questa è stata una scelta deliberata per mostrare la panoramica dello studio. È confermata l'importanza delle informazioni contenute nelle schede EO ed il ruolo fondamentale svolto dall'utilizzo del format Seveso che rappresenta l'unico riferimento legislativo, a livello nazionale, per garantire il processo di registrazione, analisi e valutazione di incidenti e quasi incidenti al fine di individuare la "lezione appresa", intesa come l'insieme delle informazioni riguardanti l'analisi dell'evento indesiderato per trarne insegnamenti tecnici, organizzativi e procedurali e per indirizzare le scelte decisionali.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano sentitamente: tutti gli ispettori di Inail Seveso per la raccolta dei rapporti sui quasi incidenti, i riferimenti IBM Flavia Fattori, Giacomo Bartoli e Luca Di Piramo per il loro prezioso contributo allo sviluppo del progetto.

Bibliografia

[1] Gnoni, M.G.; Saleh, J.H., How near miss management systems and system safety principles could contribute to support high reliability organizations, Safety and Reliability —Theory and Applications, Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017, Portoroz, Slovenia, 18–22 June 2017; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017; pp. 3099–3104.

[2] Agnello, P., Ansaldi, S.M., Bragatto, P.A., Plugging the Gap between Safety Documents and Workers Perception, to Prevent Accidents at Seveso Establishments.
Chem. Eng. Trans. 26, 2012, pp. 291–296.

[3] M.G. Gnoni, F. Tornese, A. Guglielmi, M. Pellicci, G. Campo, D. De Merich, Near miss management systems in the industrial sector: A literature review, Safety Science 150 (2022) 105704.
[4] Ansaldi S.M., Pirone A., Vallerotonda M.R., Bragatto P., Agnello P., Delle Site C., 2018, How Inspections Outcomes May Improve the Foresight of Operators and Regulators in Seveso Industries. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, vol. 67, 2018, ISBN 978-88-95608-64-8; ISSN 2283-9216.
[5] Ansaldi S.M., Agnello P., Pirone A., Vallerotonda M.R., 2021, Near Miss Archive: A Challenge to share knowledge among inspectors and improve Seveso Inspections, *Sustainability* 2021, *13*, 8456. https://doi.org/10.3390/su13158456.
[6] EsOpIA (Esperienza Operativa e Intelligenza Artificiale). https://www.inail.it/app/rcqi-fe/. (accesso 31/0372026).
[7] Kurian, D.; Sattari, F.; Lefsrud, L.; Ma, Y. Using machine learning and keyword analysis to analyze incidents and reduce risk in oil sands operations. *Saf. Sci.* 2020, *130*, doi:10.1016/j.ssci.2020.104873.
[8] Paltrinieri, N.; Comfort, L.; Reniers, G. Learning about risk: Machine learning for risk assessment. *Saf. Sci.* 2019, *118*, 475-486, doi:10.1016/j.ssci.2019.06.001.
[9] Xu, Z.; Saleh, J.H. Machine learning for reliability engineering and safety applications: Review of current status and future opportunities. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021, *211*, doi:10.1016/j.ress.2021.107530.
[10] eMARS, Major Accident Reporting System - emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content (accesso 03.04.2026).
[11] ARIA, Analysis, Research, and Information on Accidents. aria.developpement-durable.gouv.fr/ - (accesso 03.04.2026).
[12] Chemical Safety Board - csb.gov (accesso 03.04.2026).
[13] Vallerotonda M.R., Ansaldi S.M., Pirone A., Bragatto T., Bragatto P., (2022) Accident triggered by electrical failures in Seveso sites. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, vol. 91, 2022, ISBN 978-88-95608-89-1; ISSN 2283-9216.
[14] Portale Seveso - https://www.portaleseveso.isprambiente.gov.it/Home (accesso 03.04.2026).

Il RENTRI, dalla gestione alla quantificazione dei rifiuti pericolosi in ambito Seveso

D. Sallustio[1], M.G. De Santis[2], M. Dell'Olio[2], N. De Santis[3]

[1]Inail – UOT di Bari
[2]ARPA Puglia – Direzione Scientifica
[3]ARPA Puglia – DAP Bari

Sommario
La Direttiva Seveso III [1] assegna al Gestore la responsabilità di verificare la presenza, reale o prevista, in stabilimento di sostanze e miscele pericolose, classificate ai sensi del Regolamento (CE) n.1272/2008 [2], comprendendo anche i rifiuti[1]. Nella definizione di sostanze pericolose secondo tale Direttiva rientrano anche i rifiuti, la cui classificazione è effettuata sulla base della direttiva 2008/98/CE e s.m.i. [3]. Tale approccio è confermato anche dalla Delibera SNPA n.105/2021 [4] con cui sono state emanate le Linee guida sulla classificazione dei rifiuti[2].
Il RENTRI (Registro Elettronico Nazionale sulla Tracciabilità dei Rifiuti) è un sistema digitale istituito dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), obbligatorio per una vasta gamma di operatori coinvolti nella gestione dei rifiuti, siano essi pericolosi o meno.
Obiettivo della presente memoria è fornire una metodologia semplice e standardizzata per la verifica speditiva dell'assoggettabilità al D.Lgs. 105/2015 [1] delle aziende, considerando, oltre alle sostanze Seveso, direttamente desumibili dall'Allegato 1 al decreto citato, anche i rifiuti pericolosi, difficilmente riconducibili alle categorie indicate nella Parte 1 dell'allegato stesso. Tale metodologia prevede l'utilizzo del RENTRI quale strumento per estrapolare tipologia e quantità di rifiuti pericolosi stoccati o trattati, raggruppati per classe [10] e poi della "*Tabella di correlazione tra codici RP / CLP / Categorie Seveso*" (Tabella 1), per poter assimilare i rifiuti detenibili alla categoria o alla sostanza pericolosa specificata più simile che ricade nell'ambito di applicazione della Direttiva [1].

1. Introduzione

La Direttiva Seveso III [1], riguardante gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, individua la responsabilità del Gestore nel valutare i quantitativi di sostanze/miscele pericolose comprendendo anche i rifiuti detenibili in stabilimento. Come le sostanze e/o miscele considerate in ambito Seveso anche i rifiuti, con determinate caratteristiche di pericolo, devono essere ad esse assimilati.
Il RENTRI e la normativa Seveso sono strettamente correlati per gli stabilimenti che gestiscono rifiuti pericolosi. La verifica di assoggettabilità alla normativa Seveso si

[1] Nota 5 all'Allegato 1 del d.lgs. n.105/2015
[2] Art. 2 c. 2 lett. h del d.lgs. n.105/2015

basa sulla presenza di sostanze pericolose in quantità superiori alle soglie definite nell'Allegato 1 al d.lgs. n.105/2015.
Il RENTRI sostituisce i vecchi registri di carico/scarico e formulari cartacei (FIR) con modalità digitali, tracciando i rifiuti pericolosi. In particolare, gli stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante (RIR) hanno obblighi di tracciabilità ancora più stringenti, che il RENTRI contribuisce a digitalizzare e monitorare.
In sintesi, le informazioni contenute nel RENTRI (tipologia e quantità di rifiuti pericolosi stoccati o trattati) sono una fonte di informazioni essenziale atte a verificare l'assoggettabilità o meno alla normativa Seveso delle aziende che stoccano e/o trattano rifiuti pericolosi.

1.1 Normativa SEVESO

Il 29 luglio 2015 è entrato in vigore il Decreto Legislativo n.105 del 26 giugno 2015, recepimento della Direttiva 2012/18/UE [7] sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. Il decreto ha abrogato il d.lgs. n.334/99 e ha introdotto molteplici novità, tra cui l'armonizzazione del suo Allegato 1 "*Sostanze Pericolose*" al Regolamento (CE) n.1272/2008 (noto come *Regolamento CLP*) [2], che da giugno 2015 ha sostituito le Direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE relative alla classificazione, all'imballaggio ed etichettatura, rispettivamente, di sostanze e preparati pericolosi.
In particolare, l'Allegato 1 al suddetto decreto individua nella Parte 1 "*Le categorie delle sostanze pericolose*" (includendo anche le miscele pericolose) e nella Parte 2 un elenco di "*Sostanze pericolose specificate*", con le relative quantità limite detenibili in stabilimento per l'assoggettabilità alla normativa "Seveso".
Ne discende che l'assimilazione dei rifiuti pericolosi alle sostanze/miscele pericolose individuate in Allegato 1 diventa un fattore fondamentale del conteggio dei quantitativi detenibili in stabilimento per la conseguente assoggettabilità o meno agli obblighi previsti dal suddetto d.lgs. n.105/2015.
Ai fini della direttiva Seveso, per determinare se un rifiuto, considerato alla stregua di una miscela, rientra o meno all'interno delle categorie indicate nell'Allegato 1, è necessario conoscere la sua composizione e poterlo così assimilare provvisoriamente alla Categoria o alla sostanza pericolosa specificata più simile.
In pratica, è necessario conoscere la percentuale in peso (in similitudine alle schede di sicurezza dove non è presente un valore preciso, ma un range) delle sostanze presenti nel rifiuto e, in base al metodo di classificazione delle miscele, classificarlo.
Una volta identificata la natura di pericolo del rifiuto, è necessario inserire la miscela all'interno della Categoria Seveso corrispondente più opportuna.

1.2 RENTRI

Con il Decreto 4 aprile 2023, n.59 [6] del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), a decorrere dal 15 giugno 2023 è stato introdotto il sistema di

tracciabilità dei rifiuti e il registro elettronico nazionale per la tracciabilità dei rifiuti (RENTRI)[3].
Il suddetto decreto 59/2023 [6], in attuazione dell'articolo 188-bis del d.lgs. n.152/2006 (Codice ambientale) [8], da un lato introduce i modelli e i formati del nuovo registro "cronologico" di carico e scarico dei rifiuti e del nuovo formulario di identificazione, dettandone modalità di compilazione, vidimazione e tenuta; dall'altro disciplina le modalità di iscrizione, funzionamento e condivisione dei dati nell'ambito del RENTRI.
La maggior parte delle categorie di soggetti obbligati ai sensi dell'articolo 188-bis del d.lgs. n.152/2006 [8], in base alle tempistiche disposte dal provvedimento, dovevano iscriversi al nuovo sistema entro il 13 febbraio 2025.
I piccoli Enti o imprese (fino a 10 dipendenti) produttori di rifiuti speciali e tutti i restanti produttori iniziali di rifiuti speciali pericolosi, invece, avranno tempo sino al 13 febbraio 2026 per assolvere agli obblighi di iscrizione.
L'articolo 212, comma 9, del d.lgs. n.152/2006 [8], stabilisce che: "*Le imprese tenute ad aderire al sistema di tracciabilità dei rifiuti di cui all'articolo 188-bis, procedono all'iscrizione nel Registro elettronico nazionale per la tracciabilità dei rifiuti istituito ai sensi dell'articolo 6 del decreto-legge 14 dicembre 2018, n. 135, attraverso la piattaforma telematica dell'Alb\o nazionale gestori ambientali*".
Di seguito si richiamano i seguenti documenti di tracciabilità dei rifiuti disciplinati nel Codice ambientale:
1. Il registro cronologico di carico e scarico dei rifiuti, di cui all'articolo 190, comma 2, d.lgs. n.152/2006 [8], riportato nell'Allegato I;
2. Il formulario di identificazione del rifiuto, di cui all'articolo 193, comma 1, del d.lgs. n.152/2006 [8], riportato nell'Allegato II.
Il registro di carico e scarico è lo strumento che in sostanza rappresenta la base documentale della tracciabilità dei rifiuti in quanto in esso devono essere riportati, in ordine cronologico, tutti i movimenti di carico e scarico dei rifiuti effettuati.
Si parla di "carico" quando si produce un rifiuto in stabilimento. Tale produzione deve essere registrata sul registro entro 10 giorni lavorativi dalla produzione del rifiuto e quindi dalla collocazione dello stesso nel deposito temporaneo.
Si parla invece di "scarico" quando il rifiuto prodotto viene consegnato ad un trasportatore e quindi esce dall'unità produttiva. Anche in questo caso è obbligatorio annotare sul registro lo scarico entro 10 giorni dal ritiro, avendo l'accortezza di indicare il numero di formulario e i riferimenti delle operazioni di carico a cui lo scarico fa riferimento. In altre parole, durante la registrazione dello scarico è necessario riportare i numeri delle operazioni di carico che vengono scaricate.
Con l'introduzione del RENTRI, entrambi i documenti (Registro carico e scarico, formulari identificativi dei rifiuti) sono in un unico data-base informatizzato nazionale, facilmente consultabile dal Gestore e verificabile dalle Autorità di Controllo preposte.

[3] Il portale dedicato è raggiungibile dal link [9]

2. Classificazione delle sostanze pericolose

2.1 Classificazione in ambito SEVESO

In ambito Seveso, ai sensi dell'art. 3 comma 1 lettera l) si definiscono sostanze pericolose, le sostanze o miscele di cui alla parte 1 o elencate nella parte 2 dell'Allegato 1 dello stesso Decreto, sotto forma di materie prime, prodotti, sottoprodotti, residui o prodotti intermedi. La base della norma è pertanto l'identificazione di quali siano le sostanze pericolose di riferimento. L'Allegato 1 è composto da due parti che, rispettivamente, elencano le categorie delle sostanze pericolose e le sostanze pericolose specificate, fornendone i limiti quantitativi.

Secondo la classificazione CLP ad ogni agente chimico pericoloso devono essere assegnati uno o più pittogrammi, una o più classi di pericolo, una categoria che valuta la gravità del pericolo connesso ed una o più indicazioni di pericolo.

Le "frasi H" o "Indicazioni di Pericolo" (Hazard Statements) descrivono la natura del pericolo legato a sostanze e miscele. In particolare, le frasi H sono composte da tre numeri di cui il primo indica il tipo di pericolo (2 pericolo fisico, 3 pericolo per la salute, 4 pericolo per l'ambiente). Le "frasi P" o "Consigli di Prudenza" (Precautionary Statements)" indicano le misure raccomandate per prevenire o minimizzare gli effetti dannosi dei prodotti chimici.

Le frasi P sono formate dalla lettera P seguita da tre numeri di cui il primo indica il tipo di precauzione da adottare (1 generale, 2 prevenzione, 3 reazione, 4 conservazione, 5 smaltimento).

2.2 Classificazione rifiuti

Il Regolamento n. 1357/2014 del 18 dicembre 2014 [10] stabilisce le caratteristiche di pericolo per i rifiuti identificate con il codice "HP", con riferimento alla classificazione CLP delle sostanze contenute nel rifiuto stesso.

Tale disciplina adegua la normativa, in merito alle definizioni delle caratteristiche di pericolo per i rifiuti, allineandola con le disposizioni contenute nel Regolamento n.1272/2008 (Regolamento CLP), che di seguito si riassumono:

- HP 1 "Esplosivo": rifiuto che può, per reazione chimica, sviluppare gas a una temperatura, una pressione e una velocità tali da causare danni nell'area circostante. Sono inclusi i rifiuti pirotecnici, i rifiuti di perossidi organici esplosivi e i rifiuti autoreattivi esplosivi;
- HP 2 "Comburente": rifiuto capace, in genere per apporto di ossigeno, di provocare o favorire la combustione di altre materie;
- HP 3 "Infiammabile":

- rifiuto liquido infiammabile: rifiuto liquido il cui punto di infiammabilità è inferiore a 60°C oppure rifiuto di gasolio, carburanti diesel e oli da riscaldamento leggeri il cui punto di infiammabilità è superiore a 55°C e inferiore o pari a 75°C;

- rifiuto solido e liquido piroforico infiammabile: rifiuto solido o liquido che, anche in piccole quantità, può infiammarsi in meno di cinque minuti quando entra in contatto con l'aria;
- rifiuto solido infiammabile: rifiuto solido facilmente infiammabile o che può provocare o favorire un incendio per sfregamento;
- rifiuto gassoso infiammabile: rifiuto gassoso che si infiamma a contatto con l'aria a 20°C e a pressione normale di 101,3 kPa;
- rifiuto idroreattivo: rifiuto che, a contatto con l'acqua, sviluppa gas infiammabili in quantità pericolose;
- altri rifiuti infiammabili: aerosol infiammabili, rifiuti autoriscaldanti infiammabili, perossidi organici infiammabili e rifiuti autoreattivi infiammabili.

- HP 4 "Irritante": rifiuto la cui applicazione può provocare irritazione cutanea o lesioni oculari;
- HP 5 "Nocivo": rifiuto che può causare tossicità specifica per organi bersaglio con un'esposizione singola o ripetuta, oppure può provocare effetti tossici acuti in seguito all'aspirazione;
- HP 6 "Tossico": rifiuto che può provocare effetti tossici acuti in seguito alla somministrazione per via orale o cutanea, o in seguito all'esposizione per inalazione;
- HP 7 "Cancerogeno": rifiuto che causa il cancro o ne aumenta l'incidenza;
- HP 8 "Corrosivo": rifiuto la cui applicazione può provocare corrosione cutanea;
- HP 9 "Infettivo": rifiuto contenente microrganismi vitali o loro tossine che sono cause note, o a ragion veduta ritenuti tali, di malattie nell'uomo o in altri organismi viventi;
- HP 10 "Teratogeno": rifiuto che ha effetti nocivi sulla funzione sessuale e sulla fertilità degli uomini e delle donne adulti, nonché sullo sviluppo della progenie;
- HP 11 "Mutageno": rifiuto che può causare una mutazione, ossia una variazione permanente della quantità o della struttura del materiale genetico di una cellula;
- HP 12 "Liberazione di gas a tossicità acuta": rifiuto che libera gas a tossicità acuta (Acute Tox. 1, 2 o 3) a contatto con l'acqua o con un acido;
- HP 13 "Sensibilizzante": rifiuto che contiene una o più sostanze note per essere all'origine di effetti di sensibilizzazione per la pelle o gli organi respiratori;
- HP 14 "Ecotossico": rifiuto che presenta o può presentare rischi immediati o differiti per uno o più comparti ambientali;
- HP 15 "Rifiuto che non possiede direttamente una delle caratteristiche di pericolo summenzionate ma può manifestarla successivamente": rifiuto che presenta o può presentare rischi immediati o differiti per uno o più comparti ambientali.

3. Verifica di assoggettabilità speditiva con l'utilizzo del RENTRI

Il d.lgs. n.105/2015 [1] pone in capo al Gestore l'onere di notificare la presenza di sostanze pericolose al di sopra delle soglie in esso indicate, ed è, pertanto, sulla base della documentazione da questi prodotta in fase di controllo che si basano le valutazioni di seguito riportate. Dovendo anche considerare i rifiuti pericolosi

prodotti e stoccati in uno Stabilimento, il primo passo da eseguire è quello di effettuare un'estrazione istantanea dal RENTRI dei rifiuti pericolosi presenti in stabilimento nei depositi temporanei (ex art.183 del d.lgs. n.152/06 [8]) con l'identificazione della classe di pericolo (HP1, HP2, ecc.) e quantità (tonn). Tale operazione risulta semplice nel RENTRI, in quanto è possibile effettuare un'estrazione in formato editabile ed eseguire il raggruppamento di rifiuti con stessa classe.
Successivamente, è necessario definire la corrispondenza tra la classificazione dei rifiuti pericolosi HP con i codici di pericolo CLP e la relativa Categoria Seveso. Per tale operazione si fornisce, con la Tabella 1 di seguito riportata, uno strumento atto alla definizione della corrispondenza, non diretta e univoca, ma come indicazione di massima, fra la classificazione dei rifiuti pericolosi come da Regolamento (UE) N. 1357/2014 [10], le Indicazioni di pericolo (CLP) e le Categorie delle sostanze pericolose conformemente al regolamento (CE) n.1272/2008 [2]. In tal modo, ai fini dell'assoggettabilità alla normativa Seveso, potranno essere considerati anche i rifiuti, che si trovano o possono trovarsi in uno stabilimento e che presentano o possono presentare, nelle condizioni esistenti in detto stabilimento, proprietà analoghe per quanto riguarda la possibilità di incidenti rilevanti.
La seguente tabella mette in correlazione le caratteristiche dei rifiuti pericolosi HP con i codici di pericolo CLP e la Categoria Seveso appartenente.

	NORMATIVA RIFIUTI	**CLP**	**NORMATIVA SEVESO (Parte 1)**		
	Criteri di classificazione dei rifiuti pericolosi come da Regolamento (UE) N. 1357/2014	Indicazioni di pericolo (CLP)	Colonna 1	Colonna 2	Colonna 3
			Categorie delle sostanze pericolose conformemente al regolamento (CE) n. 1272/2008	Quantità limite (t) delle sostanze pericolose di cui all'art. 3, paragrafo 10, per l'applicazione di	
				Requisiti di soglia inferiore	Requisiti di soglia superiore
PERICOLI FISICI	**HP1** – ESPLOSIVO	H200	**P1a** Esplosivi instabili (cfr. nota 8)	10	50
		H201 - H202 - H203 - H205	**P1a** Esplosivi, divisione 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 (cfr. nota 8)	10	50
		H204	**P1b** Esplosivi, divisione 1.4 (cfr. nota 10)	50	200
		H240 - H241	**P6a** Sostanze e miscele autoreattive, tipo A o B, oppure Perossidi organici, tipo A o B	10	50
	HP2 - COMBURENTE	H270	**P4** Gas Comburenti, categoria 1	50	200
		H271 - H272	**P8** Liquidi e Solidi Comburenti, categoria 1, 2 o 3	50	200
	HP3 - INFIAMMABILE	H220 - H221	**P2** Gas infiammabili, categoria 1 o 2	10	50
		H222 - H223	**P3a** Aerosol infiammabili (cfr. nota 11.1) Aerosol "infiammabili" delle categorie 1 o 2, contenenti gas infiammabili di categoria 1 o 2 o liquidi infiammabili di categoria 1	150 (peso netto)	500 (peso netto)
			P3b Aerosol infiammabili (cfr. nota 11.1) Aerosol "infiammabili" delle categorie 1 o 2, non contenenti gas infiammabili di categoria 1 o 2 né liquidi infiammabili di categoria 1 (cfr. nota 11.2)	5000 (peso netto)	50000 (peso netto)
		H224	**P5a** Liquidi infiammabili, categoria 1	10	50
		H225 - H226	**P5a** Liquidi infiammabili categoria 2 o 3 mantenuti ad una temperatura superiore al loro punto di ebollizione	10	50

			P5b Liquidi infiammabili categoria 2 o 3 mantenuti ad una temperatura superiore al loro punto di ebollizione	50	200
			P5c Liquidi infiammabili, categoria 2 o 3, non compresi in P5a e P5b	5000	50000
		H226	**P5a** Liquidi infiammabili - altri liquidi con punto di infiammabilità ≤ 60 °C, mantenuti a una temperatura superiore al loro punto di ebollizione (cfr. nota 12)	10	50
			P5b Liquidi infiammabili - altri liquidi con punto di infiammabilità ≤ 60 °C qualora particolari condizioni di utilizzazione, come la forte pressione o l'elevata temperatura, possano comportare il pericolo di incidenti rilevanti (cfr. nota 12)	50	200
		H228	/	/	/
		H242	**P6b** Sostanze e miscele autoreattive, tipo C, D, E o F, oppure Perossidi organici, tipo C, D, E o F	50	200
		H250	**P7** Liquidi e Solidi Piroforici, categoria 1	50	200
		H260	**O2** sostanze e miscele che, a contatto con l'acqua, liberano gas infiammabili, categoria 1	100	500
		H251 - H252 - H261	/	/	/
PERICOLI PER LA SALUTE	**HP4** - IRRITAZIONE CUTANEA E LESIONI OCULARI	H314	/	/	/
		H318	/	/	/
		H315 - H319	/	/	/
	HP5 – TOSSICITA' IN CASO DI ASPIRAZIONE	H370 Cat. 1	**H3** Tossicità specifica per organi bersaglio (STOT) - Esposizione singola STOT SE Categoria 1	50	200
		H371	/	/	/
		H335	/	/	/
		H372	/	/	/
		H373	/	/	/
		H304	/	/	/
	HP6 – TOSSICITÀ ACUTA	H300 Cat. 1	**H1** Tossicità acuta Categoria 1, tutte le vie di esposizione	5	20
		H300 Cat. 2	**H2** Tossicità acuta Categoria 2, tutte le vie di esposizione	50	200
		H301	/	/	/
		H302	/	/	/
		H310 Cat. 1	**H1** Tossicità acuta Categoria 1, tutte le vie di esposizione	5	20
		H310 Cat. 2	**H2** Tossicità acuta Categoria 2, tutte le vie di esposizione	50	200
		H311	/	/	/
		H312	/	/	/
		H330 Cat. 1	**H1** Tossicità acuta Categoria 1, tutte le vie di esposizione	5	20
		H330 Cat. 2	**H2** Tossicità acuta Categoria 2, tutte le vie di esposizione	50	200
		H331 Cat. 3	**H2** Tossicità acuta Categoria 3, esposizione per inalazione (Cfr. nota 7)	50	200
		H332	/	/	/
	HP7 - CANCEROGENO	H350	/	/	/
		H351	/	/	/
	HP8 –	H314	/	/	/

	CORROSIVO				
	HP9 – INFETTIVO	*D.L. specifico*	/	/	/
	HP10 – TOSSICO PER LA RIPRODUZIONE	H360	/	/	/
		H361	/	/	/
	HP11 - MUTAGENO	H340	/	/	/
		H341	/	/	/
	HP12 - LIBERAZIONE DI GAS A TOSSICITA' ACUTA	EUH029	**O3** Sostanze o miscele con indicazione di pericolo EUH029	50	200
		EUH031 - EUH032	/	/	/
	HP13 - SENSIBILIZZANTE	H317 - H334	/	/	/
PERICOLI PER L'AMBIENTE	**HP14** - ECOTOSSICO	H400 - H410	**E1** Pericoloso per l'ambiente acquatico, categoria di tossicità acuta 1 o di tossicità cronica 1	100	200
		H411	**E2** Pericoloso per l'ambiente acquatico, categoria di tossicità cronica 2	200	500
		H412 - H413 - H420	/	/	/
ALTRI PERICOLI	**HP15**	H205	**P1a** Pericolo di esplosione di massa in caso di incendio	10	50
		EUH001 - EUH019 - EUH044	/		
	/	EUH014	**O1** Sostanze o miscele con indicazione di pericolo EUH014	100	500

Tabella1. Tabella di correlazione tra codici RP / CLP / Categorie Seveso

Quanto rappresentato in Tabella n.1 evidenzia che non esiste una trasposizione diretta e univoca tra le caratteristiche di pericolo HP e le categorie della normativa Seveso (ad es. HP3, HP5, HP6, ecc.), tuttavia costituisce un valido aiuto ai fini della verifica di assoggettabilità alla Seveso, pur tenendo conto che la valutazione deve essere effettuata caso per caso.

Il Gestore, dopo aver censito i quantitativi di materie prime, prodotti, sottoprodotti e prodotti intermedi pericolosi (verifica conformità con schede di sicurezza) sommerà agli eventuali quantitativi di rifiuti pericolosi detenibili e riportati nell'atto autorizzativo all'esercizio, i rifiuti prodotti nelle attività dello stabilimento e presenti nei depositi temporanei. A riguardo occorre precisare che si devono considerare nel calcolo i quantitativi massimi teorici dei rifiuti pericolosi determinati dalle volumetrie utili dei serbatoi e/o degli stoccaggi, compresi gli hold-up.

La valutazione deve essere conservativa, nel senso che se si dovessero rilevare più categorie di pericolo nel rifiuto (HP1, HP2, ecc.) bisognerà considerarle tutte distintamente nella sommatoria del conteggio. Infatti, secondo quanto previsto dalla nota 4 dell'allegato 1 del d.lgs. n.105/2015 sarà necessario verificare le somme pesate per stabilire se lo stabilimento è da assoggettarsi alla Seveso. Qualora il riscontro sia positivo, bisognerà dotarsi di un sistema gestionale di monitoraggio che dimostri

istantaneamente i quantitativi detenibili in stabilimento sia a dimostrazione della non assoggettabilità, sia della classificazione come soglia inferiore e/o superiore.

4. Conclusioni

La piattaforma RENTRI, in quanto strumento speditivo nel calcolo del quantitativo totale di rifiuti aventi le stesse caratteristiche di pericolo, permette un monitoraggio più rigoroso e trasparente dei movimenti degli stessi e le informazioni in esso contenute (tipologia e quantità di rifiuti pericolosi stoccati o trattati) costituiscono una fonte di dati essenziale per calcolare l'eventuale assoggettabilità di uno stabilimento alla normativa Seveso, già solo considerando i quantitativi di rifiuti pericolosi.
Infatti, la valutazione per i rifiuti non è immediatamente riconducibile alle caratteristiche HP di pericolosità del rifiuto, come invece lo è normalmente per i casi di sole sostanze e/o miscele per le quali ci si avvale delle informazioni desunte dalle schede dati di sicurezza e relative classificazioni di pericolosità ai sensi del "Regolamento CLP".
Con l'utilizzo della piattaforma RENTRI, è possibile estrarre il dato del quantitativo totale di rifiuti con stessa caratteristica di pericolo HP, a cui poter far corrispondere, con indicazione di massima, tramite la Tabella n.1, il codice di pericolo del regolamento CLP e la categoria Seveso di cui alla Parte 1 dell'Allegato 1 al d.lgs. n.105/2015 [1].
È importante precisare, per completezza di informazione che, non esistendo una trasposizione diretta e univoca tra le caratteristiche di pericolo HP e le categorie Seveso, la valutazione deve essere effettuata caso per caso per i rifiuti non pericolosi e/o per quei rifiuti contenenti sostanze pericolose specificate di cui alla parte 2 dell'Allegato 1 al d.lgs. n.105/2015 e s.m.i. [1].

Bibliografia

[1] D.Lgs. n. 105/2015 e s.m.i.
[2] Regolamento (CE) n. 1272/2008
[3] Direttiva 2008/98/CE e s.m.i.
[4] Delibera SNPA n.105/2021 "*Linee Guida sulla classificazione dei Rifiuti*" recepita dal MASE con Decreto n. 47 del 9 agosto 2021
[5] D.Lgs. n. 213/2022
[6] Decreto del 04/04/2023 n.59
[7] Direttiva 2012/18/UE
[8] D.Lgs. n. 152/2006 e s.m.i.
[9] https://www.rentri.it/ (20/03/2026)
[10] Regolamento n. 1357/2014

Analisi dell'esperienza operativa nei siti RIR di soglia superiore delle province di Bologna, Ferrara e Modena: criticità, azioni di miglioramento e casi studio

B. Conestabile della Staffa[1], A. Lambertini[2], M. Brunetto[3], G. A. Zuccarello[1], L. Magnani[1]

[1]Inail – Uot di Bologna
[2]Arpae - Presidio Tematico Regionale Impianti a Rischio di Incidente Rilevante
[3]C.N.VVF. - Comando Provinciale di Bologna

Sommario
L'analisi dell'esperienza operativa costituisce uno strumento fondamentale per valutare l'efficacia del Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR). Tale approccio permette di identificare le criticità tecniche, organizzative e gestionali emerse durante l'esercizio degli stabilimenti, consentendo una valutazione puntuale delle azioni adottate.
La Regione Emilia-Romagna, caratterizzata da un significativo numero di stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante (RIR), rappresenta un osservatorio privilegiato per uno studio approfondito dell'esperienza operativa elaborata dai gestori.
La sistematizzazione degli eventi occorsi consente l'identificazione di eventuali aspetti critici presenti nei SGS-PIR implementati dai gestori, assicurando, oltre alla verifica di conformità rispetto a quanto previsto dal d.lgs. 105/2015, anche l'adozione di misure di prevenzione e mitigazione degli eventi incidentali e il miglioramento continuo del modello organizzativo e tecnico per la gestione degli stabilimenti.
Il presente lavoro si propone di analizzare criticamente l'esperienza operativa dei gestori di stabilimenti di soglia superiore nelle province di Bologna, Ferrara e Modena nel decennio 2015-2024. Verranno, inoltre, approfonditi due eventi significativi occorsi, fornendo elementi sulle dinamiche, sulle conseguenze incidentali, e sulle misure tecniche e gestionali adottate dai gestori per prevenire la ricorsività degli eventi e per migliorare il proprio SGS-PIR.

1. Introduzione

La Sezione 2 dell'Allegato H del d.lgs. 105/2015 disciplina l'analisi dell'esperienza operativa come elemento costitutivo e obbligatorio del SGS-PIR. In particolare, stabilisce che il Gestore di uno stabilimento RIR debba analizzare in modo sistemico l'esperienza acquisita durante l'esercizio, al fine di prevenire il verificarsi di incidenti rilevanti e del miglioramento continuo del Sistema di Gestione della Sicurezza, coerentemente con la politica di prevenzione degli incidenti rilevanti dell'organizzazione.
Operativamente, il Gestore è tenuto a compilare il format previsto dall'Allegato 2 - Analisi dell'esperienza operativa, censendo gli eventi significativi - occorsi nell'ultimo

decennio nel proprio sito o in realtà analoghe – secondo i criteri definiti all'Allegato H, paragrafo 1, lettera a).
Nel quadro normativo del D.Lgs. 105/2015 (Seveso III), la distinzione tra ciò che accade e ciò che potrebbe accadere è fondamentale per la prevenzione. Il fulcro di questo sistema è il concetto di evento significativo, definito dalla normativa come un "*qualunque incidente, quasi-incidente o anomalia di funzionamento o di gestione che metta in evidenza possibili carenze gestionali interessate dal verificarsi dell'evento e che permettano di focalizzare l'attenzione su possibilità di miglioramento, sia in termini specifici di risposta puntuale all'evento, sia in termini generali di adeguamento dello stabilimento, nel suo insieme, e del suo sistema di gestione della sicurezza (SGS-PIR)*" [1]. Sotto questa definizione rientrano:

- gli incidenti rilevanti: definiti dal d.lgs. 105/2015, sono eventi derivanti da emissioni, incendi o esplosioni di grande entità, dovuti a sviluppi incontrollati durante l'attività di uno stabilimento. Tali accadimenti determinano un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana, l'ambiente o i beni, sia all'interno che all'esterno del sito. Esempi tipici includono rilasci significativi di sostanze tossiche, incendi estesi o esplosioni i cui effetti impattano anche sulle aree limitrofe allo stabilimento.
- gli Incidenti, quasi-incidenti (near misses) e anomalie: per queste categorie, i criteri di distinzione sono delineati dalla norma UNI 10617:2019 [2], che utilizza la gravità delle conseguenze (effettive o potenziali) come parametro discriminante. Si va dai danni reali a persone o beni (incidenti), a eventi potenzialmente pericolosi bloccati dalle barriere di sicurezza (quasi-incidenti), fino alle semplici deviazioni procedurali o guasti minori (anomalie).

Se per gli incidenti rilevanti vige l'obbligo di notifica e registrazione nella banca dati europea eMars - gestita dal Joint Research Centre della Commissione Europea per centralizzare le segnalazioni degli Stati Membri - la gestione degli eventi minori assume una valenza strategica interna per il processo di miglioramento continuo del SGS-PIR.
Nello specifico, la segnalazione di un evento in eMars è obbligatoria per gli Stati membri dell'UE quando è coinvolto uno stabilimento Seveso e l'accaduto soddisfa i criteri di "incidente rilevante" definiti dall'Allegato VI della Direttiva Seveso III. Le informazioni vengono inserite direttamente dall'autorità ufficiale del Paese in cui l'evento si è verificato.
A livello nazionale, il monitoraggio è garantito dalla banca dati curata dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) per conto del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE). La piattaforma svolge un ruolo cruciale perché rappresenta lo strumento tecnico incaricato di alimentare il flusso di informazioni verso il sistema europeo eMars, creando un ponte diretto tra monitoraggio nazionale e comunitario.
Nonostante le restrizioni d'accesso, entrambi i database costituiscono uno strumento fondamentale per il confronto sistematico tra scenari analoghi in contesti industriali differenti: favoriscono l'individuazione di criticità comuni e la diffusione delle "lezioni

apprese", elementi essenziali per la redazione e l'aggiornamento dei Rapporti di Sicurezza.
Per ogni evento censito, il Gestore ha l'obbligo di:
- Fornire una descrizione sintetica della dinamica;
- Individuare le cause immediate (fattori scatenanti);
- Valutare il concorso di fattori tecnici, organizzativi e umani (cause radice);
- Analizzare l'efficacia delle misure di prevenzione e protezione (barriere) sia attuate che pianificate;
- Rilevare eventuali carenze strutturali del SGS-PIR.

Nel corso delle ispezioni SGS-PIR, l'esame congiunto dell'Allegato 2 tra Commissione ispettiva e Gestore costituisce un momento centrale del processo. Questo confronto permette di verificare l'adeguatezza dei processi di analisi e gestione degli eventi occorsi, garantendo che l'esperienza operativa si traduca concretamente in azioni di miglioramento e in un reale accrescimento della sicurezza del sito.
I format compilati dai Gestori, dal 2023 alimentano il Repository incidentale INAIL EsOpIA (Esperienze Operative ed Intelligenza Artificiale). La piattaforma, accessibile al pubblico [3], impiega algoritmi di Intelligenza Artificiale per catalogare, analizzare e rendere fruibile il patrimonio di esperienze operative degli stabilimenti Seveso di soglia superiore sul territorio nazionale. L'obiettivo è trasformare i dati tecnici in strumenti di prevenzione collettiva, promuovendo una cultura della sicurezza basata sulla condivisione delle conoscenze.

2. Stabilimenti a rischio di incidente rilevante di soglia superiore nella Regione Emilia Romagna

Al 31 dicembre 2024, sul territorio regionale risultavano notificati presso l'inventario nazionale degli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, gestito da ISPRA [4], 54 stabilimenti di soglia superiore (Tabella 1). Tra questi, si segnala il caso particolare di un'azienda in provincia di Ferrara che, pur essendo ancora presente nell'inventario ufficiale, non risulta in esercizio dal 2018.

Province Emilia Romagna	**n. stabilimenti di soglia superiore**
Reggio Emilia (RE)	2
Piacenza (PC)	2
Parma (PR)	2
Ravenna (RA)	28
Forlì-Cesena (FC)	-
Rimini (RN)	-
Bologna (BO)	9
Modena (MO)	1
Ferrara (FE)	10

(Fonte: Elaborazione degli autori su dati dell'Inventario nazionale degli stabilimenti RIR (dicembre 2024))

Tabella 1. Stabilimenti RIR di soglia superiore nella regione Emilia Romagna.

I dati estrapolati, confermano che la concentrazione geografica degli stabilimenti RIR è nettamente superiore nelle province di Ravenna, Bologna e Ferrara. Inoltre, come mostrato in Tabella 2, il settore prevalente è quello chimico, ma sul territorio sono diffusi anche depositi di GPL, seguiti da stoccaggi di prodotti combustibili/petroliferi e depositi di fitofarmaci e fertilizzanti.
Oltre il 50% delle aziende chimiche e petrolchimiche regionali si concentra nel polo industriale di Ferrara, specializzato nella produzione di polimeri e materie plastiche, e nella zona industriale/portuale di Ravenna, sito fondamentale invece per l'importazione di materie prime e l'esportazione di prodotti finiti.

Categorie di attività		**n. stabilimenti**
(03)	Attività minerarie (sterili e processi fisico-chimici)	3
(07)	Trattamento di metalli mediante processi elettrolitici o chimici	-
(08)	Raffinerie petrolchimiche/di petrolio	1
(10)	Stoccaggio di combustibili (anche per il riscaldamento, la vendita al dettaglio ecc.)	4
(11)	Produzione, distruzione e stoccaggio di esplosivi	1
(12)	Produzione e stoccaggio di articoli pirotecnici	-
(13)	Produzione, imbottigliamento e distribuzione all'ingrosso di gas di petrolio liquefatto (GPL)	3
(14)	Stoccaggio di GPL	2
(15)	Stoccaggio e distribuzione di GNL	1
(16)	Stoccaggio e distribuzione all'ingrosso e al dettaglio (ad esclusione del GPL)	3
(17)	Produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi	7
(18)	Produzione e stoccaggio di fertilizzanti	3
(19)	Produzione di prodotti farmaceutici	-
(20)	Stoccaggio, trattamento e smaltimento dei rifiuti	4
(22)	Impianti chimici	14
(23)	Produzione di sostanze chimiche organiche di base	1
(24)	Fabbricazione di plastica e gomma	1
(28)	Industrie alimentari e delle bevande	1
(38)	Fabbricazione di sostanze chimiche (non specificate altrimenti nell'elenco)	2
(39)	Altra attività (non specificata altrimenti nell'elenco)	3

(Fonte: Elaborazione degli autori su dati dell'Inventario nazionale degli stabilimenti RIR (dicembre 2024))

Tabella 2. Categorie di attività degli stabilimenti RIR nella regione Emilia-Romagna.

L'analisi delle categorie merceologiche basata sulla codifica NACE (Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté Européenne) permette di delineare, seppur in termini qualitativi, il profilo di rischio intrinseco caratteristico degli stabilimenti operanti sul territorio regionale. L'adozione di questo standard è

fondamentale perché consente di confrontare il profilo di rischio regionale con quello di altri distretti industriali europei all'interno del database eMars.
Si riportano di seguito alcune statistiche, elaborate dagli autori del presente articolo sulla base dei dati relativi ai 20 stabilimenti di soglia superiore attivi nelle province di Bologna, Ferrara e Modena nel periodo 2015-2024 (Tabella 3).

Categorie di attività		**n. di stabilimenti per Provincia**		
		Bologna	**Ferrara**	**Modena**
(03)	Attività minerarie (sterili e processi fisico-chimici)	1	1	-
(11)	Produzione, distruzione e stoccaggio di esplosivi	1	-	-
(14)	Stoccaggio di GPL	2	-	-
(16)	Stoccaggio e distribuzione all'ingrosso e al dettaglio (ad esclusione del GPL)	1	-	-
(17)	Produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi	1	3	-
(18)	Produzione e stoccaggio di fertilizzanti	-	1	1
(20)	Stoccaggio, trattamento e smaltimento dei rifiuti	2	1	-
(22)	Impianti chimici	-	4	
(39)	Altra attività (non specificata altrimenti nell'elenco)	1	-	-
Totale stabilimenti		**9**	**10**	**1**

(Fonte: Elaborazione degli autori su dati dell'Inventario nazionale degli stabilimenti RIR (dicembre 2024))

Tabella 3. Numero degli stabilimenti RIR di soglia superiore per categorie di attività nelle province di Bologna, Ferrara e Modena.

3. Analisi critica dell'esperienza operativa per gli stabilimenti RIR di soglia superiore delle province di Bologna, Ferrara e Modena

Nel periodo di riferimento 2015-2024, l'analisi dei dati raccolti tramite i format dell'Allegato 2 durante le ispezioni SGS-PIR ha permesso di censire complessivamente 487 eventi. La distribuzione statistica evidenzia una netta prevalenza di quasi-incidenti (287) e anomalie (197), a fronte di 3 incidenti registrati.
La maggior parte dei quasi-incidenti (near miss) è riconducibile a perdite di contenimento di sostanze pericolose o principi di incendio che, non hanno generato conseguenze significative su persone, ambiente o beni/impianti.
L'analisi critica dell'esperienza operativa ha tuttavia fatto emergere un primo elemento di difficoltà per i Gestori nella classificazione univoca degli accadimenti. Tale incertezza ha generato una categorizzazione disomogenea: eventi con dinamiche

analoghe sono stati classificati in modo differente a seconda dello stabilimento, rendendo complesso il confronto diretto tra i dati.
Nella Tabella 4 viene riportata la disamina degli eventi suddivisi per annualità e provincia. Dall'analisi della tendenza temporale emerge una frequenza media di circa 48 eventi all'anno.

Anno	Eventi occorsi per Provincia			Eventi totali occorsi
	Bologna	Ferrara	Modena	
2015	14	17	2	33
2016	26	27	-	53
2017	26	23	2	51
2018	26	26	4	56
2019	42	25	5	72
2020	25	25	7	57
2021	18	39	2	59
2022	24	37	1	62
2023	7	13	1	21
2024	7	13	3	23
Totale	**215**	**245**	**27**	**487**

(Fonte: Elaborazione degli autori su dati estratti dal format previsto all'Allegato 2 - Analisi dell'esperienza operativa (2015-2024))

Tabella 4. Distribuzione degli eventi per anno e per provincia.

L'analisi dei dati mette in luce una gestione dell'esperienza operativa ancora eterogenea. In diverse realtà, specialmente di piccole dimensioni, il processo non appare sempre strutturato e sistematico, assumendo spesso un carattere episodico. Durante le attività ispettive è emersa la tendenza a riportare nell'Allegato 2 solo gli eventi ritenuti più significativi o quelli strettamente riconducibili agli elementi definiti critici dal SGS-PIR, talvolta trascurando le priorità effettive definite dal sistema stesso. In altri casi, si rileva l'inserimento di eventi più pertinenti all'ambito della sicurezza sul lavoro (d.lgs. 81/2008), come infortuni, non strettamente correlati all'impiego di sostanze pericolose o agli elementi critici.
Si registra inoltre un numero di eventi maggiori per gli stabilimenti chimici, plausibilmente collegabile alla maggiore complessità dei siti, ma anche a una cultura della sicurezza più consolidata, che si traduce in una maggiore attenzione nella segnalazione e registrazione sistematica di ogni evento, indipendentemente dalla sua entità (Tabella 5).

Categorie di attività	anomalie	quasi incidenti	incidenti
(03) Attività minerarie (sterili e processi fisico-chimici)	10	3	-

Categorie di attività		anomalie	quasi incidenti	incidenti
(11)	Produzione, distruzione e stoccaggio di esplosivi	23	27	-
(14)	Stoccaggio di GPL	32	18	-
(16)	Stoccaggio e distribuzione all'ingrosso e al dettaglio (ad esclusione del GPL)	10	6	-
(17)	Produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi	24	39	-
(18)	Produzione e stoccaggio di fertilizzanti	21	34	-
(20)	Stoccaggio, trattamento e smaltimento dei rifiuti	-	2	1
(22)	Impianti chimici	71	133	1
(39)	Altra attività (non specificata altrimenti nell'elenco)	6	25	1

(Fonte: Elaborazione degli autori su dati estratti dal format previsto all'Allegato 2 - Analisi dell'esperienza operativa (2015-2024))

Tabella 5. Numero e tipologia di evento per categoria di attività.

L'analisi dei fattori gestionali indicati dal Gestore come carenti, basata sull'esame dei 487 eventi, evidenzia invece che le criticità principali riscontrate si concentrano su tre elementi fondamentali del Sistema di Gestione della Sicurezza (Tabella 6):

- Organizzazione e personale: emergono carenze legate per lo più alle attività di formazione e addestramento, e all'interazione tra uomo, sistema di controllo e impianto fisico. Sebbene molti eventi siano chiaramente conseguenti a errori degli operatori, e che quindi il fattore umano sia spesso la causa scatenante, i gestori tendono a focalizzarsi sul mancato rispetto delle procedure, ignorando le cause profonde legate all'errore umano;
- Identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti: lacune nella capacità di identificare e valutare correttamente i rischi potenziali;
- Controllo operativo: le criticità riguardano il mancato rispetto delle procedure operative e, soprattutto, una manutenzione spesso reattiva (si interviene solo dopo il guasto) anziché preventiva e pianificata. L'usura di attrezzature e accessori resta una delle determinanti principali degli eventi segnalati.

Elementi SGS-PIR		n. fattori gestionali critici
1.	Documento sulla politica di prevenzione, struttura del SGS-PIR e sua integrazione con la gestione aziendale	-
2.	Organizzazione e personale	176
3.	Identificazione e valutazione dei pericoli rilevanti	118
4.	Il controllo operativo	348

Elementi SGS-PIR	n. fattori gestionali critici
5. Gestione delle modifiche	34
6. Pianificazione di emergenza	32
7. Controllo delle prestazioni	19
8. Controllo e revisione	1

(Fonte: Elaborazione degli autori su dati estratti dal format previsto all'Allegato 2 - Analisi dell'esperienza operativa (2015-2024))

Tabella 6. Numero dei fattori gestionali critici indicati dal Gestore per elemento del Sistema di Gestione della Sicurezza

Si è riscontrata infine una disomogeneità nella compilazione del format previsto dall'Allegato 2 - Analisi dell'esperienza operativa. Nonostante le indicazioni, la compilazione risulta spesso sintetica o incompleta, tralasciando informazioni fondamentali, in particolare riguardo i fattori gestionali e le azioni di miglioramento intraprese.

4. Casi studio

Viene di seguito proposta l'analisi di due casi studio relativi a esplosioni di polveri occorse in stabilimenti chimici. Gli eventi, che hanno causato solo danni materiali alle apparecchiature, avrebbero potuto avere conseguenze ben più gravi per il personale e gli impianti se non fossero intervenuti i sistemi di soppressione. Per ciascun caso si descrive la dinamica dell'incidente e se ne analizzano le cause - spesso derivanti da una complessa interazione di fattori - illustrando infine le azioni di miglioramento previste e programmate per trarne utili insegnamenti gestionali.

4.1. Esplosione da attrito meccanico in un mulino di macinazione

Un'esplosione si è verificata all'interno di un mulino in uno stabilimento chimico durante la macinazione di 500 kg di prodotto solido. L'evento si è verificato dopo circa 2 ore dall'inizio della macinazione. Il sistema di soppressione e la squadra di emergenza interna sono intervenuti prontamente limitando i danni.

Le indagini post-incidente hanno confermato che lo scoppio è stato innescato dalla decomposizione di residui di una lavorazione precedente (PVC e trietanolammina – sodio perclorato). Il calore necessario all'innesco (> 300°C) è stato generato dall'attrito dei cuscinetti dell'albero motore, rimasti senza grasso lubrificante. L'albero di rotazione si è disallineato provocando la completa rottura del cuscinetto di fondo esterno al mulino e delle cinghie di trasmissione.

A seguito dell'evento il Gestore ha individuato come fattori gestionali critici, il 4. iv - "Procedure di manutenzione" per la carenza nella frequenza delle operazioni di ingrassaggio dei cuscinetti dell'albero motore e il 2.iv - "Fattori umani, interfacce operatore e impianto" per l'errore legato alla stesura delle procedure di

controllo/manutenzione. Al fine di prevenire il ripetersi dell'evento, il Gestore ha implementato le seguenti misure correttive:

- Aggiornato il piano di manutenzione incrementando la periodicità dell'operazione di ingrassaggio e inserendo un controllo periodico delle sonde di temperatura dei cuscinetti di testa dei mulini;
- Redazione di specifiche istruzioni operative per l'ingrassaggio dei cuscinetti dell'albero motore, estese a tutte le linee produttive, con contestuale addestramento specifico del personale addetto.
- adozione di una procedura rigorosa di pulizia del raffreddatore ad ogni cambio turno o prodotto, finalizzata a eliminare il rischio di trascinamento e cross-contamination di residui solidi.

4.2 Esplosione e incendio in reparto di produzione vernici: innesco elettrostatico da polvere di alluminio

Durante la produzione di vernici, si è verificata un'esplosione seguita da un incendio mentre un operatore versava circa 60 kg di base polimerica (da un contenitore IBC) in un miscelatore dove erano già stati caricati 5 kg di solidi, tra cui polvere di alluminio. L'incendio ha coinvolto la tramoggia e l'intero IBC, causando un'ustione all'operatore e l'evacuazione dei reparti.

Sono stati attivati i sistemi di soppressione automatica e la squadra di emergenza interna, supportata successivamente dai Vigili del Fuoco.

L'indagine post-incidente ha individuato due fattori scatenanti:

- errato stoccaggio: l'IBC era stato conservato all'aperto; l'imballaggio bagnato aveva perso le sue proprietà dissipative, rendendo inefficace la messa a terra;
- errore operativo: l'operatore ha invertito la sequenza di carico, dosando la base polimerica dopo la polvere di alluminio. Questo ha generato un accumulo di cariche elettrostatiche che ha innescato l'esplosione e il successivo ritorno di fiamma.

In esito all'analisi dell'evento, il Gestore ha riscontrato criticità nei seguenti ambiti gestionali: Formazione e addestramento (2.iii), Identificazione dei pericoli (3.ii), Procedure operative (4.iii), Manutenzione (4.iv) e Pianificazione dell'emergenza (6.i).

Per mitigare tali rischi, sono state definite le seguenti azioni correttive:

- stoccaggio protetto: obbligo di conservazione al coperto per le materie prime sensibili all'umidità (polveri metalliche), prevenendo il deterioramento degli imballaggi;
- revisione procedurale: aggiornamento della procedura operativa di miscelazione con focus sulla sequenza di dosaggio dei componenti.
- adeguamento tecnico e impiantistico: installazione di un giunto conduttivo sulle tramogge e implementazione di stazioni di carico inertizzate con azoto.
- aggiornamento della formazione sui rischi delle polveri di alluminio e programmazione di esercitazioni specifiche su scenari di incendio ed esplosione conseguenti ad accensione di polveri combustibili.

5. Conclusioni

L’analisi strutturata e sistematica dell’esperienza operativa rappresenta un pilastro fondamentale per il miglioramento continuo del Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR).

Dalla disamina dei 487 eventi occorsi tra il 2015 e il 2024 nelle province di Bologna, Modena e Ferrara, emerge come la maggior parte delle criticità derivi da una combinazione di carenze gestionali e organizzative, riconducibili in particolare agli elementi 2, 3 e 4 del SGS. Tali evidenze sottolineano la necessità per i Gestori di pianificare azioni correttive, sia impiantistiche che gestionali, con una prospettiva di lungo periodo, in modo da evitare eventi analoghi.

Gli interventi di miglioramento dovrebbero focalizzarsi sulla revisione delle procedure operative, l'ottimizzazione dei piani di manutenzione e il potenziamento della formazione, estendendola sia alla conduzione ordinaria che alla gestione delle emergenze. In questo contesto, la condivisione dell'esperienza operativa interna durante le sessioni formative è cruciale: essa non solo accresce la cultura della sicurezza aziendale, ma sensibilizza gli operatori a segnalare tempestivamente ogni anomalia. Parallelamente, è auspicabile superare il tradizionale riserbo informativo per favorire una maggiore condivisione delle "lessons learned" tra stabilimenti con processi analoghi.

In ultima analisi, è necessaria un’attenta individuazione da parte del Gestore degli eventi occorsi nel proprio stabilimento, identificazione che potrebbe essere agevolata dalla definizione di univoci criteri per la corretta individuazione degli incidenti, quasi incidenti e anomalie.

Bibliografia e sitografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105 - "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose" (G.U. n. 161 del 14 luglio 2015 - Supplemento ordinario 38/L).

[2] Norma UNI 10617:2019 - "Stabilimenti a rischio di incidente rilevante - Sistema di gestione della sicurezza - Requisiti".

[3] https://www.inail.it/app/rcqi-fe

[4] https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it/seveso-query-105/Default.php (accesso dicembre 2024)

L’analisi dell’esperienza operativa negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante: focus sui quasi incidenti negli stabilimenti siciliani

Furia F.[1], Delle Site C.[2], Pirone A.[2]

[1]ARPA Sicilia – UOC Valutazioni e pareri ambientali
[2]Inail - Dit

Sommario
Gli stabilimenti che rientrano nel campo di applicazione del d.lgs. 105/2015, relativo al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, sono oggetto di specifiche ispezioni finalizzate ad un esame pianificato e sistematico dei sistemi tecnici, organizzativi e di gestione previsti ed attuati negli impianti. La procedura ispettiva prevede che il gestore compili specifici format, tra cui le schede dell’analisi dell’esperienza operativa, nelle quali sono riportati gli eventi significativi (incidenti, quasi incidenti, anomalie) occorsi nello stabilimento. Partendo dall’analisi delle schede dell’esperienza operativa raccolte dall’Inail a valle delle ispezioni, il presente lavoro si pone l’obiettivo di analizzare gli eventi (soprattutto near miss) avvenuti negli stabilimenti di soglia superiore in Sicilia in relazione a specifiche attrezzature critiche. Lo studio si avvale di EsOpIA (Esperienza operativa e Intelligenza Artificiale), un repository documentale che utilizza algoritmi di IA per estrarre informazioni dai documenti. Sono effettuate valutazioni riguardanti le cause che hanno generato il quasi incidente, le barriere preventive e protettive intervenute, nonché la ricorrenza di specifici eventi. I risultati rappresentano un importante supporto nella definizione delle misure di sicurezza, per il loro miglioramento e per l’erogazione di attività di informazione specifiche.

1. Introduzione

Il gestore di uno stabilimento assoggettato alla normativa Seveso è tenuto ad adottare tutte le misure atte a prevenire un incidente rilevante e a limitarne le conseguenze; l’adempimento di tale obbligo non può prescindere dalla conoscenza degli eventi già occorsi. La normativa definisce le modalità per la comunicazione, da parte degli Stati membri, alla Commissione europea degli incidenti che rispondono ai criteri riportati nell’allegato 6 del decreto per lo scambio di informazioni a livello europeo attraverso il database e-MARS (Major Accident Reporting System) [1] con lo di condividere lezioni apprese derivanti dall’analisi di un incidente. Questo database è specifico per il settore Seveso, ma informazioni utili relative agli aspetti di sicurezza negli stabilimenti industriali sono reperibili anche consultando altri database come quello francese ARIA (Analysis, Research, and Information on Accidents) [2] e lo statunitense Chemical Safety Board [3]. A livello nazionale è specifico per gli aspetti di in ambito di salute e sicurezza il sistema di sorveglianza degli infortuni mortali e

gravi Infor.Mo [4]. Tutti questi strumenti hanno in comune che si riferiscono ad eventi (incidenti, infortuni) già accaduti; scarse sono invece le informazioni sui quasi incidenti (near miss). Partendo da questa considerazione, con l'entrata in vigore in Italia del d.lgs.105/15, l'Inail ha iniziato a raccogliere in modo sistematico e a scopo di ricerca le schede dell'esperienza operativa compilate dai gestori e consegnate agli ispettori durante le ispezioni effettuate ai sensi dell'articolo 27 del decreto. Le schede raccolte sono state organizzate in un archivio documentale digitale, sfruttando le opportunità fornite dall'innovazione tecnologica.
Nelle industrie soggette alla normativa "Seveso", con il termine "esperienza operativa" si intende la raccolta di documenti che riportano la descrizione e l'analisi di "tutti gli eventi significativi (incidenti, quasi incidenti, anomalie) occorsi almeno nell'ultimo decennio nello stabilimento o in stabilimenti similari" [d.lgs.105/15 All. H, Sez. 2]. Questo processo di raccolta e analisi è parte integrante del sistema di gestione della sicurezza per la prevenzione degli incidenti rilevanti (SGS-PIR) e consente di individuare i punti di debolezza del sistema stesso e le relative misure di miglioramento. Le schede dell'esperienza operativa raccolte da Inail sono sottoposte ad un attento processo di analisi ed anonimizzazione e rappresentano la base documentale del repository denominato EsOpIA (Esperienza Operativa e Intelligenza Artificiale) [5] che, avvalendosi delle tecniche di Intelligenza Artificiale, permette la raccolta e la ricerca di documentazione relativa al mondo della sicurezza degli impianti industriali con l'obiettivo di condividere le informazioni relative agli eventi significativi.
Le potenzialità di studio e di ricerca supportate da EsOpIA spaziano da ambiti strettamente tecnici (serbatoi e misuratori di livello [6]), a quelli gestionali (permessi di lavoro [6]), comprendendo anche i rischi emergenti (cambiamento climatico [6]) e casi specifici (emergenza incendi in estate [7]), settore elettrico [8], ponteggi [6]).

2. Obiettivo

L'obiettivo del presente elaborato è effettuare un'analisi degli incidenti e dei quasi incidenti avvenuti negli stabilimenti Seveso di soglia superiore presenti nella regione Sicilia. Avvalendosi dell'applicativo EsOpIA per la ricerca degli eventi connessi ad alcune attrezzature critiche, l'analisi ha individuato le principali criticità emerse negli stabilimenti con una particolare attenzione alla gestione di tali attrezzature, soprattutto dal punto di vista delle misure tecniche ed organizzative connesse al controllo operativo.

3. Metodologia

3.1 Documentazione disponibile

Gli stabilimenti Seveso sono soggetti alle ispezioni previste dall'articolo 27 del decreto finalizzate all'esame della conformità del Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR) e alla verifica dell'attuazione della Politica di Prevenzione degli incidenti rilevanti. Le ispezioni sono svolte da

Commissioni interdisciplinari (composte da rappresentanti Ispra/Arpa, Inail e CNVVF) secondo le modalità definite dall'allegato H del d.lgs. 105/2015. Il decreto ha introdotto una specifica periodicità di svolgimento delle ispezioni basata sui criteri assunti nella pianificazione triennale nazionale (definita dall'Autorità competente ed Ispra) alla quale segue la programmazione annuale regionale (a cura dei Comitati tecnici regionali). Dal 2016, la documentazione relativa alle ispezioni, tra la quale le schede dell'esperienza operativa, è raccolta dall'Inail e, in particolare, dal dipartimento innovazioni tecnologiche, a conclusione del triennio di riferimento. Le informazioni contenute nella scheda sono: la data di accadimento, il titolo dato all'evento, la descrizione tecnica dell'evento incidentale, il sistema tecnico critico coinvolto, il fattore gestionale individuato critico rispetto al quale riportare la descrizione che illustra la non adeguatezza, le azioni intraprese al momento dell'accadimento e le azioni previste e programmate affinché non si ripeta. Le schede rappresentano la base informativa di EsOpIA e comprendono eventi dal 2000 al 2024.

3.2 EsOpIA (Esperienza operativa e Intelligenza Artificiale)

EsOpIA è un repository documentale consultabile sia in linguaggio naturale sia tramite il modello utilizzato dal sistema stesso che si avvale di tecniche di intelligenza artificiale [5]. In generale, l'obiettivo del repository è contribuire alla definizione di processi di prevenzione tramite la fruizione di alcuni documenti tecnici relativi al mondo della sicurezza degli impianti industriali (non solo le schede operative di quasi incidenti, ma anche schede di guasto e report tecnici presenti nel repository) e l'indicizzazione di questi documenti secondo delle entità ritenute d'interesse per il mondo della ricerca ed il settore industriale.
Le componenti del modello, quindi, sono le "entità" e le "relazioni" [10]. Questa tipologia di modello corrisponde ad una rappresentazione schematizzata della realtà oggetto di ricerca, che ne individua i concetti caratterizzanti e le relazioni che tra questi intercorrono. Sulla base della ricerca effettuata dall'utente, EsOpIA fornisce una serie di documenti di rapida consultazione e, per ogni documento, il sistema suggerisce documenti "simili" a quello selezionato tra i risultati. La ricerca in linguaggio naturale si può perfezionare attraverso l'utilizzo di filtri, cioè delle condizioni più specifiche che restringono la ricerca e permettono di individuare insiemi più limitati di documenti.

3.3 Eventi riguardanti attrezzature critiche in Sicilia

Per lo scopo del presente lavoro la ricerca è stata focalizzata su alcuni sistemi tecnici critici, così come definiti nell'allegato H, punto 1, lettera i del d.lgs. 105/2015, ovvero "apparecchiature, serbatoi, componenti e dispositivi di controllo, protezione e sicurezza coinvolti negli scenari incidentali ipotizzabili nello stabilimento o desunti dall'analisi dell'esperienza operativa". Un primo approccio allo studio ha indirizzato l'analisi sulle apparecchiature di contenimento e stoccaggio primario e su alcune apparecchiature di sicurezza fondamentali; in particolare, utilizzando il repository

EsOpIA, è stato scelto di effettuate le ricerche degli eventi utilizzando i seguenti termini: “serbatoio”, “tubazioni” (e relativi termini di uso comune o normalmente riportati nelle schede come “piping”, “linea”), “flangia” e “pompa” (e “motopompa”).
Per ogni tipologia di ricerca effettuata sulle attrezzature critiche sopra menzionate, la ricerca è stata perfezionata attraverso l’applicazione del filtro “near miss” che, nella raccolta documentale, seleziona soltanto le schede dell’esperienza operativa e, tra quelle ottenute, è stata selezionata la regione Sicilia attraverso l’utilizzo dell’apposito filtro.
Tutti i documenti restituiti dalla ricerca sono stati letti ed analizzati in modo da selezionare soltanto quelli in cui le attrezzature critiche ricercate non fossero soltanto menzionate, ma realmente oggetto di una perdita di contenimento e quindi direttamente coinvolte nell’evento.
La Figura 1 riporta la metodologia utilizzata per l’analisi degli eventi avvenuti in Sicilia associati alle tipologie di attrezzature ricercate nel repository.

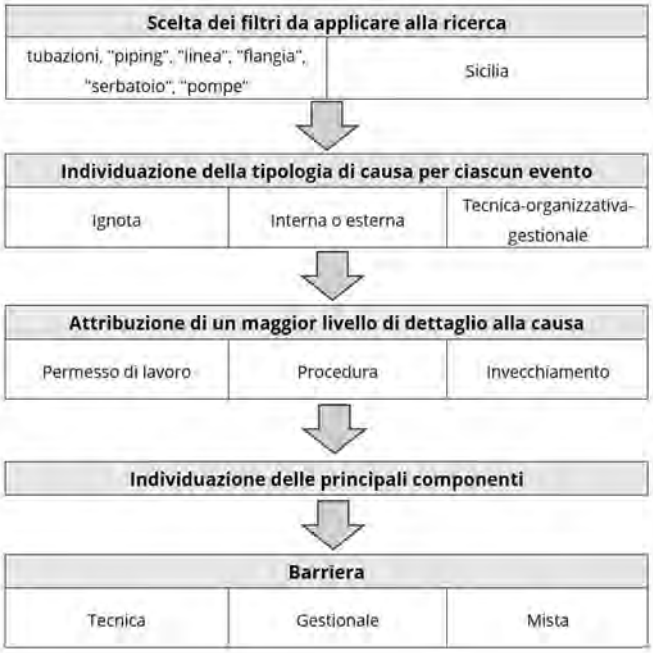


Figura 1. Metodologia di analisi

La metodologia è di seguito descritta:

a) per ciascun evento, è stata individuata la causa (interna all’impianto oppure esterna, ad esempio associata ad eventi meteorologici) e la tipologia (tecnica, organizzativa, gestionale); è stata prevista anche la possibilità di causa “ignota” nei casi in cui non fosse indicata nella scheda o non fosse deducibile dalle informazioni in essa contenute (un aspetto essenzialmente riconducibile alla completezza di compilazione della scheda);
b) per gli eventi in cui è stato possibile individuare la causa, si è proceduto ad un maggior livello di approfondimento individuando gli aspetti maggiormente

richiamati che sono risultati il permesso di lavoro, le procedure e l'invecchiamento dell'attrezzatura;

c) Successivamente sono state individuate le componenti impiantistiche maggiormente coinvolte e le barriere (tecniche e/o gestionali).

4. Risultati

4.1 Analisi delle schede sulla base dell'attrezzatura

La tabella 1 mostra il numero delle schede presenti nel repository per attrezzatura critica a partire dall'inserimento dei termini fino ad arrivare alla selezione delle schede specifiche della regione analizzata.

In particolare, l'attrezzatura ricercata è riportata nella colonna 1, il totale delle schede restituite dalla ricerca effettuata inserendo il termine relativo all'attrezzatura è indicato nella colonna 2 mentre il numero di schede risultanti dall'applicazione del filtro "near miss" (come descritto nel recedente paragrafo) è specificato nella colonna 3. Applicando il filtro sulla regione (sul totale delle schede della colonna 3) si ottiene il numero di schede che richiamano la specifica attrezzatura nella regione Sicilia; infine, le schede in cui l'attrezzatura è stata realmente oggetto di una perdita di contenimento e quindi direttamente coinvolte nell'evento è riportato nella colonna 5.

Attrezzatura critica	**Totale schede in EsOpIA**	**Totale schede** (Filtro: "near miss")	**Totale schede** (Filtro: Sicilia)	**Schede pertinenti**
TUBAZIONE	2689	2471	73	**22**
FLANGIA	355	352	8	**10**
SERBATOIO	1251	1223	42	**26**
POMPA/MOTOPOMPA	1084	1071	27	**9**

Tabella 1. Ricerca in EsOpIA delle schede relative all'attrezzatura critica

Nella tabella, con il termine generale "tubazione" viene indicato il totale delle singole ricerche effettuate per quella tipologia di attrezzatura; mentre il termine "pertinenti" è utilizzato per specificare le schede in cui l'attrezzatura è direttamente coinvolta nell'evento. Da una prima generale lettura della tabella, emerge che le attrezzature critiche maggiormente interessate da un evento indesiderato sono state i serbatoi e le tubazioni.

Un ulteriore approfondimento è stato effettuato analizzando le schede definite "pertinenti" in relazione alla tipologia di attività alla quale ricondurre l'evento; le più significative sono risultate:

- raffinerie
- produzione, fornitura e distribuzione di energia elettrica,
- stoccaggio combustibili,
- produzione, imbottigliamento e distribuzione all'ingrosso di GPL,
- stoccaggio GPL.

Si tratta di attività che caratterizzano il tessuto industriale siciliano e che si attendeva di ritrovare tenuto conto della tipologia di attrezzature ricercata.

La tabella 2 mostra il dettaglio dell'analisi specificando, per ogni attrezzatura, il numero di eventi per le diverse attività industriali menzionate.
Nella voce "Altro" sono compresi gli eventi non riconducibili ad una delle attività indicate.

Attrezzatura critica	Raffinerie	Produzione, fornitura e distribuzione di energia elettrica	Stoccaggio combustibili	Produzione, imbottigliamento e distribuzione all'ingrosso di GPL	Stoccaggio GPL	Altro	Schede pertinenti
TUBAZIONE	10	1	7	1	0	3	22
FLANGIA	3	1	6	0	0	0	10
SERBATOIO	9	0	11	4	1	1	26
POMPA/ MOTOPOMPA	2	2	5	0	0	0	9
Totale	*24*	*4*	*29*	*5*	*1*	*4*	*67*

Tabella 2. Schede pertinenti in funzione dell'attrezzatura critica e della tipologia di attività

Il maggior numero di eventi è avvenuto nelle raffinerie e negli impianti di stoccaggio di combustibili e, in misura minore, presso impianti di distribuzione o stoccaggio GPL e di produzione di energia elettrica.
Dall'esame dei documenti, meritano di essere riportate alcune particolarità riconducibili alla compilazione delle schede.
Dei 67 eventi totali avvenuti in Sicilia, i gestori che hanno compilato le schede dell'esperienza operativa hanno indicato 11 eventi come "anomalie" e non come "quasi-incidenti"; in particolare quattro afferenti alla voce "tubazione" e sette afferenti alla voce "serbatoio". È ragionevole ricondurre tale distinzione alla definizione adottata per classificare, all'interno dell'azienda, la tipologia di evento significativo, che normalmente è riportata nella specifica procedura di gestione di incidenti e quasi incidenti del SGSPIR. Tale distinzione, comunque, ai fini della discussione dei risultati presentati nel presente lavoro, non ne modifica la discussione che prende in considerazione gli eventi indesiderati intesi come "deviazioni" rispetto alle normali operazioni e modalità di esercizio e gestione dell'impianto.
L'analisi ha fatto è emergere un caso registrato sia negli eventi in cui l'attrezzatura critica è risultata essere una tubazione, sia negli eventi in cui è risultata essere un serbatoio; ciò in quanto, nella descrizione riportata nella scheda, relativamente alla tubazione emergeva anche il mancato funzionamento del sensore di livello del serbatoio nella medesima area di lavoro.

4.2 Analisi delle cause

I risultati di seguito riportati fanno riferimento alla metodologia descritta nel paragrafo 3.3 (punti a, b e c).
È stata fatta una prima distinzione rispetto alla causa interna o esterna (temporali, cicloni) ed è risultato che dei 67 eventi selezionati, 3 di essi sono avvenuti per cause esterne (a causa di un ciclone) e hanno interessato l'attrezzatura critica "serbatoi". In due casi la dinamica dell'evento è stata simile poiché dei fulmini si sono abbattuti sul

sistema di tenuta innescando un incendio; nel caso del terzo evento, si è verificato il danneggiamento del tetto di un serbatoio a seguito del quale è stata attivata sia la procedura che il sistema di schiumatura preventiva; ma da una successiva analisi da parte dell'azienda è emerso che le procedure non erano ben definite e chiare e, al contempo, non erano state correttamente applicate. Un approfondimento sulle cause ha riguardato i fattori tecnici e quelli gestionali-organizzativi. Sebbene possa risultare più semplice e immediato attribuire a fattori tecnici la causa di un quasi incidente, nella maggior parte dei casi quest'ultimo nasconde carenze organizzative e procedurali.
Le cause dei 67 eventi selezionati sono risultate riconducibili a diversi fattori; in particolare, i permessi di lavoro, le procedure non eseguite correttamente, l'invecchiamento delle attrezzature; tuttavia, per undici di questi eventi la causa è ignota, poiché non indicata sulla scheda e, in ogni caso, non desumibile dalle informazioni ivi riportate.
La figura 2 mostra il grafico relativo alle principali tipologie di cause in relazione all'attrezzatura.

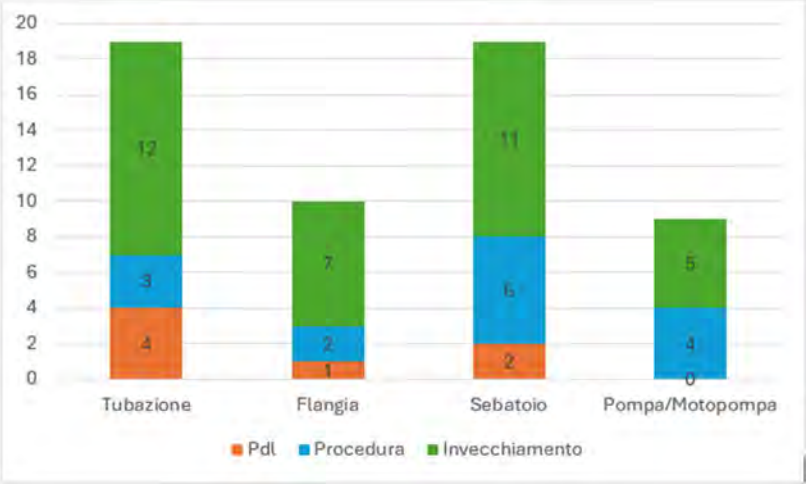


Figura 2. Tipologia di causa associata all'attrezzatura

Soltanto 4 eventi sono stati considerati come eventi dovuti a fattori propriamente tecnici; in tutti gli altri casi l'anomalia o la perdita di contenimento sono così distribuiti:

- per 7 eventi a causa dell'interazione di una ditta terza con l'impianto con pericolo di incidente rilevante (permessi di lavoro). In particolare 4 eventi hanno riguardato l'attrezzatura "tubazione", 1 evento l'attrezzatura "flangia" e 2 eventi il "serbatoio";
- per 15 eventi a causa di una procedura applicata in maniera erronea. In particolare 3 eventi hanno riguardato l'attrezzatura "tubazione", 2 eventi l'attrezzatura "flangia", 6 eventi l'attrezzatura "serbatoio" e 4 eventi le "pompe";
- per 35 eventi a causa del danneggiamento di un'attrezzatura non adeguatamente monitorata. In particolare 12 eventi hanno riguardato l'attrezzatura "tubazione",

7 eventi l'attrezzatura "flangia", 11 eventi l'attrezzatura "serbatoio" e 5 eventi le "pompe".

Le ultime due classi sono direttamente correlate tra loro. Infatti, effettuare con regolare periodicità il monitoraggio delle attrezzature critiche, attraverso l'applicazione di una procedura ben definita che preveda anche un piano di monitoraggio così come richiesto dalla normativa, comporta la diminuzione di eventi significativi attribuibili all'invecchiamento o al danneggiamento delle attrezzature.

Relativamente alle componenti impiantistiche coinvolte nei 67 eventi il dettaglio dei risultati è riportato nella figura 3.

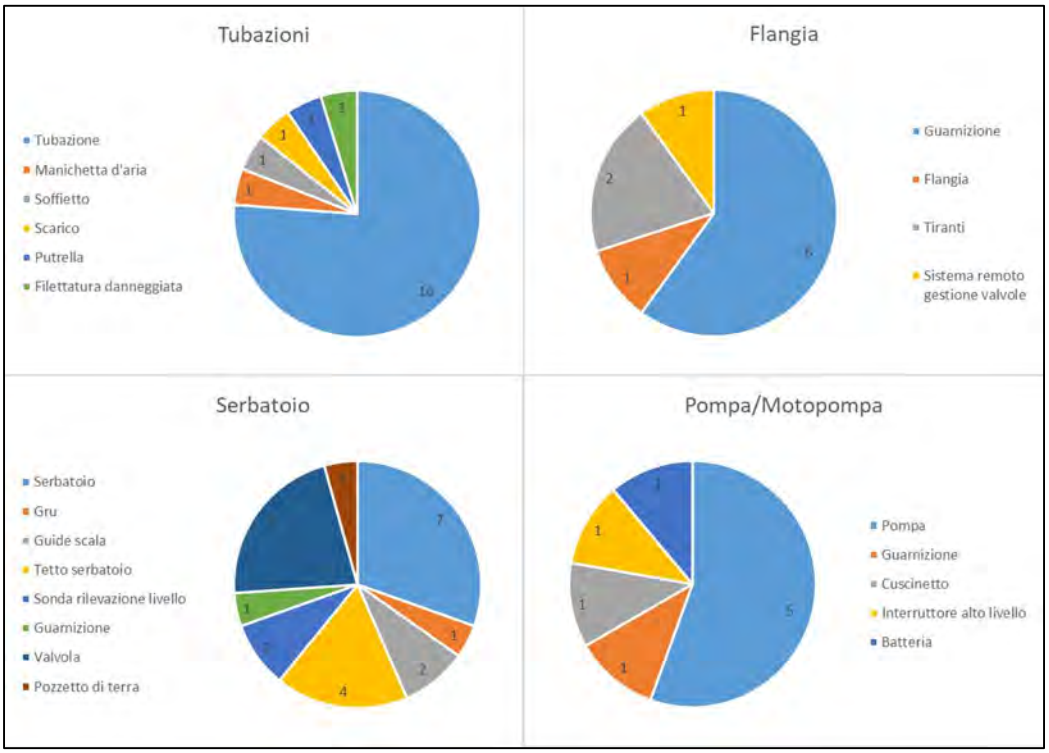


Figura 3. Componenti impiantistiche coinvolte in funzione dell'attrezzatura

Per quanto riguarda le tubazioni si è osservato che, nella maggior parte dei casi, esse stesse sono la componente danneggiata (ad eccezione di 6 su 21); mentre nel caso degli accoppiamenti flangiati, dei serbatoi e delle pompe si è osservato quanto segue:

- dei 10 eventi che hanno riguardato gli accoppiamenti flangiati, 6 (il 60%) hanno avuto come causa il deterioramento di una guarnizione e quindi la non perfetta tenuta;
- dei 26 eventi che hanno coinvolto i serbatoi:
  - cinque hanno interessato il tetto, in tre casi a livello del sistema di tenuta che, generando attrito con la struttura, ha successivamente innescato un incendio;
  - due hanno coinvolto il sistema di guide necessario a posizionare una scala e hanno richiesto un intervento di adeguamento;
  - tre sono scaturiti a seguito di un malfunzionamento della sonda di rilevazione del livello o dell'indicatore;

- due hanno riguardato la struttura (lamiera, mantello);
- cinque hanno coinvolto valvole installate e talvolta l'evento ha avuto inizio con un'errata manovra sul medesimo componente;
- nove sono scaturiti da specifiche attrezzature quali ad esempio il pozzetto di messa a terra o situazioni non ben specificate dal Gestore nella scheda dell'esperienza operativa.

- dei 9 eventi che hanno coinvolto le pompe:
  - tre si sono verificati a seguito di eventi corrosivi che hanno intaccato il corpo del macchinario o una parte di esso. In questi casi, dietro un processo di invecchiamento, si cela una carenza a livello di procedure che il Gestore dovrebbe attuare;
  - due si sono verificati a seguito della perdita di tenuta del sistema dedicato a tale scopo.

Il risultato principale riguarda l'elevata percentuale di guasti a livello delle flange, in particolar modo delle guarnizioni che costituiscono l'accoppiamento, spesso oggetto di perdite dovute all'usura del componente. Inoltre, numerosi eventi che hanno riguardato le tubazioni, circa il 70%, secondo quanto riportato nelle schede dell'esperienza operativa, hanno provocato una perdita di contenimento proprio a causa di un guasto sulla stessa, anche a causa di processi di corrosione gestiti in maniera non adeguata.

Nell'analisi delle cause, è emerso un evento che merita di essere menzionato e relativo alla registrazione di un "mancato infortunio". L'evento è correlato alle procedure di interazione tra una ditta committente e ditta terza appaltatrice derivante da un contesto di interferenza del rischio che è stato sottovalutato, oltre che da uno scambio di documentazione ed informazioni carente emerso dall'analisi del permesso di lavoro. Il caso è interessante poiché la gestione dei mancati infortuni non rientra nella valutazione del pericolo di incidente rilevante e normalmente non si riscontra la loro registrazione nelle schede dell'esperienza operativa. Non è possibile risalire all'analisi della scheda da pare della commissione ispettiva, ma il caso merita di essere evidenziato secondo un duplice punto di vista. Da un lato la presenza di questa evento potrebbe essere letto come una forma di consapevolezza nell'utilizzo delle schede dell'esperienza operativa intese come uno strumento utile nell'ambito di una gestione aziendale integrata ed armonizzata degli aspetti di salute, sicurezza e pericolo di incidente rilevante; dall'altro canto, non bisogna sottovalutare che sia stato verificato, in sede di ispezione, che il gestore abbia chiaro il concetto di quasi incidente come previsto dal d.lgs. 105/2015 e dalle norme tecniche di settore e ne riporti la definizione nella documentazione SGS di riferimento.

4.3 Analisi delle barriere

Il lavoro ha investigato le barriere di mitigazione intervenute o messe in atto dal gestore, laddove dichiarato. La Figura 4 riporta le barriere individuate in relazione all'attrezzatura. Le barriere sono state distinte in tecniche (intese come operazioni

automatiche o eseguite da un operatore quali ad esempio flussaggio di azoto su una tubazione, raffreddamento del mantello di un serbatoio, etc.), gestionali (intese come procedure di messa in sicurezza, procedure di emergenza, procedure di manutenzione o procedure di bonifica) e miste (la combinazione delle precedenti). In particolare, in 54 eventi sono intervenute le barriere di mitigazione e soltanto in quattro eventi i gestori hanno adoperato la sola barriera gestionale-organizzativa. Inoltre, a seguito di 11 eventi, è stato attivato il Piano di Emergenza Interna (PEI) e, solamente in un caso, che aveva coinvolto un serbatoio e la fuoriuscita di GPL dallo stesso, è stato attivato il Piano di Emergenza Esterna (PEE). In queste tipologie di eventi, si tratterebbe di eventi classificabili come "incidenti" anche se non sono specificati gli effetti all'interno o all'sterno dello stabilimento che lo renderebbero tale e non un "quasi incidente" (ad esempio nel caso di un incendio propagatosi e per il quale la/le barriera/e di mitigazione non sono state sufficienti o non hanno funzionato).

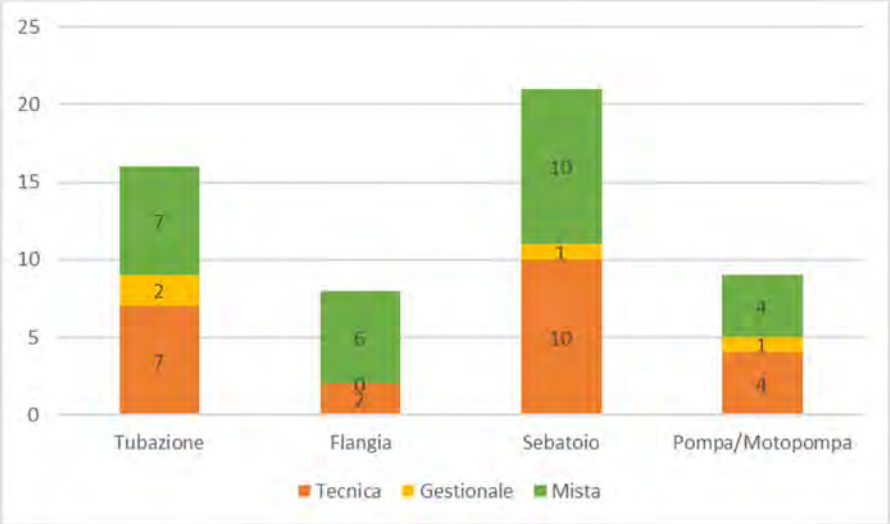


Figura 4. Barriere di mitigazione intervenute in funzione dell'attrezzatura

5. Conclusioni

L'analisi condotta, sebbene basata su un numero ridotto di eventi, limitatamente alla scelta delle attrezzature critiche considerate, ha permesso di mettere in risalto come alcune tipologie di eventi tendano a ripetersi nel tempo in impianti differenti. Partendo dalla ricerca degli eventi connessi ad alcune attrezzature critiche, selezionate a priori utilizzando i dati estratti dall'applicativo EsOpIA, è stata effettuata un'analisi volta a individuare le principali criticità emerse negli stabilimenti siciliani.
Alcuni aspetti che hanno influenzato i risultati dello studio sono riconducili alla procedura di segnalazione, registrazione ed analisi dei quasi incidenti implementata dal gestore nell'ambito del SGS che influenza in maniera determinante la compilazione della scheda stessa soprattutto dal punto di vista della correttezza delle definizioni utilizzate. Certamente è determinante anche il livello di dettaglio

riscontrato nella compilazione che è più elevato nelle schede dell'ultimo decennio rispetto a i primi anni 2000. Un altro fattore di cui tenere conto è che il repository EsOpIA contiene le informazioni sugli eventi presenti essenzialmente nelle schede raccolte in seguito alle ispezioni; ciò determina che non sono presenti tutti i quasi incidenti avvenuti in uno stabilimento (si presume che siano sottostimati rispetto alle modalità di registrazione suddette) e che non tutte le schede raccolte pervengano in seguito ai monitoraggi.
Nonostante ciò, l'opportunità di usufruire di informazioni utili a caratterizzare il pericolo di incidente rilevante in relazione ad un territorio, ad una tipologia di azienda o ad una attrezzatura critica, consente di superare un approccio basato sull'analisi del singolo evento, inquadrandolo in un contesto più ampio nel quale non è un avvenimento isolato, ma diventa parte di una problematica che probabilmente merita di essere attenzionata. È ciò che lo studio si è proposto di analizzare relativamente alla regione Sicilia, individuando tematiche di confronto ed approfondimento che possano supportare la soluzione di problemi, gli investimenti o l'erogazione di attività di informazione specifiche (basate su problematiche reali e concrete) per i lavoratori.

Bibliografia

[1] eMARS, Major Accident Reporting System <emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content> ultimo acccesso.03.02.2026
[2] ARIA, Analysis, Research, and Information on Accidents. <aria.developpement-durable.gouv.fr/> ultimo accesso.03.02.2026
[3] Chemical Safety Board < csb.gov> ultimo accesso.03.02.2026
[4] Infor.MO <https://www.inail.it/nsol-informo/home.do?tipoEvento=1> ultimo accesso.17.02.2026
[5] EsOpIA, Operational Experience and Artificial Intelligence document archive <Inail.it/app/rcqi-fe> accessed.03.02.2026
[6] Bollettino "Serbatoio con tetto galleggiante", Bollettino "Indicatori/misuattori di livello", Bollettino "Permessi di lavoro", Bollettino "Cambiamenti climatici" <https://www.portaleseveso.isprambiente.gov.it/BollettiniPagina> ultimo accesso.17.02.2026
[7] Ansaldi S.M., Pirone A., Vallerotonda M.R., Agnello P., Rischi dell'estate negli stabilimenti PIR, Nota di sicurezza 2/2022, ISBN 978-88-7484-743-3 © 2022 Inail
[8] Vallerotonda M.R., Ansaldi S.M., Pirone A., Bragatto T., Bragatto P., (2022) Accident triggered by electrical failures in Seveso sites. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, vol. 91, 2022, ISBN 978-88-95608-89-1; ISSN 2283-9216
[10] Ansaldi S.M., Agnello P., Pirone A., Vallerotonda M.R., 2021, Near Miss Archive: A Challenge to share knowledge among inspectors and improve Seveso Inspections, Sustainability 2021, 13, 8456. https://doi.org/10.3390/su13158456

L’esperienza operativa nelle ispezioni sul Sistema di Gestione della Sicurezza di cui al D.lgs. 105/2015: analisi di un caso studio in ambito GPL

F. Pasquale[1], F. Manuguerra[1], B. Basso[1]

[1]Struttura “Impianti industriali ed energia”, Arpa Piemonte Torino

Sommario
Arpa Piemonte, nell’ambito delle proprie attività di controllo, effettua le ispezioni sul Sistema di Gestione della Sicurezza degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante (SGS-PIR) di cui al d.lgs.105/2015, nell’ambito delle quali sono esaminati gli eventi di esperienza operativa in termini di incidenti, quasi-incidenti e anomalie occorsi.
Il presente lavoro illustra gli approfondimenti svolti su un incidente verificatosi presso uno stabilimento soggetto agli obblighi del sopracitato decreto, ubicato nel territorio piemontese, in cui è avvenuto un rilascio di GPL durante l’installazione di una macchina di confezionamento, che ha comportato l’infortunio di alcuni operatori.
Per l’analisi di tale evento è stata utilizzata la scheda di cui all’Allegato H del d.lgs.105/2015, che consente di individuare le cause di radice, riconducibili a fattori tecnici, organizzativi e gestionali che hanno comportato il verificarsi dell’evento, e di definire le conseguenti azioni correttive, volte a impedire il ripetersi di eventi simili.
Dalle indagini svolte è emerso che i fattori del SGS-PIR risultati carenti corrispondono all’identificazione dei pericoli, al controllo operativo, nonché alla gestione delle modifiche.
L’evento analizzato conferma come l’esperienza operativa rappresenti un elemento centrale all’interno del SGS-PIR, in quanto consente di trasformare eventi nefasti, quali incidenti e quasi incidenti, in una significativa opportunità di apprendimento e di miglioramento continuo.

1. Introduzione

Tra le attività istituzionali ordinarie svolte dall’Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) Piemonte, così come previste dalla l.reg. n. 18 del 26/09/2016, rientrano le attività di controllo e vigilanza in materia di prevenzione degli incidenti rilevanti negli stabilimenti soggetti al d.lgs. 105/2015 “Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose” [1], entrato in vigore il 29/07/2015, abrogando il d.lgs. 334/99 e s.m.i. Tali attività sono finalizzate a verificare l’adeguatezza delle misure di prevenzione e mitigazione dei rischi connessi alla presenza, reale o prevista, di sostanze o miscele pericolose elencate nell’allegato 1 del decreto, in quantitativi superiori ai valori limite in esso stabiliti. In base al superamento di tali soglie, gli stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante (RIR) sono classificati in “soglia inferiore” o “soglia superiore”.

Una delle principali attività di controllo previste dalla “normativa Seveso” per tutti gli stabilimenti RIR, sono le ispezioni sul Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS), ai sensi dell’art.27 del d.lgs.105/2015. Queste sono finalizzate ad accertare la conformità del Sistema ai requisiti e ai contenuti specificati dall’Allegato B del citato decreto, nonché a verificare l’attuazione della politica di prevenzione degli incidenti rilevanti dichiarata dai gestori. Esse prevedono la disamina della documentazione procedurale e tecnica che sostanzia il SGS, con le evidenze della relativa applicazione, nonché la verifica della congruenza tra quanto riportato nella suddetta documentazione e la configurazione dello stabilimento, in termini sia impiantistici che organizzativi/gestionali.
Gli stabilimenti RIR sono censiti nell’inventario nazionale [2] gestito dall’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e consultabile sul sito del Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), sulla base delle informazioni contenute nella Notifica trasmessa dai gestori e sottoscritta nelle forme dell'autocertificazione, ai sensi dell'art.13 del decreto.
A dicembre 2025 in Piemonte risultano presenti 81 stabilimenti RIR (42 di soglia superiore e 36 di soglia inferiore), che appartengono a comparti produttivi e merceologici piuttosto diversificati; in figura 1a è riportata la distribuzione percentuale delle diverse tipologie di attività, tra cui si citano, in ordine decrescente, il comparto della chimica (di base, intermedi, fine/farmaceutica), i depositi di sostanze tossiche/ecotossiche (es. fitofarmaci, vernici, ecc…, comprese le logistiche), i depositi di GPL e di oli minerali e altre attività presenti in percentuali pari o inferiori al 7%.
Per quanto riguarda i depositi di GPL, nel territorio piemontese sono presenti 15 stabilimenti RIR che detengono GPL in quantità superiore alla soglia di 50 tonnellate, stabilita nella colonna 2 dell’allegato 1 del d.lgs. 105/2015, di cui 8 classificati in soglia inferiore e 7 in soglia superiore, in quanto detengono più delle 200 tonnellate stabilite nella colonna 3 del suddetto allegato. Tali depositi sono concentrati principalmente nella Città Metropolitana di Torino, seguita dalla provincia di Novara, come mostrato nella figura 1b.
Lo stabilimento oggetto del presente studio (di seguito Azienda RIR) è un deposito di GPL, soggetto agli obblighi del sopracitato decreto, in cui è avvenuto un rilascio di GPL, che è stato approfondito nel corso dell’ispezione sul SGS, con l’obiettivo di comprendere le cause radice dell’incidente e trasformarle in opportunità di miglioramento.

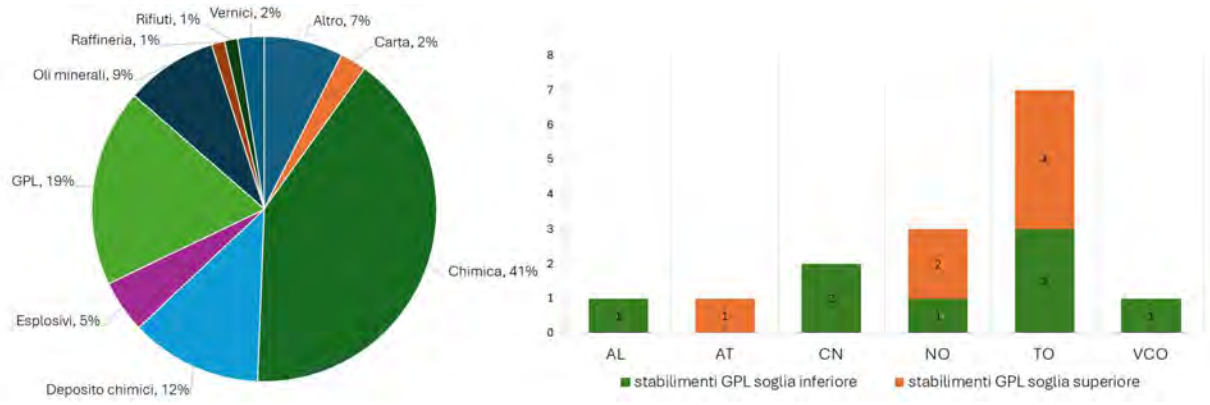


Figura 1: a) Distribuzione delle tipologie di attività degli stabilimenti RIR del Piemonte
b) Distribuzione provinciale dei depositi di GPL soggetti al d.lgs. 105/2015 in Piemonte

Gli strumenti utilizzati a tale scopo sono quelli proposti dal d.lgs. 105/2015, in particolare nell'allegato H "Criteri per la pianificazione, la programmazione e lo svolgimento delle ispezioni", che comprendono la lista di riscontro per la verifica degli elementi del SGS (tra cui si citano la formazione, informazione ed addestramento, l'identificazione dei pericoli, il controllo operativo, la gestione delle modifiche la gestione dell'emergenza) e la scheda di analisi dell'esperienza operativa.

2. Descrizione dell'evento

L'evento è avvenuto durante una fase di collaudo a valle dell'installazione di una nuova macchina riempitrice di bombole di GPL; l'azienda, infatti, oltre allo stoccaggio in serbatoi ed il relativo travaso autobotti, svolge anche tale tipologia di attività.
Il processo operativo prevede che le bombole vuote vengano caricate manualmente da un operatore su un nastro trasportatore, il quale le convoglia verso l'area di riempimento ubicata all'esterno del capannone. Una volta completata la fase di riempimento, le bombole vengono riportate all'interno del capannone tramite lo stesso sistema di trasporto, dove sono sottoposte a test di tenuta e qualità per poi essere imballate e preparate alla distribuzione ai clienti.
Durante il collaudo della nuova macchina riempitrice, si verificava la fuoriuscita di un getto di GPL liquido da una tubazione non collegata al circuito dosatore, a causa di una valvola lasciata accidentalmente aperta (figura 2); un operatore ha provveduto tempestivamente a chiudere tale valvola ma nel frattempo il getto di GPL ha avvolto la macchina, ricevendo un innesco dando così origine ad un Flash Fire. L'area in cui si è verificato l'incidente era sottoposta a sorveglianza video per cui è stato possibile ricostruire la dinamica dell'evento, e in particolare la fonte dell'innesco che sembrerebbe provenire dalla parte inferiore della nuova riempitrice.

Ne conseguiva una fiammata che investiva i lavoratori presenti nell'area (sia dipendenti dell'Azienda RIR sia della ditta terza installatrice, nonché produttrice della macchina), che sono stati ricoverati all'ospedale, e dopo un periodo di convalescenza hanno tutti potuto riprendere l'attività lavorativa.

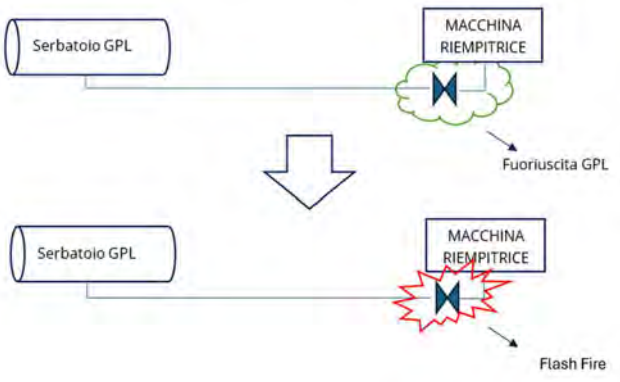


Figura 2: Sequenza dell'evento

3. Analisi del caso studio e ricadute sul SGS

Durante l'ispezione sul SGS adottato dall'azienda RIR è stata condotta un'analisi approfondita dell'evento occorso, con le ricadute sugli aspetti gestionali e procedurali previsti dalla lista di riscontro di cui all'Allegato H del D.lgs. 105/2015, con particolare attenzione alle criticità emerse in seguito al citato evento incidentale.

Si è quindi partiti dall'esame della scheda di raccolta e analisi dell'esperienza operativa di stabilimento, di cui all'allegato H del D.lgs. 105/2015, che l'azienda ha compilato preliminarmente all'ispezione SGS, individuando inizialmente alcune cause di carattere tecnico e due fattori gestionali critici riconducibili alle procedure operative di manutenzione e alla formazione degli operatori, che parevano tuttavia non pienamente coerenti con l'analisi dell'evento. Pertanto, in fase di ispezione è stata richiesta all'azienda la ricompilazione della scheda, al fine di approfondire le dinamiche gestionali correlate all'evento; nella scheda fornita sono stati individuati ulteriori fattori gestionali critici, tra cui le modalità di approvvigionamento di beni e servizi e le istruzioni operative per l'avviamento dell'impianto.

Una delle prime criticità emerse è stata la non adeguata analisi dell'esperienza operativa da parte dell'azienda RIR, in quanto non sono state identificate tutte le cause gestionali che hanno portato al verificarsi dell'evento e le conseguenti azioni correttive.

Di seguito si descrivono gli approfondimenti condotti sugli elementi gestionali individuati come critici in relazione all'evento, come rappresentati in figura 3. L'analisi è cominciata dalla gestione delle modifiche, per poi estendersi al controllo operativo, con particolare riferimento all'approvvigionamento di beni e servizi e alla formazione delle ditte appaltatrici.

Successivamente è stata esaminata l'ipotesi incidentale relativa all'evento, valutata nell'Analisi dei Rischi, e concludendo con la disamina della procedura operativa di gestione dell'emergenza pertinente all'evento stesso.

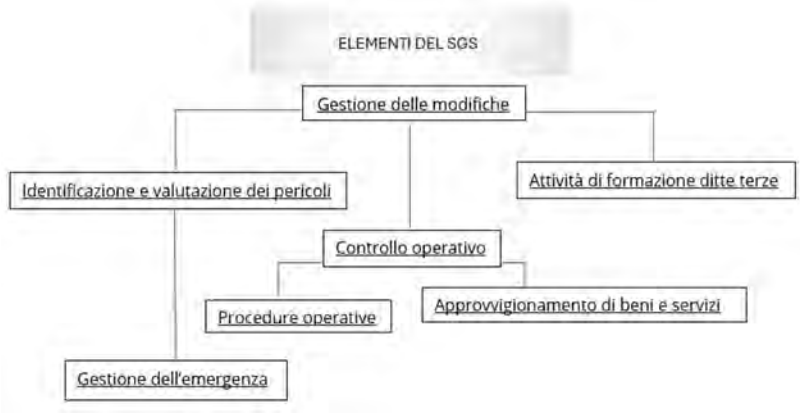


Figura 3: Elementi del SGS coinvolti nell'evento analizzato

Gestione delle modifiche (*Riferimento: punto 5 lista di riscontro, allegato H del d.lgs. 105/2015)*

Nell'ambito del SGS-PIR, il Gestore deve adottare e attuare procedure che assicurino una gestione progettuale adeguata di tutte le tipologie di modifiche previste dalla normativa, siano esse permanenti o temporanee, riguardanti impianti, sistemi, componenti, parametri di processo o assetti organizzativi. L'allegato B del D.lgs. 105/2015 definisce che ogni modifica deve essere programmata e valutata ai fini della sicurezza, in modo da garantire la continuità dei criteri e requisiti di sicurezza fissati, nonché il rispetto di quanto previsto in materia dalla normativa vigente e, in particolare, dall'art. 18 del presente del decreto.

Ogni modifica deve essere sottoposta a specifici processi di approvazione, subordinati all'esito di procedure di controllo degli interventi realizzati e adeguatamente documentate, che includano il riesame della progettazione e delle valutazioni di sicurezza, l'aggiornamento della documentazione tecnica e procedurale e la revisione delle esigenze formative e di addestramento del personale coinvolto; tali attività di riesame della sicurezza devono essere pianificate e correlate in modo sistematico allo sviluppo del progetto della modifica o del nuovo impianto lungo tutte le fasi realizzative, dalla progettazione alla messa in marcia e al collaudo finale.

Proprio alla luce di tali obblighi, quanto emerso nel corso dell'ispezione SGS ha evidenziato che l'azienda aveva classificato correttamente l'introduzione del nuovo macchinario come una modifica permanente di natura impiantistica e l'aveva gestita con uno specifico modulo del SGS-PIR che prevedeva molteplici informazioni tra cui una descrizione sintetica dell'intervento, gli esiti dell'analisi dei rischi, l'elenco della documentazione tecnica e gestionale da produrre o aggiornare, nonché la previsione di attività formative da effettuarsi successivamente all'attuazione della modifica. Tuttavia anche se tale modifica è stata gestita correttamente sotto gli aspetti documentali, al fine di garantire la continuità dei requisiti progettuali e gestionali di sicurezza fissati, in tutte le sue fasi realizzative, dalla progettazione, alla messa in marcia e collaudo finale, la gestione operativa dell'intervento non ha mostrato la medesima efficacia, poiché la fuoriuscita di GPL si è verificata proprio durante la fase

di collaudo, evidenziando una discrepanza tra l'impianto documentale della modifica e il controllo effettivo delle condizioni di sicurezza nella fase finale di messa in servizio.

Procedure operative ed approvvigionamento di beni e servizi (*Riferimento: punto 4.iii e 4.v lista di riscontro allegato H del D.lgs. 105/2015)*

Per tale aspetto è richiesto al Gestore di predisporre, adottare e attuare specifiche procedure per il controllo operativo del processo e di tutte le attività dello stabilimento rilevanti ai fini della sicurezza, definendo altresì i parametri di processo in condizioni normali, anomale e di emergenza.

Al fine di garantire la conformità con le effettive prestazioni degli impianti, tali procedure devono essere costantemente aggiornate in tutte le fasi di vita dell'impianto, dal preavviamento fino allo smantellamento finale.

Tali attività devono essere autorizzate e documentate, anche mediante l'impiego di sistemi di permessi di lavoro.

Nell'ambito del SGS-PIR è inoltre richiesto che l'approvvigionamento di apparecchiature, materiali e servizi, rilevanti per la sicurezza, sia effettuato secondo criteri, procedure e verifiche idonee a garantire la conformità ai requisiti minimi di legge e la coerenza con le valutazioni riportate nell'analisi dei rischi, includendo, ove necessario, l'esecuzione di verifiche di preavviamento.

Durante l'ispezione è stata esaminata la procedura dell'azienda relativa all'approvvigionamento delle imprese appaltatrici di beni e servizi dalla quale è emerso che la qualifica dei fornitori avviene mediante la compilazione di una scheda dedicata, strutturata principalmente come autodichiarazione da parte della ditta terza e incentrata su aspetti inerenti alla qualità e alla sicurezza di cui al D.lgs. 81/2008 e non significativi ai fini della sicurezza PIR.

All'interno della documentazione richiesta alla ditta appaltatrice era inoltre contemplata una procedura preliminare alla consegna del macchinario, che avrebbe dovuto comprendere un insieme di verifiche tecniche finalizzate a certificare la piena rispondenza dell'attrezzatura ai parametri operativi definiti; tra tali attività risultava prevista l'esecuzione di una prova funzionale mediante immissione del gas nel macchinario, al fine di accertare, prima della messa in servizio, l'effettiva integrità delle componenti e il rispetto dei parametri operativi. Tuttavia, tale attività non è stata adeguatamente verificata dall'azienda, in particolare dall'analisi della documentazione dell'evento occorso oggetto del presente studio è emerso un aspetto tecnico inerente all'analisi e identificazione degli elementi critici relativo al rischio ATEX legato alla macchina riempitrice. Tale criticità si è rivelata determinante nel creare condizioni favorevoli all'innesco dell'evento, evidenziando la necessità di rafforzare le valutazioni sul rischio ATEX ed i controlli nelle fasi di approvazione e collaudo delle modifiche impiantistiche.

Attività di formazione ditte terze (*Riferimento: punto 2.iii lista di riscontro allegato H del D.lgs. 105/2015*)
Per i lavoratori dipendenti di ditte terze, inclusi quelli delle ditte subappaltatrici, gli obblighi relativi alla formazione e all'addestramento sono a carico dei rispettivi datori di lavoro, mantenendo il coordinamento tra gestore/committente e appaltatore, così come l'obbligo del gestore di verificare che tali attività siano state effettivamente svolte. In tale ambito il gestore deve quindi acquisire la documentazione attestante le modalità con cui il datore di lavoro dell'impresa appaltatrice assicura la formazione e l'addestramento del personale impiegato. Inoltre, il gestore deve definire procedure interne che consentano di valutare l'adeguatezza della documentazione trasmessa e l'efficacia delle attività formative svolte, anche attraverso l'esame della documentazione fornita dall'appaltatore.
In questo ambito, il processo formativo adottato dall'Azienda RIR prevede la condivisione con il fornitore del materiale didattico contenente le principali tematiche relative al D.lgs. 105/2015, corredato da test di apprendimento finalizzati a verificarne l'efficacia e a valutare la comprensione dei contenuti da parte del personale esterno.

Identificazione e valutazione dei pericoli (*Riferimento: punto 3.ii lista di riscontro allegato H del D.lgs. 105/2015*)
Il sistema di gestione della sicurezza deve prevedere procedure che consentano l'identificazione dei pericoli e la valutazione dei rischi di incidente rilevante connessi allo svolgimento dell'attività, sia in condizioni operative normali sia in situazioni anomale incluse anche le attività affidate in subappalto e garantendo l'adozione e l'applicazione delle misure mitigative del rischio. Tali attività devono essere aggiornate periodicamente, in occasione delle modifiche e ogniqualvolta emergano nuove conoscenze tecniche in materia di sicurezza, derivanti dall'esperienza operativa o dall'analisi di incidenti, quasi incidenti o anomalie.
Per gli stabilimenti di soglia superiore l'analisi dei rischi di incidenti rilevanti è contenuta nel Rapporto di Sicurezza, redatto ai sensi dell'articolo 15 del D.Lgs105/2015 e oggetto di specifica Istruttoria, mentre per gli stabilimenti di soglia inferiore gli approfondimenti sull'analisi dei rischi sono condotti nell'ambito dell'ispezione SGS e ne costituiscono un elemento fondamentale.
Nel corso dell'ispezione è stata esaminata, a campione, l'ipotesi incidentale relativa al rilascio di GPL in fase liquida derivante dalla rottura della tubazione di trasferimento ubicata nell'area di imbottigliamento, per cui non erano state valutate dall'azienda nello specifico le conseguenze poiché ricomprese nello scenario più generale riferito all'intera linea di trasferimento.
L'analisi dell'evento ha evidenziato alcune criticità nell'individuazione da parte dell'azienda delle misure di prevenzione e protezione; in particolare erano stati utilizzati verbi al futuro, suggerendo che determinati sistemi, tra cui i rilevatori di gas destinati all'area di imbottigliamento, fossero ancora oggetto di implementazione. Veniva altresì indicata la presenza di un gruppo elettrogeno, destinato a garantire

l'alimentazione dei sistemi automatici di intercettazione collegati ai suddetti dispositivi di rilevazione, sebbene tale apparecchiatura sia risultata assente all'interno dello stabilimento al momento dell'ispezione.
È stato infine esaminato lo schema di flusso del GPL, nel quale risultano identificati numericamente, le valvole, i trasmettitori e gli indicatori di temperatura, pressione e livello, mentre non sono rappresentate le relative logiche di sicurezza (allarme e blocco).

Gestione dell'emergenza (*Riferimento: punto 6.i lista di riscontro allegato H del D.lgs. 105/2015*)
La normativa RIR prevede la predisposizione di procedure per la gestione delle emergenze interne agli stabilimenti (cosiddetto Piano di Emergenza Interna - PEI), ed emergenze esterne in capo alle Prefetture (Piano di Emergenza Esterna). Per quanto riguarda il PEI, la lista di riscontro di cui all'allegato H del d.lgs.105/2015 ne riporta i contenuti minimi che prevedono, in particolare, la gestione degli scenari incidentali ipotizzati nell'analisi dei rischi in termini di azioni di emergenza da intraprendere, procedure e mezzi di allerta, allarme, evacuazione e cessato allarme, ed effetti acuti sugli addetti che svolgono a qualunque titolo attività nello stabilimento, nonché danni ambientali ed all'esterno dello stabilimento.
Le procedure operative di emergenza incluse nel PEI devono riportare in modo dettagliato le misure e i dispositivi destinati alla limitazione delle conseguenze dell'incidente, le dotazioni di equipaggiamento di protezione individuale, le apparecchiature di sicurezza disponibili, le risorse operative e i sistemi di allarme, definendo contestualmente il personale incaricato dell'attuazione delle misure e precisandone ruoli e responsabilità lungo tutte le fasi gestionali, dalla segnalazione all'intervento, dall'evacuazione alle attività di ripristino.
A tal proposito si è presa visione dell'istruzione operativa riportata nel PEI relativamente al rilascio da tubazione nell'area di imbottigliamento che tuttavia non identifica univocamente le figure chiave per l'emergenza nonché il dettaglio dei loro compiti; inoltre riporta informazioni generiche sui DPI da utilizzare e sulle operazioni da svolgere per intercettare la perdita.

4. Conclusioni

L'analisi condotta sull'evento occorso presso l'Azienda RIR ha evidenziato come l'efficacia di un Sistema di Gestione della Sicurezza per la prevenzione degli incidenti Rilevanti (SGS-PIR) non dipenda soltanto dalla sua struttura documentale, ma sia il risultato dell'interazione tra aspetti organizzativi, gestionali e procedurali che, nel caso in esame, hanno inciso sull'effettiva capacità del Sistema di prevenire l'evento.
In particolare, l'incidente, verificatosi durante le attività di collaudo di un nuovo macchinario, ha messo in evidenza una non adeguata valorizzazione dell'esperienza operativa da parte del Gestore, che non ha consentito di individuare in maniera completa, coerente e sistematica le cause di radice sottese all'evento.

Infatti, l'impiego degli strumenti previsti dal d.lgs. 105/2015, in particolare dall'allegato H (lista di riscontro e scheda di analisi e raccolta dell'esperienza operativa), risulta fondamentale per individuare le carenze gestionali del SGS che hanno contribuito al verificarsi dell'evento.
Nello specifico, la ricompilazione della scheda di analisi di esperienza operativa effettuata nel corso dell'ispezione ha permesso di far emergere ulteriori criticità gestionali, inizialmente non considerate dal Gestore nell'analisi dell'evento occorso, evidenziando la necessità di adottare un approccio maggiormente strutturato e integrato nel SGS dell'analisi degli eventi incidentali occorsi in stabilimento.
Le carenze gestionali emerse dal caso studio hanno riguardato, in particolare, la gestione delle modifiche, l'approvvigionamento di beni e servizi e la relativa qualificazione delle ditte terze, l'identificazione e la valutazione dei pericoli, nonché la gestione dell'emergenza.
Nel complesso, il caso analizzato conferma come la prevenzione degli incidenti rilevanti richieda un SGS non solo conforme dal punto di vista formale ai requisiti normativi, ma effettivamente attuato e integrato nei processi aziendali.
Si conferma come l'individuazione completa delle cause di radice, sia nella documentazione di investigazione prodotta a seguito dell'evento incidentale sia nell'integrazione della scheda di esperienza operativa, rappresenti un elemento fondamentale per prevenire il ripetersi di eventi simili e per migliorare l'efficacia complessiva del Sistema.

Bibliografia

[1] Italia (2015). Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105. *Gazzetta Ufficiale*, n. 161, 14 luglio. Disponibile su: https://www.gazzettaufficiale.it (Accesso: 15/12/2025).
[2] Inventario degli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. Disponibile su: https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it (Accesso: 12/2025).

Elementi di integrazione tra cyber Security e Safety per la gestione del rischio negli stabilimenti Seveso

V.Colucci[1], R. Marrazzo[2], A. Sibilano[3], M. C. Tarantini[4]

[1]Inail – Dit (ex Ispra)
[2]ISPRA - Sezione Analisi Integrata dei Rischi Industriali (VAL-RTEC-IND). Roma
[3]Inail – UOT di Taranto.
[4]Ministero dell'Interno, Corpo nazionale dei vigili del fuoco di Brindisi

Sommario
La progressiva convergenza tra sistemi di controllo industriale e tecnologie digitali emergenti, inquadrata nel paradigma Industria 4.0, ha migliorato efficienza e affidabilità dei processi produttivi, introducendo tuttavia nuove vulnerabilità cibernetiche. Queste assumono rilevanza critica negli stabilimenti soggetti al D.Lgs. 105/2015 (Seveso III), nei quali un rilascio accidentale di sostanze pericolose può comportare gravi conseguenze per lavoratori, popolazione e ambiente. In tale contesto, la cybersicurezza industriale si configura come elemento imprescindibile della prevenzione integrata, da intendersi non solo quale protezione delle infrastrutture ICT, ma anche come fattore abilitante della resilienza dei sistemi cyber-fisici (CPS) e delle architetture di sicurezza di processo. L'analisi proposta si concentra sui requisiti di sicurezza derivanti dall'adozione di sensoristica distribuita, sistemi di localizzazione ibridi e piattaforme IoT (LoRaWAN, NB-IoT), evidenziando metodologie e strategie per garantire integrità, disponibilità e riservatezza dei dati in ambienti critici. Un approccio sinergico tra cybersicurezza e safety consente di mitigare i rischi connessi sia ad attacchi informatici con effetti fisici sugli impianti, sia a condizioni operative non previste. In questa prospettiva, l'integrazione di soluzioni predittive basate su analisi dati e rilevamento dinamico delle anomalie rappresenta una strategia innovativa per il rafforzamento delle misure preventive e la gestione integrata del rischio negli stabilimenti Seveso. Infine, l'attuazione del SGS-PIR in tali stabilimenti a partire dagli obblighi normativi, offre un quadro di riferimento adeguato a sviluppare la sinergia tra safety e security, aggiornando procedure e istruzioni operative alle nuove esigenze di protezione e considerando il ruolo centrale del personale operativo quale anello critico dell'interazione uomo-macchina.

1. Introduzione

La prevenzione degli incidenti rilevanti negli stabilimenti industriali che trattano sostanze pericolose rappresenta da decenni una priorità strategica per le politiche di sicurezza industriale a livello europeo. La Direttiva 2012/18/UE (Seveso III), recepita in Italia con il D.Lgs. 105/2015, ha consolidato un approccio sistemico alla gestione del rischio, fondato sull'adozione di un Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti (SGS-PIR), finalizzato a garantire un controllo

strutturato e continuo dei pericoli associati alle attività industriali. Tale approccio si basa sulla valutazione del rischio intrinseco connesso alla presenza e alla quantità di sostanze pericolose, nonché sull'adozione di misure tecniche, organizzative e procedurali adeguate a prevenirne il rilascio incontrollato o, eventualmente, a mitigarne le conseguenze. Tradizionalmente, tale approccio si è concentrato prevalentemente sui rischi di natura accidentale, riconducibili a guasti tecnici, errori umani o condizioni operative anomale. In questo contesto, la recente letteratura ha evidenziato come il solo inquadramento normativo Seveso non sia sempre sufficiente a rappresentare in modo esaustivo il potenziale di accadimento di incidente rilevante, soprattutto per impianti non soggetti alla direttiva Seveso. In particolare, è stato proposto un approccio basato su criteri di pericolosità e quantità delle sostanze pericolose, in grado di stimare il Major Accident Potential (MAPP – da non confondere, ovviamente, con l'acronimo utilizzato dalla direttiva Seveso per indicare il Documento PPIR) indipendentemente dalla classificazione dello stabilimento, mettendo in luce come anche impianti non soggetti alla direttiva possano presentare scenari incidentali con conseguenze comparabili a quelli Seveso [1]. Questo tipo di analisi rafforza la necessità di una visione estesa e integrata del rischio, capace di considerare non solo il rispetto formale delle soglie normative, ma anche l'effettiva vulnerabilità dei sistemi industriali. Negli ultimi anni, tuttavia, la profonda trasformazione digitale dei processi industriali, inquadrabile nel paradigma Industria 4.0, ha modificato in modo sostanziale il profilo di rischio degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante. La crescente integrazione tra Information Technology (IT) e Operational Technology (OT), l'adozione diffusa di sistemi di controllo industriale interconnessi, di sensoristica distribuita e di piattaforme IoT industriali, hanno aumentato l'efficienza e l'affidabilità dei processi, ma hanno al contempo introdotto nuove vulnerabilità di natura cibernetica (**Figura 1**). Tali vulnerabilità assumono una rilevanza particolarmente critica nei contesti Seveso, nei quali un attacco informatico o una compromissione dei sistemi digitali può tradursi in effetti fisici sugli impianti, compromettendo le funzioni di sicurezza e innescando scenari incidentali con conseguenze rilevanti per la salute umana e l'ambiente.

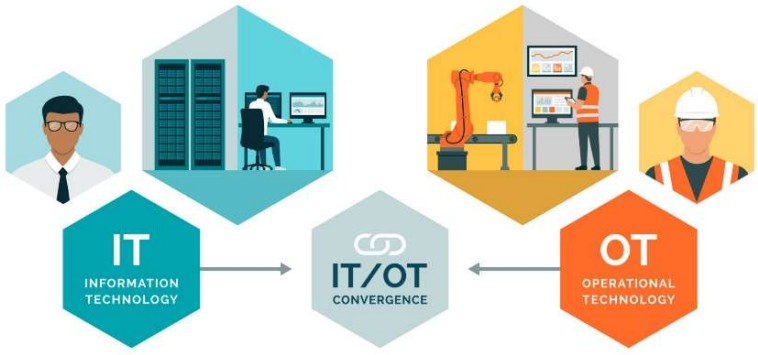


Figura 1. Convergenza IT/OT e impatto sulle barriere di sicurezza (*immagine generata tramite intelligenza artificiale*)

In tale prospettiva, la cybersecurity industriale assume un ruolo sempre più centrale all'interno del sistema di prevenzione degli incidenti rilevanti. Essa non può essere considerata un ambito separato o esclusivamente riconducibile alla protezione delle infrastrutture informatiche, ma deve essere integrata nel SGS-PIR come elemento strutturale della gestione del rischio. Studi ed esperienze recenti evidenziano come le ispezioni Seveso stiano progressivamente includendo la verifica delle misure di cybersecurity industriale, in particolare per quanto riguarda i sistemi di controllo (ICS, SCADA, PLC), le funzioni strumentate di sicurezza (SIS) e le competenze del personale, riconoscendo che una debolezza in tali ambiti può compromettere direttamente l'efficacia delle barriere di prevenzione e protezione [2]. In questo scenario, emerge con chiarezza come la cybersecurity industriale non possa più essere considerata un ambito separato o esclusivamente riconducibile alla protezione delle infrastrutture informatiche. Al contrario, essa si configura come un elemento strutturale della prevenzione integrata, strettamente interconnesso con la safety di processo e con la funzionalità delle barriere di sicurezza [3]. Numerosi studi evidenziano come una debolezza nei livelli di sicurezza informatica possa compromettere la disponibilità e l'integrità dei segnali di campo, dei sistemi di supervisione e delle funzioni strumentate di sicurezza, riducendo l'efficacia complessiva del sistema di prevenzione e aumentando il rischio di eventi incidentali complessi [4]. Parallelamente, la letteratura internazionale più recente sottolinea la necessità di superare la tradizionale separazione tra safety e security, proponendo modelli di gestione del rischio integrati e orientati alla resilienza. In tali modelli, la sicurezza fisica, la sicurezza informatica e la sicurezza di processo vengono considerate come dimensioni interdipendenti di un unico sistema sociotecnico, nel quale le barriere preventive e protettive devono essere progettate, monitorate e adattate in modo dinamico [5]. Questo approccio risulta particolarmente rilevante negli stabilimenti Seveso, caratterizzati da elevata complessità impiantistica e organizzativa, nonché da una forte dipendenza dalle prestazioni del fattore umano. Alla luce di queste considerazioni, l'integrazione tra cybersecurity e safety rappresenta oggi una sfida centrale per l'evoluzione dei sistemi di gestione della sicurezza negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante. L'aggiornamento del SGS-PIR, delle procedure operative e delle modalità di controllo deve tenere conto non solo dei nuovi scenari di rischio cyber, ma anche del ruolo chiave degli operatori e delle interfacce uomo-macchina, riconosciuti dalla normativa Seveso come elementi essenziali per la prevenzione degli incidenti [6].

Il presente lavoro si inserisce in questo contesto, proponendo una riflessione sugli elementi di integrazione tra cybersecurity industriale e safety di processo nella gestione del rischio negli stabilimenti Seveso, con l'obiettivo di contribuire allo sviluppo di un approccio coerente, sistemico e orientato alla resilienza, in grado di rispondere alle nuove sfide poste dalla digitalizzazione degli impianti industriali.

2. Stato dell'arte e quadro normativo

La transizione verso il paradigma Industria 4.0 ha determinato una profonda trasformazione dell'industria chimica e di processo, tradizionalmente caratterizzata da impianti continui, complessi e ad elevato potenziale di rischio. L'introduzione dei sistemi cyber-fisici (Cyber-Physical Systems, CPS), basati sull'integrazione tra componenti fisiche di processo, sistemi di controllo industriale e piattaforme digitali, ha migliorato il monitoraggio in tempo reale, l'efficienza operativa e le capacità predittive. Tuttavia, la letteratura evidenzia come tale integrazione abbia modificato il profilo di rischio degli impianti, introducendo nuove interdipendenze tra safety, security e affidabilità dei sistemi automatizzati [3, 7]. Uno degli elementi chiave dell'Industria 4.0 è la convergenza tra Information Technology (IT) e Operational Technology (OT), che consente la condivisione estesa dei dati di processo, ma, al contempo, espone i sistemi di controllo industriale a vulnerabilità informatiche. Studi recenti mostrano come attacchi o malfunzionamenti digitali possano compromettere PLC, SCADA e funzioni strumentate di sicurezza, trasformando eventi di natura cyber in scenari di rischio fisico sugli impianti [8]. In tale contesto, la cybersecurity industriale assume un ruolo centrale quale prerequisito per garantire la sicurezza funzionale e la continuità operativa dei CPS. Dal punto di vista normativo, la direttiva Seveso III richiede l'identificazione e il controllo di tutti i fattori che influenzano il rischio di incidente rilevante, inclusi quelli tecnologici e organizzativi. In questo quadro, la digitalizzazione degli impianti e l'adozione di CPS rientrano pienamente nel perimetro del SGS-PIR. Recenti contributi evidenziano come le ispezioni Seveso stiano progressivamente includendo la valutazione delle misure di cybersecurity industriale, riconoscendo il loro impatto diretto sull'efficacia complessiva del sistema di gestione della sicurezza [2]. Inoltre, approcci basati sul MAPP mostrano come anche impianti non formalmente soggetti alla normativa Seveso possano presentare scenari incidentali significativi, rafforzando la necessità di un'integrazione strutturata tra digitalizzazione, safety e security nell'industria di processo.

3. Minacce cibernetiche negli impianti di processo

A differenza dei sistemi IT tradizionali, gli ICS sono progettati per garantire continuità operativa, stabilità del processo e sicurezza funzionale; pertanto, un attacco informatico può generare conseguenze che vanno ben oltre la perdita di dati, producendo effetti fisici diretti sugli impianti, sulle persone e sull'ambiente. Gli attacchi informatici ai sistemi di controllo industriale possono assumere diverse forme, spesso combinate tra loro:

- Manomissione dei dati di sensori e attuatori, mediante spoofing o alterazione dei segnali di campo, con conseguente falsificazione delle condizioni operative reali. Tali attacchi possono indurre il sistema di controllo o gli operatori ad assumere decisioni errate, ritardando l'attivazione delle funzioni di sicurezza o generando condizioni di esercizio pericolose.

- Attacchi ransomware ai sistemi SCADA e HMI, che possono bloccare la supervisione del processo, impedire il controllo remoto degli impianti o rendere indisponibili archivi storici e sistemi di allarme. In contesti di processo continuo, anche un'interruzione temporanea del controllo può comportare situazioni di instabilità e rischio di incidente rilevante.
- Compromissioni della supply chain digitale, in particolare attraverso firmware, software di manutenzione o dispositivi IoT industriali non adeguatamente protetti. L'introduzione di componenti compromessi può consentire accessi persistenti ai sistemi OT, difficili da rilevare con i tradizionali strumenti di sicurezza.

Queste tipologie di attacco risultano particolarmente critiche negli stabilimenti Seveso, nei quali la perdita di controllo del processo può tradursi in rilasci di sostanze pericolose, incendi o esplosioni. Un caso emblematico di attacco cyber-to-physical è rappresentato da Stuxnet 2010 [9], che ha dimostrato per la prima volta come un malware progettato specificamente per sistemi ICS potesse manipolare PLC industriali, alterare i segnali di ritorno agli operatori e provocare il danneggiamento fisico di apparecchiature di processo. Questo episodio ha evidenziato come la separazione concettuale tra sicurezza informatica e sicurezza di processo non sia più sostenibile nei sistemi industriali complessi [8]. Successivamente, vi sono stati numerosi eventi nei quali attacchi informatici, anche non intenzionalmente mirati alla safety, hanno causato arresti di impianto, perdite di produzione e situazioni di potenziale rischio, soprattutto in presenza di reti IT/OT non adeguatamente segregate. Nel contesto italiano, studi recenti condotti nell'ambito delle ispezioni Seveso hanno evidenziato come la cybersecurity industriale rappresenti un fattore sempre più rilevante nella valutazione dell'efficacia del SGS-PIR. In particolare, l'analisi delle attività ispettive mostra come vulnerabilità nei sistemi di controllo, nella gestione degli accessi e nella formazione del personale possano costituire elementi di criticità per la prevenzione degli incidenti rilevanti [2]. Casi studio analizzati in ambito di Rapporto di Sicurezza (RdS) e SGS-PIR, come quelli relativi a grandi complessi petrolchimici e chimici (ad es. stabilimenti con processi continui e utilizzo estensivo di PLC e SCADA), hanno messo in luce criticità ricorrenti quali l'utilizzo di dispositivi legacy non aggiornabili, accessi remoti per manutenzione non adeguatamente controllati ed insufficiente integrazione tra procedure di sicurezza informatica e procedure di gestione delle emergenze. In tali contesti industriali complessi, caratterizzati da impianti ad elevata integrazione tecnologica, l'analisi del rischio ha progressivamente incluso scenari nei quali eventi cibernetici possono fungere da fattori abilitanti di incidenti di processo. In tali casi, la cybersecurity viene considerata non solo come requisito IT, ma come misura di prevenzione tecnica e organizzativa, da integrare nel SGS-PIR attraverso procedure, audit interni, formazione del personale e verifica periodica delle architetture di controllo. Le evidenze disponibili indicano che le minacce cibernetiche devono essere considerate a tutti gli effetti tra i fattori di rischio rilevanti per gli impianti di processo. L'integrazione strutturata della cybersecurity nel SGS-PIR consente di migliorare la

resilienza dei sistemi di controllo, di ridurre la probabilità che un evento informatico si traduca in un incidente di processo, di rafforzare la coerenza tra analisi del rischio, progettazione delle barriere e gestione operativa. In questo senso, gli attacchi informatici non rappresentano un rischio "aggiuntivo", ma un nuovo vettore di innesco di scenari incidentali già noti, che deve essere affrontato con strumenti coerenti con la filosofia Seveso e con i principi di prevenzione integrata. Nel contesto degli stabilimenti soggetti alla direttiva Seveso, il RdS rappresenta lo strumento fondamentale per l'identificazione, l'analisi e la valutazione degli scenari di incidente rilevante. Tradizionalmente, tali scenari vengono costruiti considerando guasti tecnici, errori umani e condizioni operative anomale. Tuttavia, la crescente digitalizzazione degli impianti e l'integrazione dei sistemi di controllo rendono necessario estendere l'analisi includendo le minacce cibernetiche come potenziali eventi iniziatori o fattori aggravanti degli scenari incidentali. Le minacce cyber non generano, solitamente, nuovi scenari "fisici", ma possono abilitare, anticipare o amplificare scenari già contemplati nel RdS, agendo sulle variabili di processo, sui sistemi di protezione e sulle barriere di sicurezza. In tale ottica, il mapping tra cyber threat e scenari incidentali (**Tabella 1**) – i principali sono sintetizzati nel seguito, consente di rafforzare la coerenza tra analisi del rischio, progettazione delle barriere e misure di prevenzione previste dal SGS-PIR (**Figura 2**).

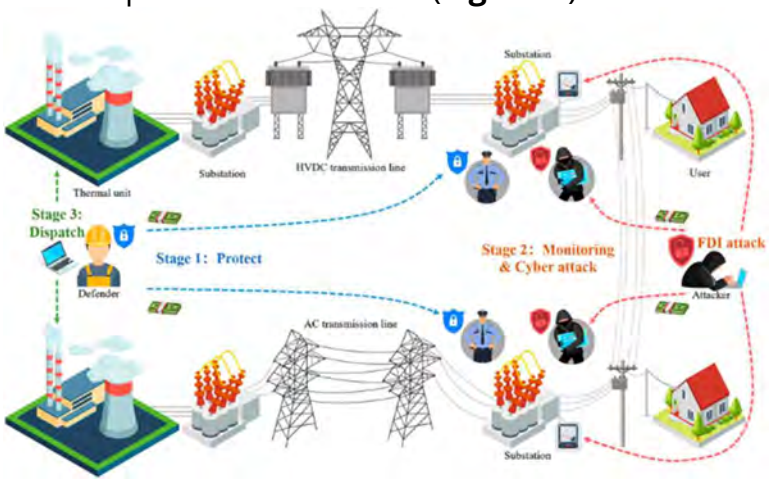


Figura 2. Attacco cyber che impatta sulla manipolazione del segnale, generando un errore di controllo, che induce ad uno scenario incidentale Seveso (*immagine generata tramite intelligenza artificiale*)

Perdita di contenimento (Loss of Containment – LOC). La perdita di contenimento rappresenta uno degli scenari più frequenti nei RdS di impianti chimici e petrolchimici. Le minacce cibernetiche possono contribuire a tale scenario attraverso: la manipolazione dei segnali di pressione, livello o temperatura, che impedisce l'individuazione tempestiva di condizioni anomale; la disattivazione o ritardo nell'attivazione di sistemi di allarme e interlock; l'alterazione delle logiche di controllo, che regolano valvole di sicurezza o sistemi di isolamento. In un impianto complesso, un attacco informatico che mascheri un sovraccarico di pressione può condurre al cedimento di una linea o di un recipiente, con conseguente rilascio di sostanze

pericolose. Tali dinamiche risultano pienamente compatibili con gli scenari LOC già analizzati nel RdS, ma con un evento iniziatore di natura cyber anziché meccanica.
Runaway reaction. Negli impianti chimici caratterizzati da reazioni esotermiche, il controllo accurato delle condizioni operative è essenziale per prevenire fenomeni di runaway reaction. Le minacce cyber possono interferire con tali meccanismi attraverso:

- alterazione dei set-point di temperatura o portata;
- indisponibilità dei sistemi di raffreddamento automatici;
- compromissione dei segnali di feedback utilizzati dai sistemi di controllo e sicurezza.

Un'azione intenzionale o accidentale sui sistemi di automazione può quindi condurre a un rapido aumento incontrollato della temperatura e della pressione, con potenziali conseguenze quali rilascio di sostanze, incendio o esplosione. In questo caso, la minaccia cibernetica agisce come fattore scatenante di uno scenario di runaway già contemplato nel RdS, ma con una dinamica di sviluppo più rapida e meno prevedibile rispetto ai guasti tradizionali.
BLEVE e scenari energetici. Gli scenari di BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) sono tipicamente associati a serbatoi contenenti liquidi infiammabili o gas liquefatti. Sebbene il BLEVE sia un fenomeno fisico, le minacce cyber possono influenzarne la probabilità attraverso:

- indisponibilità dei sistemi di monitoraggio dello stato dei serbatoi;
- mancata attivazione dei sistemi di raffreddamento o depressurizzazione;
- compromissione delle comunicazioni tra sensori, sistemi di controllo e operatori.

In presenza di un incendio esterno o di condizioni operative critiche, la perdita di controllo dovuta a un evento cibernetico può ridurre drasticamente il tempo disponibile per l'intervento, aumentando la probabilità di evoluzione verso scenari catastrofici.

Minaccia cibernetica	Sistema / funzione coinvolta	Variabile di processo o funzione critica	Scenario di incidente rilevante (RdS)
Spoofing o alterazione dei segnali di sensori	Sensori di campo, PLC	Pressione, livello, temperatura	Perdita di contenimento (LOC)
Manipolazione dei set-point	PLC, sistemi di controllo di processo	Portata, temperatura di reazione	Runaway reaction
Ransomware o indisponibilità SCADA/HMI	SCADA, HMI	Supervisione e gestione allarmi	LOC, escalation incidentale
Compromissione delle logiche di controllo	PLC, SIS	Interlock, arresto di emergenza	LOC, BLEVE
Accesso remoto non autorizzato	Reti OT, sistemi di manutenzione	Comandi di controllo	Runaway reaction

Perdita di comunicazione tra sistemi	Reti industriali	Tempestività dell'intervento	BLEVE, scenari energetici
Compromissione di dispositivi IoT industriali	Sensori distribuiti, gateway	Monitoraggio ambientale/processo	LOC, ritardo nella rilevazione

Tabella 1**.** Mapping tra minacce cibernetiche e scenari di incidente rilevante

4. Integrazione nel SGS-PIR e implicazioni operative

L'integrazione sistematica del mapping tra minacce cibernetiche e scenari incidentali all'interno del SGS-PIR (**Tabella 2**) rappresenta un'evoluzione necessaria dei modelli tradizionali di gestione del rischio negli impianti di processo digitalizzati. Tale integrazione consente, in primo luogo, di identificare in modo strutturato le funzioni di sicurezza maggiormente esposte a vulnerabilità digitali, includendo non solo le funzioni strumentate di sicurezza (SIF), ma anche i sistemi di supervisione, le interfacce uomo-macchina e le catene decisionali basate su dati digitali.

Elemento del SGS-PIR	**Approccio safety tradizionale**	**Integrazione cybersecurity**
Analisi dei pericoli	Guasti tecnici ed errori umani	Inclusione delle minacce cyber come eventi iniziatori o fattori aggravanti
Rapporto di Sicurezza (RdS)	Scenari fisici di incidente	Mapping tra vulnerabilità digitali e scenari incidentali
Procedure operative	Gestione anomalie di processo	Gestione di anomalie digitali e indisponibilità dei sistemi
Funzioni strumentate di sicurezza (SIF)	Affidabilità hardware e software	Valutazione della robustezza rispetto a compromissioni cyber
Gestione degli accessi	Controllo fisico	Controllo logico e segregazione IT/OT
Formazione del personale	Errori operativi	Consapevolezza cyber e interazione uomo–macchina
Audit e verifiche interne	Conformità tecnica e procedurale	Verifica integrata safety–security
Gestione delle emergenze	Eventi di processo	Scenari con perdita o degradazione dei sistemi digitali

Tabella 2. Integrazione della cybersecurity nel Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS-PIR)

In secondo luogo, il mapping permette di valutare la robustezza delle barriere tecniche e organizzative in condizioni degradate o di indisponibilità parziale dei sistemi digitali. In questo senso, la cybersecurity viene considerata come un fattore che può influenzare l'efficacia delle barriere di prevenzione e mitigazione già identificate nel RdS, consentendo di verificare se tali barriere mantengano un adeguato livello di protezione anche in presenza di eventi cibernetici. Questo approccio risulta particolarmente rilevante per gli impianti caratterizzati da un'elevata automazione e da una forte dipendenza dai sistemi di controllo distribuiti. Un ulteriore elemento di rilievo è la possibilità di integrare formalmente la

cybersecurity tra le misure di prevenzione e protezione previste dal SGS-PIR, superando la tradizionale separazione tra ambiti IT e safety di processo. Ciò si traduce nell'aggiornamento delle procedure operative, dei piani di manutenzione, delle attività formative e dei sistemi di audit interni, in modo coerente con gli scenari di rischio cyber-fisico individuati nel RdS. Le esperienze maturate in grandi complessi industriali italiani, analizzati nell'ambito delle ispezioni Seveso, evidenziano come l'inclusione esplicita delle minacce cibernetiche nel RdS favorisca una visione più realistica e completa del rischio, migliorando la coerenza tra analisi dei pericoli, progettazione delle misure di sicurezza e gestione operativa degli impianti. In particolare, tali esperienze mostrano come la considerazione delle vulnerabilità digitali consenta di individuare criticità latenti nei sistemi di controllo e nelle organizzazioni, che potrebbero non emergere attraverso le sole analisi di tipo tradizionale. Dal punto di vista dei risultati attesi, l'integrazione del mapping cyber–RdS nel SGS-PIR consente di a) aumentare la completezza e la tracciabilità dell'analisi del rischio di incidente rilevante; b) rafforzare l'efficacia delle barriere di sicurezza, includendo la cybersecurity tra i fattori determinanti della prevenzione; c) migliorare l'allineamento tra RdS, procedure operative e gestione delle emergenze; d) supportare il gestore nel dimostrare, in sede ispettiva, l'adeguatezza del sistema di gestione rispetto alle nuove vulnerabilità introdotte dalla digitalizzazione; e) incrementare la resilienza complessiva dell'impianto, riducendo la probabilità che un evento cibernetico si traduca in un incidente rilevante.
Il mapping tra minacce cibernetiche e scenari incidentali non deve essere interpretato come un esercizio teorico o meramente descrittivo, ma come uno strumento operativo essenziale per l'aggiornamento del RdS e del SGS-PIR, coerente con l'evoluzione tecnologica degli impianti di processo e con le aspettative normative e ispettive del quadro Seveso.

5. Conclusione

La digitalizzazione degli impianti industriali e l'adozione di tecnologie Industria 4.0 stanno modificando in modo sostanziale la gestione del rischio negli stabilimenti soggetti alla direttiva Seveso. Le vulnerabilità cibernetiche, pur non generando nuovi scenari fisici di incidente, possono agire come eventi iniziatori o fattori aggravanti di scenari già analizzati nel RdS, compromettendo l'efficacia delle misure di prevenzione e protezione. Il lavoro ha evidenziato la rilevanza della cybersecurity industriale ai fini della valutazione dell'adeguatezza del SGS-PIR, sottolineando l'utilità del mapping tra minacce cibernetiche e scenari incidentali come strumento operativo di supporto per gestori e Autorità Competenti. L'integrazione sistematica di tale approccio consente di verificare la robustezza delle barriere di sicurezza anche in condizioni degradate dei sistemi digitali, rafforzando il controllo complessivo sul pericolo di incidente rilevante. Le esperienze ispettive mostrano come l'inclusione esplicita delle tematiche di cybersecurity nel RdS favorisca maggiore trasparenza, tracciabilità e omogeneità delle valutazioni. In conclusione, l'approccio proposto rappresenta un contributo

tecnico utile all'evoluzione del SGS-PIR e del RdS, in coerenza con l'evoluzione tecnologica degli impianti, contribuendo al miglioramento continuo dei livelli di sicurezza per lavoratori, popolazione e ambiente.

Bibliografia e sitografia

[1] Castro Rodriguez D.J., Shi H., Vitale M., Demichela M., Barresi A.A., 2025, Assessing the Major Industrial Accident Potential Based on Dangerous Substance Criteria: a Framework for Seveso and Non-seveso Facilities, Chemical Engineering Transactions, 116, 409-414. https://doi.org/10.3303/CET25116069

[2] Colucci V., Marrazzo R., Galasso V., De Santis M.G., Laterza E., Campanaro V., 2025, Cyber Security in the Process Industry: the Role of Seveso Inspections in the Control of the Safety Management System, Chemical Engineering Transactions, 116, 43-48. https://doi.org/10.3303/CET25116008

[3] Hollerer, S. (2026). Integrated Safety and Security Knowledge Modeling [Dissertation, Technische Universität Wien]. reposiTUm. https://doi.org/10.34726/hss.2026.138664

[4] Ab Rahim, M.S.; Reniers, G.; Yang, M.; Siwayanan, P. Integrating Process Safety and Process Security Risk Management: Practitioner Insights for a Resilience-Oriented Framework. Processes 2025, 13, 392. https://doi.org/10.3390/pr13020392

[5] Yuan, S., Reniers, G., & Yang, M. (2025). Dynamic and integrated safety and security barrier management: A new framework to manage major event risks in chemical plants. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 96, Article 105632. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105632

[6] Marrazzo R., Barone D., 2024, Human Factors and Interfaces Between Operators, Processes, and Plants in the Italian Technical Standards, Chemical Engineering Transactions, 111, 7-12. https://doi.org/10.3303/CET24111002

[7] Rehak, D., Splichalova, A., Lovecek, T., Hromada, M., Jemelkova, S., & Oulehlova, A. (2025). Convergence of safety and security within process plants. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 94, 105579. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105579

[8] THOMSON, J. R. High integrity systems and safety management in hazardous industries. Butterworth-Heinemann, 2025.

[9] https://www.trellix.com/it-it/security-awareness/ransomware/what-is-stuxnet/

Sistemi di rilevamento gas tossici e funzioni strumentate di sicurezza in impianti a rischio di incidente rilevante

V. Prete[1], G. Gorrino[2], I. Oliaro[3], E. Portigliatti[3], M. Zorzi[3]

[1] Inail – Uot di Alessandria
[2] Inail – Uot di Roma
[3] Sirio Srl

Sommario
Al fine di mitigare gli effetti relativi ad un potenziale rilascio di una miscela di gas liquefatto contenente HCl (sostanza tossica) da un impianto per la distillazione di gas liquefatti installato in un'azienda a rischio di incidente rilevante in soglia superiore ai sensi del D. lgs. 105/15, è stato progettato un sistema di rilevamento all'aperto della concentrazione di HCl in aria, che attivi barriere ad acqua, opportunamente posizionate, per assorbire il gas acido. Affinché la riduzione del rischio risulti adeguata secondo la matrice di accettabilità della specifica linea guida aziendale, è stata richiesta l'implementazione di una funzione strumentata di sicurezza (SIF) con un livello di integrità SIL 2.
La metodologia adottata ha definito una modalità di rilascio di riferimento, identificando le principali sorgenti di rilascio e le direzioni predominanti del vento, predisponendo preliminarmente una disposizione dei sensori ed applicando i modelli di simulazione della dispersione per ricavare profili di isoconcentrazione.
La progettazione del sistema di mitigazione con acqua ha richiesto di identificare le posizioni più critiche di potenziale rilascio, la modalità di erogazione dell'acqua e la portata specifica, più una stima dell'efficienza di abbattimento, per confermare l'adeguata riduzione della distanza di danno.
Il grado di difficoltà è stato elevato a causa del livello SIL 2 della SIF e della limitazione fisica imposta dalla struttura di processo, bilanciando vincoli di prestazione, consumo di acqua e impatto economico dell'investimento.
La realizzazione del sistema è così sintetizzabile:

- 19 nuovi rilevatori di HCl,
- Una nuova SIF implementata su safety PLC,
- 120 ugelli erogatori distribuiti su quattro tratti di tubazione antincendio,
- Una stazione di attivazione barriere con doppia valvola a diluvio,
- Una portata di acqua minima garantita di 345 m^3/h.

1. Obiettivo: mitigazione del rischio di rilascio tossico

Con riferimento ad un caso reale, progettato e realizzato negli anni 2022/2023, per mitigare gli effetti di un potenziale rilascio di una miscela di gas liquefatto contenente HCl da un impianto di distillazione e garantire una riduzione del livello di rischio secondo i criteri specifici di accettabilità del Gruppo industriale nei siti produttivi distribuiti in vari continenti, è stato necessario progettare un sistema di rilevamento di HCl in aria in grado di attivare l'erogazione di acqua prelevandola dalla rete idrica antincendio, tramite barriere opportunamente posizionate, per assorbire il gas acido, implementando una SIF con un livello SIL 2.

La sezione di impianto di distillazione era già dotata di un sistema di rilevamento HCl, ma con un solo sensore per ogni piano della struttura e segnalazione di allarme in sala controllo.

La metodologia adottata ha richiesto di definire una modalità di rilascio di riferimento, identificare le principali sorgenti di rilascio, le direzioni principali del vento, le soglie di attivazione dei sensori, proporre una disposizione preliminare degli stessi nello spazio ed applicare estensivamente i modelli di simulazione della dispersione per ricavare dei profili di isoconcentrazione (mappatura di riferimento).

Il sistema di mitigazione con acqua ha richiesto di identificare le posizioni più critiche di potenziale rilascio, la modalità di erogazione dell'acqua, la selezione della portata specifica e la valutazione della distanza di danno a seguito di una stima approssimata dell'efficienza di abbattimento, per confermare l'adeguata riduzione della distanza di danno e l'accettabilità del rischio.

2. Sistema di rilevamento HCl in aria

Nel caso in esame, si considera il rilascio di una miscela di gas liquefatti, contenente una frazione consistente di HCl, unica sostanza tossica presente nella miscela, da una sezione di distillazione ubicata all'interno di un impalcato e molto sviluppata in altezza.

Applicando la metodologia di valutazione del rischio secondo lo standard di Gruppo, lo studio del rilascio di riferimento (perdita di contenimento da una flangia o una valvola) ha portato alla richiesta di un intervento migliorativo dell'esistente impianto di rilevazione HCl, per garantire una maggiore copertura, una più elevata disponibilità, la segnalazione locale e in sala controllo, più l'implementazione di una SIF per mitigare le conseguenze.

Attualmente sono utilizzabili le seguenti norme tecniche:

- UNI10752 [2] - Sicurezza attiva per impianti industriali – Sistemi di rilevamento di fluidi pericolosi – Requisiti e criteri di installazione
- CEI EN 50402 [3] – Prescrizioni per la sicurezza funzionale dei sistemi fissi di rilevazione gas

Le indicazioni della norma UNI 10752 del 1999, ormai datata e bisognosa di un aggiornamento, costituiscono però solo il punto di partenza; è in fase di progettazione che si deve effettuare un approfondimento tecnico per poter

rispondere alle domande fondamentali riguardanti il numero e la disposizione dei sensori.
Il livello di difficoltà nella progettazione aumenta significativamente se si introduce anche la sicurezza funzionale.
La norma CEI EN 50402 si occupa della caratterizzazione di un sistema di rilevamento gas tramite una SIL capability ai fini dell'attivazione di una SIF, in accordo con i livelli di integrità ai fini della sicurezza previsti dalla IEC 61508 [4], non specifica però i requisiti per l'installazione e la manutenzione di sistemi di rilevamento gas, né fornisce indicazioni o criteri da adottare in merito al numero ed al posizionamento dei sensori.

3. Sistema di rilevamento HCl

Si illustra di seguito la sequenza di attività per la progettazione del sistema di rilevazione HCl:

a) analisi incidenti e necessità di introduzione di una SIF basata su rilevamento gas;
b) determinazione del livello di integrità SIL della SIF;
c) acquisizione documenti tecnici dell'impianto (piante e viste della struttura, indicazione posizione apparecchi e tubazioni, piping layout);
d) caratterizzazione del gas e modalità di esercizio;
e) identificazione condizioni ambientali di riferimento (classi di stabilità, velocità e direzione del vento);
f) identificazione dei punti potenziali di rilascio all'interno della struttura e soprattutto più vicini al perimetro della stessa (posizione di flange, valvole, tenute pompe o sfiato da tenute compressore);
g) proposta preliminare di disposizione dei sensori di gas nel volume dell'installazione; lo svolgimento delle attività di cui ai punti d) ed e) consente al progettista di identificare aree e posizioni più critiche; le simulazioni di rilascio elaborate in fase di sviluppo analisi degli incidenti gli permettono di valutare se la gravità potenziale degli impatti varia consistentemente con la quota del rilascio.
h) selezione della modalità di rilascio di riferimento;
i) simulazione del rilascio di riferimento mediante PHAST Professional e determinazione profili di iso-concentrazione;
j) posizionamento dei profili in corrispondenza dei punti di rilascio;
k) verifica del numero di sensori raggiunti dai profili;
l) 1° step di iterazione: riposizionamento e/o introduzione nuovi sensori per coprire adeguatamente le aree;
m) seconda verifica del numero di sensori raggiunti dai profili;
n) fine iterazione: proposta verificata di disposizione planimetrica dei sensori;
o) revisione critica della proposta con i Servizi Tecnici di Stabilimento;
p) implementazione modifiche ed affinamenti;
q) emissione relazione di progetto con indicazione numero e posizione dei sensori; revisione dei disegni con aggiunta della posizione di sirene, lampeggianti e

pulsanti locali, la cui posizione è stabilita in collaborazione con i responsabili di conduzione del reparto.

4. Risultati del sistema di rilevamento HCl

Nel caso specifico, si tratta di un rilascio di miscela di gas liquefatti, più pesanti dell'aria, mantenuta a pressione relativamente elevata (circa 19 barg) e bassa temperatura (circa -13 °C).
La concentrazione tossica di riferimento è pari all'IDLH (50 ppm per l'HCl) e le soglie di intervento dei sensori (prima e seconda soglia) sono 10 e 25 ppm, analogamente a quanto adottato per la vicina struttura che ospita i serbatoi di stoccaggio della miscela liquefatta contenente HCl, proveniente dalla sezione di distillazione.
Sono state selezionate due condizioni atmosferiche ben differenti:

- diurna, classe D, 2 m/s, temperatura ambiente pari a 25 °C;
- notturna, classe F, 2 m/s, temperatura ambiente pari a 10 °C

e due direzioni principali del vento, da SO e da NNE, aventi probabilità nettamente superiore a quelle dell'insieme delle altre direzioni.
La sezione di distillazione è ubicata in un impalcato metallico a sezione rettangolare, avente le dimensioni: lati di base 19 m e 15 m, altezza dell'ultimo piano pari a 46 m, 9 piani operativi principali, con superfici calpestabili costituite da grigliati metallici. È presente una ridotta parte della struttura dotata di confinamento totale mediante tamponature, senza però presenza di miscela gassosa liquefatta contenente HCl all'interno.
Durante un sopralluogo congiuntamente al personale operativo dell'impianto sono state individuate le principali sorgenti potenziali di rilascio, più le posizioni preliminari ed il numero approssimativo dei nuovi sensori necessari.
I punti di rilascio sono presenti soprattutto in corrispondenza del piano terra della struttura (presenza delle pompe) e soprattutto fra il primo piano e il secondo piano, dove si ha la concentrazione di tutti i gruppi di regolazione del livello, dei misuratori di portata etc.; il rilascio di gas liquefatto ai piani superiori, oltre che meno probabile, risulta anche meno critico per quanto concerne la ricaduta del profilo di isoconcentrazione dell'IDLH al suolo.

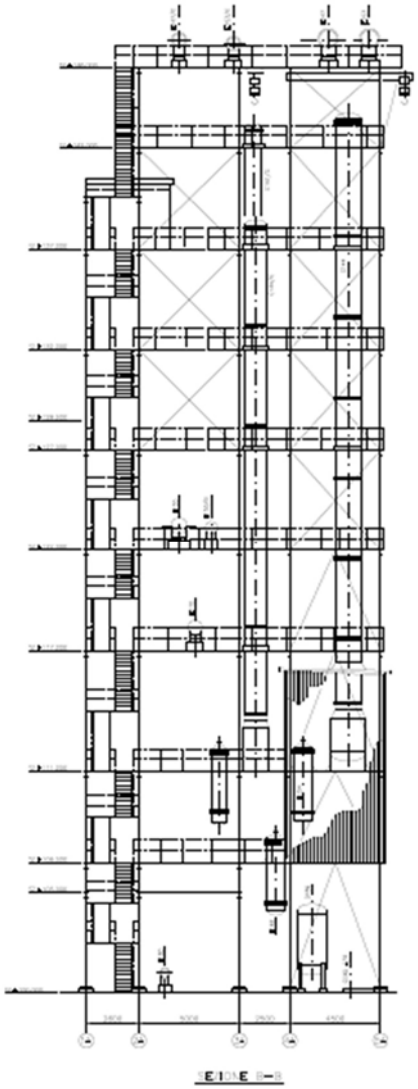


Figura 1. Sezione di impianto

La disposizione di rilevatori di HCl, certificati per applicazioni SIL 2, ha quindi portato al posizionamento di ulteriori 15 rilevatori, distribuiti al piano terra, al primo piano (quota 6.5 m), al secondo piano (quota 11.1 m).
In accordo con le indicazioni della linea guida di valutazione del rischio del Gruppo industriale, è stata adottata un'area di efflusso di 1 mm^2, da ubicare in corrispondenza dei punti più critici (pressione più elevata) ed alla quota più bassa.
La simulazione del rilascio è stata svolta facendo riferimento alla prima soglia di attivazione di allarme da parte dei sensori (pari a 10 ppm).
Sono stati simulati rilasci a tre diverse quote: 0.5 m, 8 m e 12 m, per ricavare i profili di isoconcentrazione con vista laterale e con vista in pianta; di seguito viene illustrato quanto ricavato per il rilascio a piano terra.

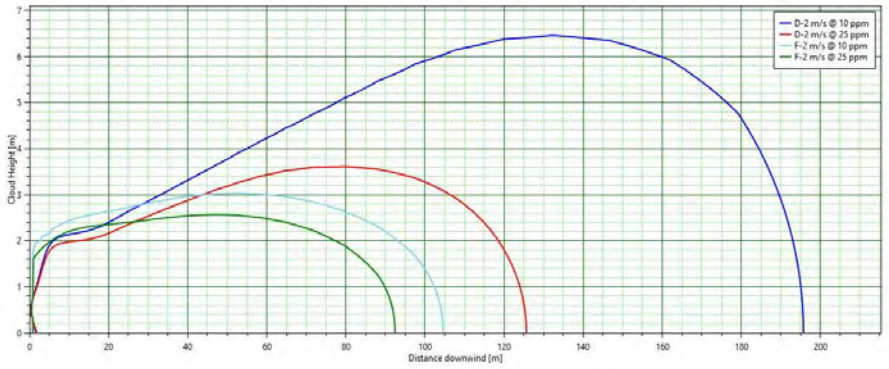


Figura 2. Rilascio a piano terra, vista laterale – pompe e gruppo di regolazione

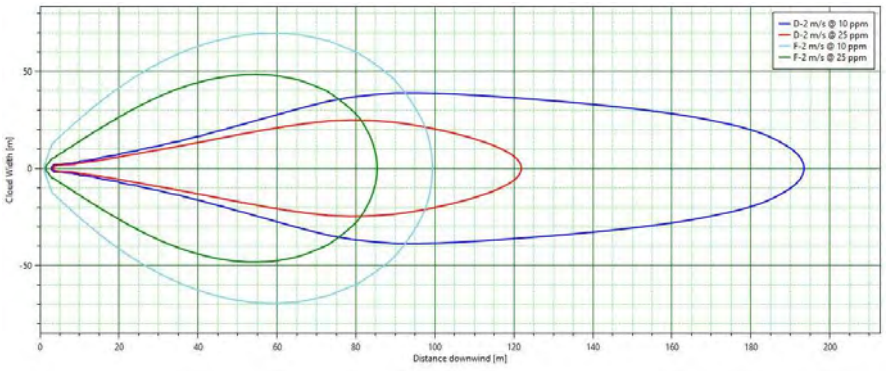


Figura 3. Rilascio a piano terra, vista in pianta, sezione a 1.5 m – pompe e gruppo di regolazione

Sulla base della posizione dei punti di rilascio di riferimento (da pompa, da valvola a 6.5 m, da colonna a 8 metri etc.), sono state ricavate 20 mappature, di cui si riportano due esempi (figure 4 e 5).
In queste figure sono state rappresentate le principali direzioni del vento. Ruotando le curve, facendo perno sul punto del rilascio, si verifica inoltre quali sensori possano intervenire per rilevare la perdita in esame, a seconda della direzione del vento che si vuole adottare.
Nel caso preso in esame vista la sua complessità data dalla presenza di molti rilevatori posti a quote differenti e con diverse sorgenti di rilascio da considerare, è stato utile creare una matrice ove si evidenzia, per ogni rilascio, quanti e quali rilevatori intervengano esaminando le 20 mappature elaborate. In tal modo, è anche possibile verificare che per ogni rilascio ci siano almeno 2 rilevatori efficaci nella direzione principale del vento, in modo da garantire una ridondanza del rilevamento.

A seguito della verifica il numero di rilevatori è stato portato a 19 complessivi e la relativa posizione ottimizzata: 4 al piano terra, 7 al primo piano, 8 al secondo piano.

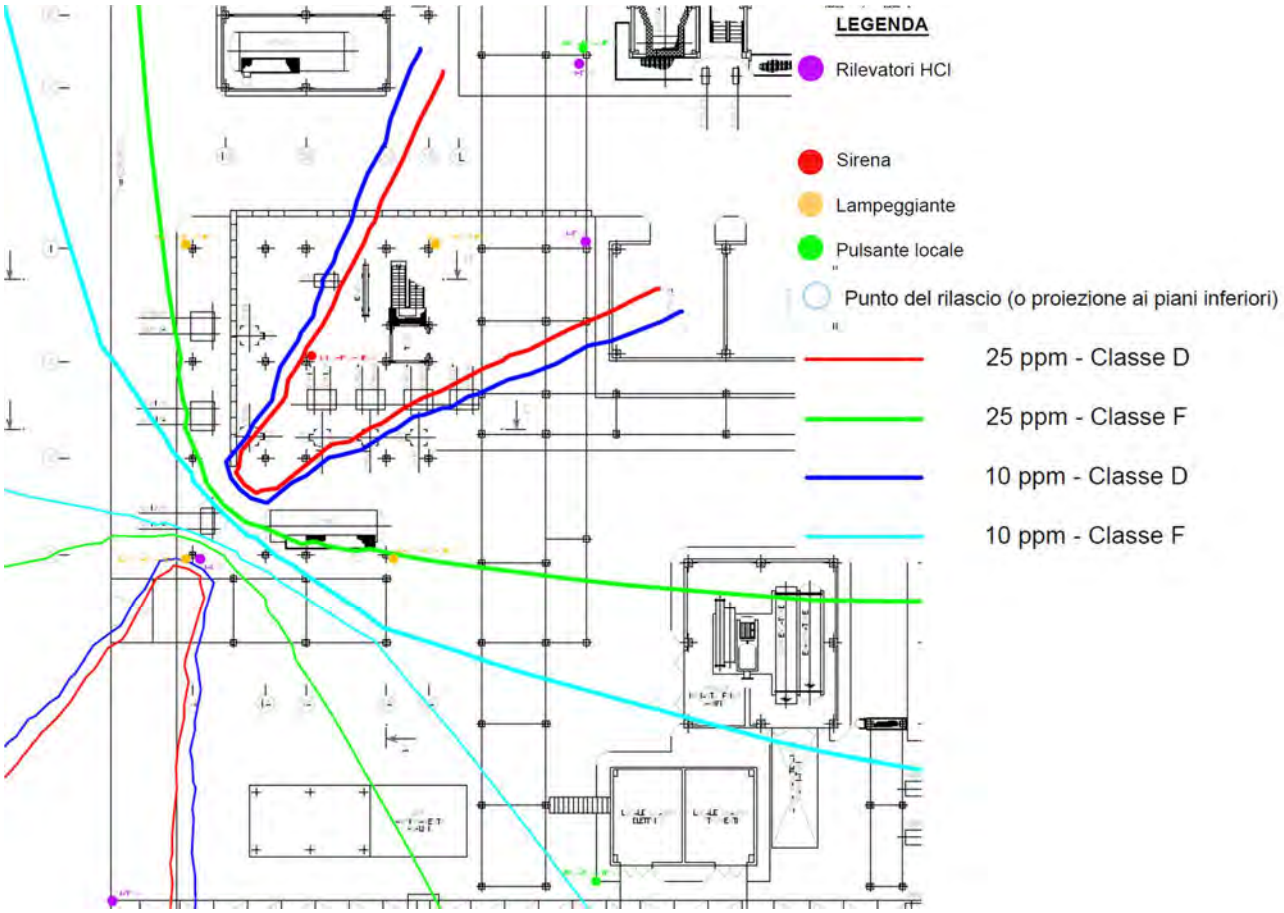


Figura 4. Rilascio di gas tossico da flangia mandata pompa, in orizzontale, pianta del rilascio a 1.5 m di quota nelle principali direzioni del vento

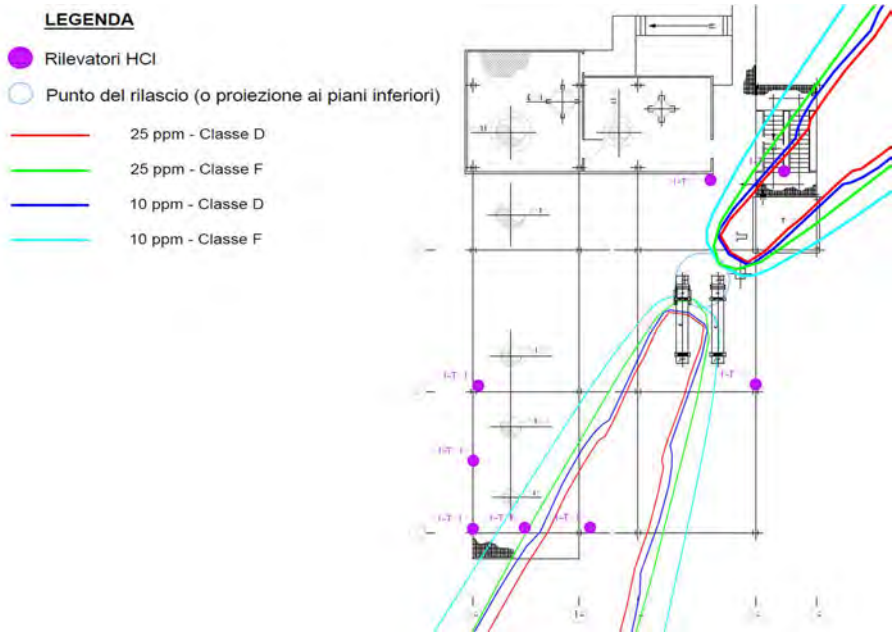


Figura 5. Rilascio di gas tossico da flangia di uno scambiatore, in orizzontale, pianta del rilascio a 12 m di quota nelle principali direzioni del vento



Figura 6. Posizione sensori sui 3 piani

5. Impianto di mitigazione: metodo di progettazione e risultati

Per il dimensionamento delle barriere ad acqua, sono stati considerati rilasci a due quote, in prossimità dei principali punti di perdita (valvole, flange, ecc):

- 1 m – Linee di ingresso e uscita dalle pompe
- 8 m – Linee di fondo delle colonne

Rispetto allo studio per l'impianto di rilevazione HCl, è stato adottato un diametro di efflusso nettamente più elevato (5 mm), per una valutazione conservativa della portata di acqua necessaria, da rapportare a quella di rilascio del gas liquefatto.

La barriera nel suo complesso è stata suddivisa in quattro rami:

- uno alto a protezione delle colonne a circa 17 m di quota,
- uno alto a protezione dello scambiatore a circa 17 m di quota,
- uno intermedio a protezione delle colonne a circa 11 m di quota,
- uno basso a protezione delle pompe poste a terra a circa 5 m di quota.

Si è proceduto a diverse simulazioni, per tentativi, al fine di ottenere la portata di acqua minima per ridurre adeguatamente le distanze di danno alla quota bersaglio di 1.5 m dal suolo.

I calcoli svolti fanno riferimento, conservativamente, alla portata fornita dal solo lato lungo della barriera (condizione più sfavorevole).

La densità minima di scarica dei quattro rami è risultata:

- Ramo "basso": 50 l/min* m (49 m^3/h)
- Ramo "intermedio": 50 l/min* m (122 m^3/h)
- Ramo "alto colonne": 50 l/min * m (118 m^3/h)
- Ramo "alto scambiatore": 50 l/min * m (56 m^3/h)

La portata d'acqua è risultata complessivamente paria a circa 345 m^3/h minimo, questo ha fatto realizzare un nuovo collettore principale di alimentazione avente diametro DN200.

Per garantire il livello SIL 2, si è resa necessaria l'installazione di due valvole a diluvio in parallelo, comandate da un pannello fire&gas che riceve i segnali dai rilevatori di fuga HCl posizionati in campo. L'attivazione della barriera avviene anche per mezzo sia di pulsante di emergenza posto in sala controllo, che di pulsante locale o direttamente sul gruppo di controllo tramite valvola predisposta.

Le valvole a diluvio DN150 sono ridondanti; le elettrovalvole di comando sono del tipo "Energize to trip", certificate SIL2.

È stato effettuato il calcolo per la verifica del livello SIL, mediante opportuno software, allo scopo di determinare il valore della PFD associata alla relativa SIF.

L'erogazione dell'acqua è garantita da ugelli nebulizzatori del tipo a lama d'acqua (Spray Nozzle); in base al calcolo idraulico svolto, la portata complessiva è risultata pari a 374.4 m^3/h. Gli ugelli sono installati su tre quote:

- Quota anello alto: circa 16.5 m da piano calpestio, 57 ugelli,
- Quota anello intermedio: circa 10.5 m da piano calpestio, 47 ugelli,
- Quota livello basso: circa 5 m da piano calpestio, 16 ugelli.

Nella figura seguente è illustrata la posizione degli ugelli, in corrispondenza degli anelli alto ed intermedio.

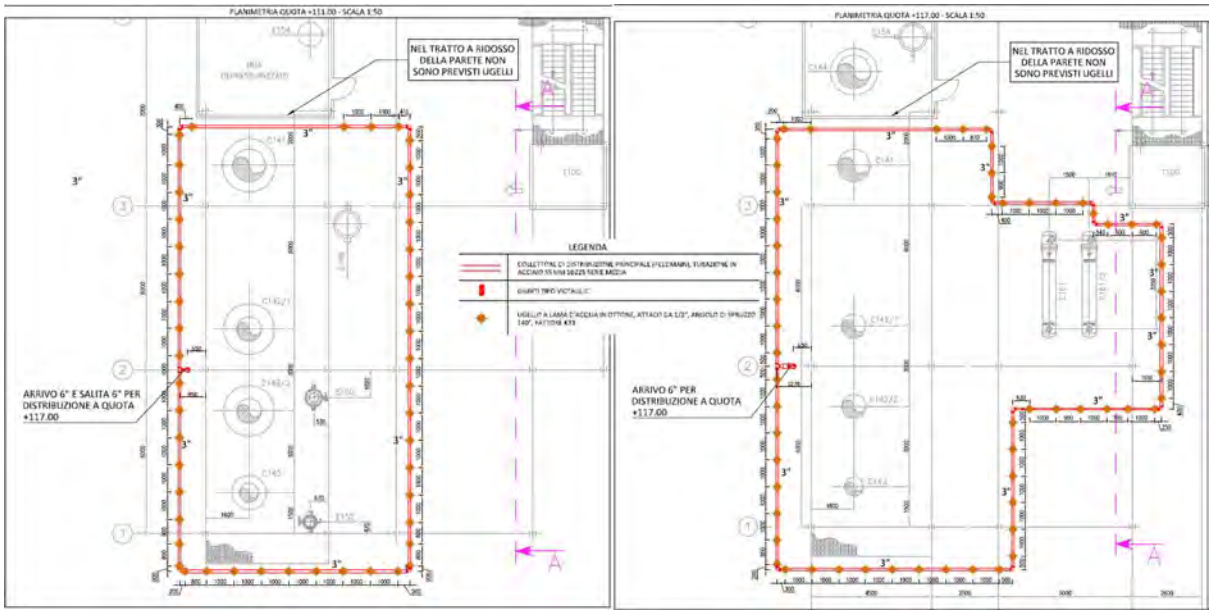


Figura 7. Pianta posizionamento barriere a 11 m e 17 m di quota

6. Verifiche e Controlli

Dopo aver implementato l'installazione del sistema di intervento (Funzione di Sicurezza Strumentata-SIF), costituito dalle due valvole a diluvio in parallelo e comandato dal rilevamento HCl tramite PLC Fire&Gas, si è proceduto alla sua messa in servizio, mediante compilazione di uno specifico foglio di test (verifica del funzionamento del sistema stesso).

Il controllo di corretto funzionamento viene eseguito annualmente dal servizio Manutenzione della ditta, oggetto della seguente memoria, come da procedura di gestione blocchi critici.

I sensori di HCl sono certificati per applicazioni SIL 2 e sono stati testati dal fornitore, con prove a banco registrate, prima dell'installazione. I sensori sono soggetti a controllo funzionale semestrale, con registrazione, da parte del servizio Strumentazione di sito.

L'impianto a barriere d'acqua è stato assoggettato a collaudo iniziale da parte della ditta installatrice, che ha rilasciato una dichiarazione di corrispondenza al progetto. L'impianto è soggetto a test semestrale, a cura di ditta terza specializzata, per verifica della corretta apertura delle valvole a diluvio e dell'erogazione regolare dagli ugelli.

Conclusioni

In conclusione, il sistema di rilevamento di gas tossici installato presso un impianto di processo su un impalcato all'aperto, caratterizzato da un elevato sviluppo verticale, presenta rilevanti complessità sia nella determinazione del numero minimo di sensori e della loro disposizione ottimale, sia nel corretto dimensionamento del sistema di abbattimento ad acqua, da attivare mediante funzione strumentata di sicurezza SIL 2.

Il caso applicativo descritto nel presente articolo ha evidenziato come tali criticità possano essere efficacemente affrontate solo attraverso un approccio multidisciplinare, che ha richiesto il contributo coordinato di diverse figure specialistiche quali:

- analista di rischio,
- ingegnere di produzione dell'impianto,
- ingegnere del servizio HSE di sito,
- esperto di modellazione rilasci di gas tossico,
- esperto di sicurezza funzionale,
- esperto di progettazione impianti antincendio

prima di poter procedere alla realizzazione.

Il progetto è stato presentato al Comitato Tecnico Regionale (CTR) e al Comando Provinciale VVF come intervento non comportante aggravio di rischio, corredato della documentazione tecnica specifica come il safety requirement sheet della SIF e la simulazione del rilascio di riferimento prima e dopo l'installazione del sistema di mitigazione.

La soluzione adottata ha pertanto consentito una significativa mitigazione degli scenari di danno, dimostrando l'efficacia dell'integrazione tra analisi di rischio, progettazione ingegneristica e requisiti di sicurezza funzionale.

Ringraziamenti
Syensqo Specialty Polymers Italy SpA

Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105, Attuazione direttiva 2012/18/UE sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose
[2] UNI 10752, Sicurezza attiva per impianti industriali - Sistemi di rilevamento di fluidi pericolosi - Requisiti e criteri di installazione
[3] CEI EN 50402, Apparecchiature elettriche per rilevazione e misura di gas o vapori combustibili o tossici, o di ossigeno. Prescrizioni per sicurezza funzionale di sistemi fissi di rilevazione gas
[4] IEC 61508, Sicurezza funzionale sistemi elettrici, elettronici ed elettronici programmabili per applicazioni di sicurezza

Gli infortuni e le malattie professionali nell'industria di processo Seveso

A. Leva[1], R. Vallerotonda[1], M. Rosaria Vallerotonda[2]

[1]Inail - DIMEILA
[2]Inail - Dit

Sommario
L'industria di processo impiega diversi milioni di lavoratori nei Paesi dell'UE e tale settore ingloba stabilimenti chimici in cui le materie prime sono stoccate e trasformate in nuovi prodotti attraverso processi chimico-fisici. In Italia la sola fabbricazione di prodotti chimici e di materie plastiche coinvolge circa 14.000 imprese e alcune di loro ricadono, per tipologia e quantità di materia detenuta, nell'ambito di applicazione del D.lgs. 105/2015, ossia in "Seveso". Tale settore impone al gestore una serie di attività volte alla valutazione e gestione del rischio di incidente rilevante.
Tuttavia, i lavoratori coinvolti in tali realtà possono essere soggetti sia a malattie professionali che ad infortuni sul lavoro non necessariamente derivanti da *major accident*. Questi eventi, una volta denunciati, alimentano le banche dati dell'Inail.
Lo scopo di questo lavoro è quello di presentare un'analisi dei casi di infortunio e di malattia professionale registrati nelle industrie di processo che ricadono nell'applicazione della normativa Seveso (IPS) al fine di caratterizzare in modo prevenzionalmente completo l'industria di processo e di formulare possibili osservazioni che possano essere di supporto alla valutazione e gestione dei rischi.

1. Introduzione

In Italia sono presenti circa 970 stabilimenti [1] soggetti al d.lgs. 105/2015, che recepisce la Direttiva europea 12/2018 per il controllo del pericolo di incidente rilevante [2]. Il gestore, in tali realtà, è il soggetto (fisico o giuridico) a cui è stato delegato il potere economico/decisionale per l'esercizio tecnico dell'impianto e che deve attuare misure efficaci per prevenire gli incidenti e mitigare le conseguenze di questi sulla salute umana e sull'ambiente. Secondo il d.lgs. 105/2015 (cd. decreto Seveso) il sistema di gestione della sicurezza per il controllo del pericolo di incidente rilevante (SGS PIR) è lo strumento cardine attraverso cui il gestore attua il ciclo di Deming per avere un miglioramento continuo [3]. Tale obiettivo è enunciato nella politica di prevenzione degli incidenti rilevanti che viene attuata attraverso un programma, più o meno articolato, che ricade su tutte le attività aziendali: dalla formazione alla manutenzione, dalla valutazione dei rischi alla definizione degli indicatori di prestazione.
In ambito Seveso è sempre più incisiva l'importanza dell'analisi dell'esperienza operativa che focalizza l'attenzione sugli incidenti e sui quasi incidenti per studiare le cause che gli stessi hanno avuto e le barriere, sia tecniche che gestionali, che hanno o meno funzionato [4]. Il tutto, come ribadito in Ansaldi et. al. 2021 [5], è svolto con

l'obiettivo di condividere quanto appreso per far sì che non accada di nuovo lo stesso incidente. Tali eventi possono essere associati ad infortuni, più o meno importanti, che in base alla loro entità e alla loro gravità comportano la denuncia da parte del Datore di lavoro all'Organo competente. Questo protocollo mette in atto un processo che, qualora risulti avere determinati requisiti, porta all'indennizzo dell'infortunato da parte dell'Inail. Oltre agli infortuni associati agli incidenti rilevanti, nelle stesse aziende gli addetti possono subire altri episodi dannosi per la salute come, ad esempio, l'esposizione a sostanze e condizioni di lavoro che potrebbero comportare la manifestazione di patologie correlate al lavoro.
Nel 2015 Bragatto et al. [6] affermano quanto il sistema di gestione infici positivamente sul settore delle piccole industrie chimiche, mentre Simeoni et al. [7] e Di Francesco et al. [8] caratterizzano gli infortuni sul lavoro registrati nel settore Seveso in generale. Il presente lavoro esamina i dati acquisiti dall'Inail sulle malattie professionali e sugli infortuni sul lavoro focalizzando l'attenzione su quelli avvenuti in aziende di processo soggette a normativa Seveso. Di seguito, dopo una breve descrizione dei compiti e delle attività dell'Inail nel contesto Seveso (paragrafo 2), nel paragrafo 3 è illustrato il metodo utilizzato, mentre nei paragrafi 4 e 5 vengono riportati rispettivamente i risultati e le conclusioni a cui si è giunti.

2. Le attività dell'Inail nell'ambito del d.lgs. 105/2015

L'Inail è organo tecnico per i Ministeri competenti ai fini dell'attuazione del d.lgs. 105/2015 e, pertanto, i tecnici dell'Istituto partecipano alle ispezioni ex art. 27 sul SGS PIR, alle istruttorie dei Rapporti di Sicurezza (RdS) ex art. 15 e ai sopralluoghi post incidentali ex art. 25.
Le ispezioni SGS PIR sono mirate alla verifica della conformità del Sistema di Gestione della Sicurezza per la Prevenzione degli Incidenti Rilevanti e dell'attuazione della Politica di Prevenzione di tali eventi. Queste attività sono finalizzate a verificare che il gestore abbia attuato un SGS PIR proporzionato ai pericoli, alle attività industriali e alla complessità dell'organizzazione dell'impianto e che, soprattutto, si basi sull'analisi di rischio. In ambito dei Comitati Tecnici Regionali (CTR) sono, inoltre, costituiti gruppi di lavoro attraverso i quali vengono svolte le istruttorie sui RdS. Tali gruppi valutano se il gestore abbia identificato ed analizzato gli eventi incidentali che possono svilupparsi in stabilimento e se abbia adottato le misure necessarie per prevenirli e per limitarne le conseguenze per la salute e per l'ambiente. Le commissioni post incidentali (ex art. 26) svolgono, invece, un'attività finalizzata alla raccolta, per successiva comunicazione alla Commissione europea, delle informazioni sull'evento rilevante accaduto. Il Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici (Dit) dell'Inail ha un ruolo attivo nel sistema Seveso e, con i propri tecnici, partecipa anche a definire strumenti ed indirizzi, quali prodotti dell'attività di ricerca, per il miglioramento della sicurezza negli impianti industriali.

3. Materiali e metodi

I materiali utilizzati in questa ricerca derivano essenzialmente da due fonti: i dati che l'Inail raccoglie in quanto ente assicuratore (presentati nella forma dei Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni) e i dati presenti nell'inventario degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante gestito dall'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA).

È stata realizzata un'integrazione di queste due fonti in modo da reperire informazioni riguardanti specificatamente i problemi di salute e sicurezza degli addetti delle industrie di processo soggette a normativa Seveso non limitando l'esame agli accadimenti derivanti dagli incidenti rilevanti, ma estendendo il campo di osservazione a tutti gli infortuni e le malattie professionali.

3.1 I Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni

La disponibilità di sistemi informativi rappresenta un presupposto essenziale per la programmazione, l'attuazione e la valutazione delle politiche di prevenzione degli eventi lesivi per la salute dei lavoratori. I Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni nascono per tale scopo essendo uno "*strumento gestionale di sistematizzazione e condivisione delle conoscenze tra Regioni, Province autonome, Dipartimenti di prevenzione delle Asl, Direzioni Regionali Inail, per la pianificazione, la gestione e il controllo delle attività finalizzate alla prevenzione*" e rendendo *"disponibili le informazioni relative agli infortuni e malattie professionali dei lavoratori infortunati e tecnopatici e alle aziende di appartenenza degli stessi collegate a tali eventi con relativi indicatori per la programmazione e il supporto all'azione dei decisori delle politiche di intervento*" [9].

Essi riguardano, quindi, le aziende assicurate presso l'Inail, le malattie professionali e gli infortuni sul lavoro, i cui dati vengono acquisiti dall'Inail in qualità di istituto assicuratore.

L'attuale versione dei Flussi informativi è frutto del protocollo di intesa sottoscritto nel 2010 tra Inail, Ispesl, Regioni, Ministeri del lavoro e della salute e costituisce la base informativa per i Piani sanitari nazionali. Essi sono riconosciuti anche dalle Regioni e dalle Asl, che vi accedono per competenza territoriale, per la definizione e gestione dei Piani territoriali per la Prevenzione, per la condivisione di iniziative e di interventi sul territorio con le Direzioni regionali Inail, per il monitoraggio dei fenomeni di rischio e la pianificazione delle attività di prevenzione [10].

Alcuni ricercatori dell'Inail ed il personale che gestisce i database hanno accesso ai dati dettagliati, mentre le stesse informazioni, seppur a livello aggregato, sono liberamente consultabili attraverso la Banca Dati Statistica online dell'Inail [11].

Per le elaborazioni di questa ricerca è stato necessario utilizzare i dati elementari contenuti nei Flussi informativi.

I Flussi confluiscono nel patrimonio dei dati del Sistema Informativo Nazionale per la Prevenzione (SINP), istituito dall'8 del D. Lgs.81/08 con l'obiettivo di raccogliere, integrare e rendere disponibili dati provenienti da fonti istituzionali eterogenee, a

supporto delle attività di prevenzione e vigilanza nei luoghi di lavoro. Il decreto attuativo–del SINP risale al 25 maggio 2016 [12], ad oggi tuttavia il sistema non è ancora pienamente operativo.
Il SINP comprende dati relativi al quadro produttivo e occupazionale, ai profili di rischio lavorativo, agli infortuni e alle malattie professionali, alle azioni di prevenzione, agli interventi di vigilanza e agli eventi infortunistici al di sotto della soglia indennizzabile. La gestione del sistema informativo e la responsabilità del trattamento dei dati sono attribuite all'INAIL, che opera quale soggetto coordinatore del sistema ai quali avranno accesso le amministrazioni che costituiscono il Sistema: oltre all'Istituto, i Ministeri del Lavoro, della Salute e dell'Interno, le Regioni e le Province autonome di Trento e Bolzano, Ispettorato Nazionale sul Lavoro, Dipartimento per la trasformazione per la Presidenza del Consiglio, Inps, CNEL e per specifiche funzioni anche le Forze Armate, Vigili del Fuoco e Forze di Polizia.

3.2 Inventario degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante

Tutti gli stabilimenti Seveso sono censiti sul Portale Seveso, ossia, un sistema informativo che garantisce al pubblico l'accesso a dati e mappe aggiornate su tali aziende. La gestione e l'aggiornamento di tale sistema, come previsto dal d.lgs. 105/2015, sono garantiti dall'ISPRA. Nello specifico, il Portale Seveso, utilizzato anche per lo scambio di informazioni tra le amministrazioni a livello centrale, viene popolato dai gestori degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante mediante l'invio telematico delle notifiche. Il gestore, infatti, secondo quanto disposto nell'allegato 5 del decreto Seveso, deve trasmettere alle amministrazioni competenti la notifica, ossia, un documento organizzato che fornisce i dati identificativi, l'inventario delle sostanze utilizzate e presenti, la descrizione del contesto ambientale su cui insiste e l'analisi dei rischi principali, nonché le misure tecniche presenti per mitigare l'eventuale accadimento di un incidente rilevante.
L'ISPRA, oltreché gestire la regolarità dell'invio di tali format ha il compito di verificarne la completezza e la conformità così da darne contezza alla Commissione europea ai sensi dell'art. 21 comma 3 della Direttiva 12/2018.
In applicazione della normativa, in Italia gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante sono suddivisi in 39 attività industriali così come inserite e classificate nel Portale.

3.3 Metodologia

Nel presente studio, l'indagine si è focalizzata sulle industrie di processo soggette a normativa Seveso che trasformano materie prime in prodotti con nuove proprietà chimico-fisiche attraverso operazioni e reazioni chimiche, più o meno complesse.
Questi stabilimenti, definiti nel seguito con l'acronimo IPS (industrie di processo Seveso), sono stati ricavati dall'Inventario degli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti con un filtraggio basato sui settori industriali individuati nel d.lgs. 105/2015.
A maggio 2025 gli stabilimenti dell'industria di processo presenti sul Portale Seveso [1] ammontavano a 346 unità dislocate sul territorio italiano (la Tabella 1 riporta la

loro numerosità in funzione del settore industriale). Gli impianti più numerosi sono quelli chimici a cui seguono gli stabilimenti impegnati nella produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e fungicidi.

Codice attività	Attività dello stabilimento	n. IPS
07	Trattamento di metalli mediante processi	9
08	Raffinerie petrolchimiche/di petrolio	16
17	Produzione e stoccaggio di pesticidi, biocidi e	24
19	Produzione di prodotti farmaceutici	14
22	Impianti chimici	94
23	Produzione di sostanze chimiche organiche di base	8
24	Fabbricazione di plastica e gomma	16
25	Produzione e fabbricazione di carta e di pasta di	1
38	Fabbricazione di sostanze chimiche	16
	Totale	**346**

Tabella 1. Numerosità degli stabilimenti IPS per tipologia. *Fonte: Portale Seveso* [1].

Per questi stabilimenti è stata effettuata un'analisi retrospettiva descrivendo la storia degli eventi lesivi subiti dai loro addetti nel periodo 2014-2023 e fornendo un quadro di eventuali criticità basato su un arco temporale più attuale possibile al momento dello studio. In tal modo non sono stati considerati gli stabilimenti che, alla data di osservazione, non erano più o non erano ancora presenti sul portale Seveso.

Grazie all'accesso ai Flussi informativi Inail è stato possibile adottare una procedura semi-automatizzata di record-linkage tra la lista IPS e gli stessi Flussi e, in particolare, con gli archivi delle aziende, che, per ogni anno di attività, contengono le informazioni anagrafiche sulle singole unità locali delle imprese assicurate nella Gestione Industria e Servizi dell'Inail (codice fiscale, ragione sociale, indirizzo della sede legale, indirizzo dell'unità locale, numero di addetti, ecc.). In termini più rigorosi, ogni record dell'archivio annuale delle aziende si riferisce ad una posizione assicurativa territoriale (PAT), che non necessariamente coincide con un'unità locale nella sua interezza in un rapporto biunivoco, in quanto un'unità locale può avere più PAT se essa svolge più attività assicurate in modo diverso, ma che sicuramente identifica una ed una sola unità locale.

Le variabili chiave per il record-linkage (che ha previsto varie iterazioni, anche manuali) sono state la ragione sociale ed il comune dello stabilimento; la scelta di quest'ultimo (e non dell'indirizzo completo) è dipesa dalla constatazione che per ogni azienda è presente al massimo uno stabilimento nel Portale Seveso, mentre la scelta della ragione sociale, benché non ottimale per un matching automatizzato, è dovuta all'impossibilità di basarsi completamente sul codice fiscale.

In merito ai Flussi, i record associati all'archivio delle aziende hanno fornito le informazioni sulla stima degli addetti ed i codici PAT, usati a loro volta come variabile chiave per gli ulteriori record-linkage con gli archivi degli infortuni sul lavoro e delle malattie professionali nell'ultimo decennio disponibile (2014-2023).

In tal modo sono stati estratti gli eventi accaduti nelle IPS.
Il metodo adottato si distingue da quello presentato da Di Francesco et al.[8] in cui gli infortuni degli impianti dell'Inventario Seveso sono stati ricavati con un accoppiamento diretto con l'archivio infortuni mediante le variabili strategiche "codice fiscale" e "luogo dell'evento". Nel presente elaborato, invece, si è voluto puntare sul legame esplicito con lo specifico stabilimento (attraverso il codice PAT), indipendentemente dalla località di accadimento; inoltre, prendendo in esame anche le patologie professionali (e non solo gli infortuni) il luogo dell'evento (variabile che sostanzialmente fa riferimento alla competenza territoriale delle Asl) risulta un concetto più sfumato, considerando che per esse l'esposizione ai fattori di rischio potrebbe essere stata prolungata nel tempo e riferita ad un periodo pregresso alla manifestazione della malattia stessa.
In alcuni casi, ad una singola IPS corrisponde più di una PAT e, perciò, (sulla base di quanto detto sopra a proposito delle posizioni assicurative territoriali) per le elaborazioni successive si è proceduto ad un ulteriore filtraggio, selezionando solo le PAT per le quali l'attività economica, secondo la classificazione Ateco 2007, corrisponde ad una delle seguenti: C17 - Fabbricazione di carta e di prodotti di carta, C20 - Fabbricazione di prodotti chimici, C21 - Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici, C22 - Fabbricazione di articoli in gomma e materie plastiche, C27 - Fabbricazione di apparecchiature elettriche ed apparecchiature per uso domestico non elettriche, G4675 - Commercio all'ingrosso di prodotti chimici (in cui è presente uno stoccaggio di prodotti chimici).
Per gli infortuni le analisi sono state sviluppate su quelli riconosciuti dall'Inail (definiti positivi) e accaduti nel periodo 2014-2023, con l'esclusione di quelli in itinere.
Per essi, pur conoscendo le questioni relative alla precisione delle stime degli addetti a livello di disaggregazione utilizzato, sono stati calcolati gli indici di *incidenza* [13]. Tra gli indicatori del rischio, che rapportano gli eventi ad una misura dell'esposizione, l'indice di incidenza pone al denominatore il numero degli addetti, al contrario dell'indice di frequenza il cui denominatore è rappresentato dal numero di ore lavorate (norma UNI 7249/2007). In ogni caso, l'indice di incidenza è una misura con proprietà di confrontabilità relativamente all'ultimo anno-evento a disposizione (2023):

$$\boldsymbol{I_{i,j}} = \frac{infortuni_{ij}}{addetti_{ij}} 10^3 \qquad (1)$$

dove

i rappresenta l'i-esimo settore economico (codice Ateco 2007);

j rappresenta l'appartenenza o meno al gruppo di IPS;

$infortuni_{ij}$ sono gli infortuni avvenuti nel 2023 nel settore e nel gruppo considerati;

$addetti_{ij}$ sono gli addetti-anno stimati per il 2023.

L'indice, quindi, è stato calcolato per ogni codice Ateco di interesse (i) per il gruppo di IPS ($j = IPS$), nonché per tutte le altre unità locali ($j = altre$), in modo da poter effettuare dei confronti a parità di settore economico.
Per le malattie professionali l'indagine ha riguardato i casi protocollati tra il 2014 ed il 2023 definiti positivi.
In ragione della natura delle patologie, che possono avere una latenza molto variabile e possono dipendere da periodi di esposizione più o meno lunghi, non è adeguata la misura adottata per gli infortuni (che si basa sul numero di lavoratori nell'intervallo di tempo studiato), pertanto, come indicatore epidemiologico è stato adottato il PRR (proportional reporting ratio) [14].
Il PRR è un indicatore che, per ogni gruppo preso in esame, rapporta la quota di una specifica patologia (sul totale delle patologie all'interno del gruppo) all'analoga quota negli altri gruppi. Offre, in sostanza, una misura della forza dell'associazione tra malattia e gruppo ossia, una valutazione di quanto una malattia caratterizzi un gruppo.
In questo ambito sono considerati due gruppi: quello delle IPS e quello di tutte le altre PAT e, pertanto, le stime dei PRR relativi al gruppo di IPS sono state calcolate nel modo seguente [15]:

$$PRR_{IPS,m} = \frac{n_{IPS,m}}{N_{IPS}} \Big/ \frac{n_{altre,m}}{N_{altre}} \qquad (2)$$

con intervallo di confidenza

$$l_{inf} = PRR_{IPS,m} * \exp\left(-1{,}96\sqrt{\frac{1}{n_{IPS,m}} - \frac{1}{N_{IPS}} + \frac{1}{n_{altre,m}} - \frac{1}{N_{altre}}}\right) \qquad (3)$$

$$l_{sup} = PRR_{IPS,m} * \exp\left(+1{,}96\sqrt{\frac{1}{n_{IPS,m}} - \frac{1}{N_{IPS}} + \frac{1}{n_{altre,m}} - \frac{1}{N_{altre}}}\right) \qquad (4)$$

dove

IPS	indica il gruppo di IPS;
$altre$	indica tutte le altre PAT;
m	la m-esima classe di malattie;
$n_{g,m}$	è la numerosità dei casi di malattia della classe *m* nel gruppo *g*;
N_g	è il totale dei casi di malattia nel gruppo *g*.

Sono state così individuate le principali associazioni tra IPS e malattie fissando opportune soglie di rilevanza ($n_{IPS,m} \geq 5$ e inoltre $e_{inf} \geq 1$).

4. Risultati

Le informazioni relative alle IPS sono state incrociate con gli archivi delle aziende di fonte Inail, utilizzando l'approccio già richiamato. Il record-linkage è riuscito per 291 IPS, corrispondenti all'84% del totale.
Il successivo matching con gli archivi degli infortuni mostra che i lavoratori di tali aziende hanno denunciato più di 5 mila infortuni nel decennio 2014-2023. Gli infortuni delle IPS definiti positivamente sono poco oltre 4 mila (Tabella 2).

Individuazione infortuni nei Flussi informativi Inail	Frequenza
IPS abbinate con i Flussi Inail	291
Infortuni *denunciati* (2014-2023) inerenti alle IPS abbinate	5.224
Infortuni *riconosciuti* (2014-2023) inerenti alle IPS abbinate	4.015

Tabella 2. IPS individuate nei Flussi Informativi Inail e relativi infortuni.
Fonti: ISPRA Portale Seveso e Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni.

Le suddette elaborazioni, sulla base del metodo descritto nel paragrafo 4.3, non hanno tenuto conto degli episodi in itinere.
Per quanto attiene ai risultati, in questo resoconto si tralascia l'esame delle variabili che delineano gli infortuni economicamente, anagraficamente, geograficamente e per modalità ed esito, poiché un'analisi di questo tipo è stata già svolta in precedenti lavori [8]. Vengono descritti, invece, i risultati emersi nello stesso settore economico confrontando quelli accaduti in IPS e in altre unità locali, in termini di rischiosità e di gravità.
L'indice di *incidenza* infortunistica (Tabella 3) rivela che ci sono due settori da monitorare per quanto riguarda le IPS: la fabbricazione di prodotti farmaceutici (in cui il rischio di eventi lesivi è una volta è mezza più grande rispetto a quello nelle altre unità locali) e la fabbricazione di apparecchiature elettriche e per uso domestico non elettriche (dove si verificano quasi 33 infortuni per mille addetti e, quindi, riporta un rischio tre volte e mezzo più alto di quello riscontrato nelle altre unità locali del settore).
Per le aziende Seveso impegnate nella fabbricazione di apparecchiature elettriche l'indice di *incidenza* è oltre tre volte quello delle altre; tale riscontro è forse attribuibile al fatto che, sebbene sia elevata la specializzazione degli impianti, occorrono continue attività di manutenzione, continui interventi sui quadri di alimentazione e movimentazioni complesse a cui, probabilmente, sono associati numerosi infortuni. Si può supporre, invece, che per quanto concerne le IPS farmaceutiche gli eventi siano legati alla manipolazione di sostanze o a turni continuativi oltreché ai vincoli ergonomici/posturali delicati. Al contrario, gli indici di *incidenza* per le industrie di processo non Seveso sono più elevati per quelle che fabbricano gomme e carta, mentre sono bassi per le stesse che sono soggette a Seveso. Questa discrepanza è forse dovuta al fatto che queste ultime adottano standard HSE più elevati con l'utilizzo obbligatorio di procedure gestionali, permessi di lavoro e qualificazione delle aziende terze.

Settore economico	Indice di	
	$I_{i,IPS}$	$I_{i,altre}$
C 17 - Fabbricazione carta e prodotti di carta	6,1	16,3
C 20 - Fabbricazione prodotti chimici	4,5	9,1
C 21 – Fabbricazione prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici	6,8	4,3
C 22 - Fabbricazione articoli in gomma e materie plastiche	4,5	17,4
C 27 – Fabbricazione apparecch. elettriche e per uso domestico non elettriche	32,9	9,8
G 4675 - Commercio all'ingrosso di prodotti chimici	1,0	4,3

Tabella 3. Indice di *incidenza* degli infortuni riconosciuti (esclusi gli eventi in itinere) 2023 per settore economico e gruppo (IPS vs altre unità locali).

Fonte: elaborazioni su Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni.

La gravità degli infortuni (Tabella 4) è stata misurata attraverso la percentuale degli eventi con esito permanente o mortale sul totale dei casi nell'ambito del settore economico e del gruppo.

Settore economico	% casi gravi	
	$P_{i,IPS}$	$P_{i,altre}$
C 17 - Fabbricazione carta e prodotti di carta	17,07	19,97
C 20 - Fabbricazione prodotti chimici	16,00	16,74
C 21 - Fabbricazione prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici	10,85	13,74
C 22 - Fabbricazione articoli in gomma e materie plastiche	22,44	16,03
C 27 - Fabbricazione apparecch. elettriche e per uso domestico non elettriche	16,67	14,48
G 4675 - Commercio all'ingrosso di prodotti chimici	20,69	19,19

Tabella 4. Percentuale dei casi gravi sul totale degli infortuni riconosciuti (esclusi gli eventi in itinere) 2014-2023 per settore economico e gruppo (IPS vs altre unità locali).

Fonte: elaborazioni su Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni.

La comparazione all'interno di ogni settore economico segnala che, rispetto ad altre attività, per la Fabbricazione articoli in gomma e materie plastiche la differenza tra IPS ed altre unità produttive è più marcata: nelle IPS la quota degli episodi gravi (22%) è 1,4 volte più alta che negli altri stabilimenti (16%).

I settori delle IPS che presentano una gravità di casi maggiore rispetto a quelli non Seveso sono quello della fabbricazione gomma e plastiche e quello del commercio dei prodotti chimici. Tale dato è probabilmente dovuto al fatto che i processi attuati in tali ambiti industriali, per la maggior parte svolti in continuo, sono caratterizzati da elevate temperature ed elevate pressioni, e, seppur caratterizzati da una frequenza più bassa, comportano effetti più gravi.

Il record-linkage tra i dati delle IPS abbinate (già precedentemente identificati) e gli archivi delle malattie professionali dei Flussi informativi Inail ha permesso di ottenere 632 record di patologie denunciate e protocollate nel decennio 2014-2023, di cui 282 riconosciute (Tabella 5).

Individuazione malattie nei Flussi informativi Inail	**Frequenza**
IPS abbinate con i Flussi Inail	291
Malattie *denunciate* (2014-2023) inerenti alle IPS abbinate	632
Malattie *riconosciute* (2014-2023) inerenti alle IPS abbinate	282

Tabella 5. IPS individuate nei Flussi Informativi Inail e relative malattie professionali.
Fonti: ISPRA Portale Seveso e Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni.

Mentre per gli infortuni il rapporto tra i casi riconosciuti e quelli denunciati nelle IPS (77%) è superiore all'analogo rapporto riferito alle altre unità locali (66%), per le malattie succede il contrario: la quota di quelle definite positivamente nelle IPS (45%) è più bassa di quella nelle altre unità dell'industria e dei servizi.

Classi di malattia (aggregazioni delle voci ICD10)	**% sul totale IPS**
Asbestosi e placche pleuriche	17,0
Malattie muscoloscheletriche (escluse m. rachide e s. tunnel carpale)	16,0
Tumori maligni pleura e peritoneo	12,1
Malattie del rachide	11,7
Sordità da rumore	10,3
Tumori maligni apparato respiratorio	8,5
Tumori maligni vescica	8,5
Sindrome tunnel carpale	3,9
Malattie della pelle	3,5
Altri tumori maligni (C26, C37, C49-C65, C69-C92, C94-C97, D02, D05-D09, D39, D46-D47)	2,1
Asma	1,8
Altri disturbi o malattie	4,6
Totale	**100,0**

Tabella 6. Distribuzione percentuale delle malattie professionali riconosciute 2014-2023 nelle IPS.
Fonte: elaborazioni su Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni.

Al contrario della generalità dei comparti economici, tra le malattie riconosciute nelle IPS (Tabella 6) non predominano i problemi muscoloscheletrici, ma emergono le asbestosi e le placche pleuriche (17%). Tali dati riferiscono una importante

correlazione ad esposizioni pregresse ad amianto e ad agenti cancerogeni inalatori. Tali esposizioni sono proprie dell'elevato rischio espositivo connesso a comparti chimici, metallurgici e di trasformazione, settori tipici delle aziende Seveso.
Le malattie muscoloscheletriche e quelle del rachide rappresentano circa il 25% del totale e tale quota indica che, pur essendo settori ad alta specializzazione tecnica, le attività comportano movimentazioni manuali e posture incongrue.
Le categorie dei tumori maligni coprono percentuali via via più contenute, ma indicano anch'esse l'esposizione a fattori chimici tipici di aziende con processi. In effetti, calcolando l'indicatore che misura l'associazione tra patologie e gruppo di stabilimenti, intesi come esposizione al rischio (si veda il paragrafo sulla metodologia), emerge che il PRR delle asbestosi e placche pleuriche per le IPS è pari a 5,99 (Tabella 7): ciò vuol dire che queste malattie in tali ambiti sono sei volte più presenti rispetto alle altre imprese.

Classi di malattia (aggregazioni delle voci ICD10)	**PRR**	**Intervallo di confidenza**	
		l_{inf}	l_{sup}
Tumori maligni vescica	31,09	21,06	45,89
Altri tumori maligni	15,84	7,13	35,20
Tumori maligni apparato respiratorio	7,48	5,09	10,98
Asbestosi e placche pleuriche	5,99	4,63	7,76
Tumori maligni pleura e peritoneo	5,76	4,20	7,90
Asma	7,78	3,25	18,62
Malattie della pelle	4,57	2,48	8,42

Tabella 7. PRR delle malattie professionali 2014-2023 per le IPS.
Fonte: elaborazioni su Flussi informativi per la prevenzione Inail-Regioni.

Ci sono, però, patologie che, pur con una frequenza inferiore, presentano un valore ancora più alto del PRR per gli stabilimenti dell'industria di processo Seveso: si tratta dei tumori maligni della vescica (PRR=3,09), dei tumori maligni non inseriti in altre classi (PRR=15,84) e dei tumori maligni all'apparato respiratorio (PRR=7,48). La questione dovrà essere approfondita attraverso specifici studi epidemiologici, ma i risultati qui esposti suggeriscono un possibile legame tra IPS e tali tumori.
Una ulteriore probabile associazione si rileva tra i tumori maligni di vescica o dell'apparato respiratorio con i settori dell'industria chimica e/o plastica a causa dell'esposizione ed utilizzo di sostanze pericolose nei processi industriali.

5. Conclusioni

Il lavoro si basa su uno studio di coorte retrospettivo, in termini di salute e sicurezza sul lavoro, di un gruppo fisso di aziende presenti o meno sul portale Seveso nel periodo considerato.

Questo focus costituisce una base di partenza per successive indagini in cui vagliare l'impostazione di record-linkage e stimare la rischiosità degli infortuni. Anche le riflessioni sulle malattie e sull'associazione tra queste e il settore economico potrebbero essere sviluppate utilizzando altre fonti di dati dell'Istituto dal momento che gli archivi delle malattie dei Flussi informativi Inail-Regioni riportano per ogni caso di malattia un solo settore (e non sempre quello con un diretto rapporto di causa-effetto). MalProf (sistema di sorveglianza delle malattie professionali gestito da Inail Ricerca), invece, riporta per ogni segnalazione tutta la storia occupazionale del lavoratore indicando, tra i settori economici per i quali ha prestato la sua opera, quelli con nesso positivo con la patologia riscontrata. Il matching con l'elenco degli stabilimenti soggetti a Seveso, pur non agevole, porterebbe benefici a questo tipo di analisi.
Nel complesso, il lavoro ha permesso di rilevare che la maggior parte delle aziende di processo soggette a Seveso è tracciabile nei sistemi informativi Inail e ciò permette, innanzitutto, la disponibilità dei dati che le identificano e, in secondo luogo, la possibilità di effettuare verifiche incrociate tra i dati presenti nelle banche dati dell'Istituto. Inoltre, si può affermare che gli infortuni che coinvolgono gli addetti delle industrie Seveso, seppure poco numerosi, possono comportare impatti notevoli in termini di rischio industriale che però, allo stesso tempo, vengono mitigati grazie agli elevati standard tecnici e gestionali adottati. Le analisi svolte per questa disamina, inoltre, indicano che ci sono alcuni settori da attenzionare maggiormente rispetto ad altri. Ugualmente l'esame sulle patologie suggerisce che sarebbero utili ulteriori approfondimenti epidemiologici da condurre con altre metodologie e su altre fonti riguardanti la presenza di asbestosi, dei tumori, asma e malattie della pelle. D'altro canto, il numero relativamente contenuto delle malattie professionali registrato per le IPS riflette in questi contesti, da un lato, la dimensione ridotta del bacino occupazionale, ma conferma dall'altro la rigorosa applicazione di misure tecniche ed organizzative.

Bibliografia

[1] Inventario degli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose, https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it (ultima consultazione maggio 2025).

[2] Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105, Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.

[3] Paltrinieri, N., Comfort L., Reniers G., Learning about risk: Machine learning for risk assessment, Safety Science, Volume 118, October 2019.

[4] Gnoni M.G., Saleh J.H., How near miss management systems and system safety principles could contribute to support high reliability organizations. In Safety and Reliability - Theory and Applications, European Safety and Reliability Conference 2017.

[5] Ansaldi S. M., Agnello P., Pirone A., Vallerotonda M. R., Bragatto P., Near misses from the Seveso inspections: Use of knowledge-based methods for safety improvement, CET, 2019.
[6] Bragatto P., Ansaldi S. M., Agnello P., Pirone A., Improved safety procedures for small chemical companies. 25th European Safety and Reliability Conference, Esrel 2015.
[7] Simeoni C., Nebbioso A., Di Francesco A., Iacono P., Vallerotonda M. R., Pirone A., Injuries at work: a methodology for outlining and analysing the “Seveso sector”, 33rd European safety and reliability conference, ESREL 2023.
[8] Di Francesco A., Nebbioso A., Pirone A., Simeoni C., Vallerotonda M. R., Focus sugli infortuni negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante, Collana Salute e sicurezza negli ambienti di vita e di lavoro, 2025.
[9] Convenzione quadro tra Inail e la Conferenza delle Regioni e delle Province autonome per l’accesso ai servizi Sinp denominati: flussi informativi, registro delle esposizioni e registro infortuni, 2023.
[10] INAIL. Flussi informativi Inail-Regioni. 2024. Database ad accesso riservato (Ultima consultazione: 13/02/2026).
[11] Banca Dati Statistica Inail, https://www.inail.it/portale/it/attivita-e-servizi/dati-e-statistiche/banca-dati-statistica.html (ultima consultazione marzo 2026).
[12] DM 25 maggio 2016, n. 183, Regolamento recante regole tecniche per la realizzazione e il funzionamento del SINP, nonché le regole per il trattamento dei dati ai sensi dell’articolo 8, comma 4, del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81.
[13] Norma UNI 7249/2007 Statistiche degli infortuni sul lavoro.
[14] Evans SJ, Waller PC, Davis S., Use of proportional reporting ratios (PRRs) for signal generation from spontaneous adverse drug reaction reports. 2001 Oct-Nov;10(6): 483-6.doi: 10.1002/pds.677.
[15] Ranjan A, Tripathi A, Saurabh A, KalaiSelvan V, Gupta R, Gupta SK, Agrawal SS., Signal Detection in Pharmacovigilance: An Application of Subjective Bayesian Inference in Advances in Pharmacoepidemiology & Drug Safety, 2016. DOI:10.4172/2167-1052.1000207.

L’importanza della circolazione interna in un’azienda a rischio di incidente rilevante: innovazione e strategie

R. Barberis[1], R. Santero[2], S. Brezza[2], V. Prete[3], G. Conta[3]

[1]PPG Group, Quattordio (AL)
[2]Santero e Corbellini – Studio Ingegneria Associato
[3]Inail – Uot di Alessandria

Sommario
L’azienda oggetto dello studio persegue l’aggiornamento continuo delle soluzioni adottate in ambito EHS ed intende evolvere ulteriormente nella gestione della circolazione interna, integrando sicurezza, inclusione e comunicazione visiva. L’espansione del footprint produttivo su più livelli ha reso necessario lo sviluppo di un nuovo piano di viabilità, finalizzato alla ridurre il numero di passaggi giornaliero [4]. Il piano è stato progettato per favorire una comprensione immediata delle informazioni, promuovere comportamenti sicuri e garantire l’accessibilità, in linea con la normativa vigente e le esigenze specifiche.
La revisione ha tenuto conto di modifiche strutturali e organizzative, del processo produttivo e ha introdotto una classificazione funzionale della segnaletica organizzata secondo i seguenti principi: identificazione, direzione, orientamento, sicurezza, regolamentazione, informazione digitale/interattiva e accessibilità/inclusione [3]. L’approccio progettuale è orientato alla mitigazione dei rischi associati a scenari incidentali (top event), tenendo conto di un ambiente operativo multietnico e in continua evoluzione.
Il progetto ambisce a migliorare la fruizione degli spazi, ridurre i rischi infortunistici e rafforzare la consapevolezza comportamentale. Anche in situazioni di emergenza, la nuova segnaletica contribuirà a rendere più efficace la risposta. L’iniziativa dimostra come l’ottimizzazione della viabilità interna, combinata con una segnaletica evoluta e inclusiva possa rappresentare uno strumento strategico per la prevenzione, la sicurezza e il miglioramento continuo in un contesto ad alto rischio.

1. Introduzione

Il presente studio riguarda un’applicazione del D.Lgs. 81/08 per minimizzare i rischi dovuti alla circolazione interna in una azienda dove vengono trattate sostanze pericolose.
Il contesto di riferimento è rappresentato da un impianto industriale caratterizzato da elevata complessità impiantistica, articolazione su più livelli e compresenza di flussi eterogenei di traffico (mezzi operativi, logistica interna, personale e visitatori). In tali realtà, tipiche di settori ad alta intensità di processo, la gestione della viabilità interna assume un ruolo strategico contribuendo alla riduzione delle interferenze tra

vettori di rischio e alla limitazione della probabilità di accadimento di eventi incidentali.
L'esperienza maturata dagli autori nell'ambito delle attività della UOT (Unità Operativa Territoriale) evidenzia come una pianificazione strutturata della circolazione interna, integrata con la valutazione dei rischi e con le misure di prevenzione e protezione, costituisca un elemento chiave per il miglioramento continuo delle prestazioni in ambito EHS. In particolare, la mobilità interna di persone, mezzi e materiali deve essere considerata parte integrante del sistema di sicurezza, in quanto potenziale fattore abilitante o mitigante rispetto agli scenari incidentali identificati (top event), nonché elemento determinante per l'efficacia della risposta in emergenza.
Dal punto di vista metodologico, l'elaborazione del Piano si è basata su un approccio multidisciplinare che ha previsto: l'analisi del layout impiantistico e dei flussi logistici, la revisione degli scenari incidentali e delle relative barriere di sicurezza, l'esame delle non conformità e delle raccomandazioni derivanti da audit e ispezioni nonché l'applicazione di criteri di progettazione della segnaletica e della comunicazione visiva ispirati ai principi di ergonomia cognitiva, accessibilità e inclusione. Particolare attenzione è stata inoltre dedicata all'adozione di metodologie tipiche del settore, quali la valutazione delle interferenze, l'analisi dei percorsi critici, l'individuazione delle aree a maggiore esposizione al rischio e l'integrazione con i piani di emergenza ed evacuazione.

2. Metodologia

Considerando che il presente studio rappresenta una sintesi dell'aggiornamento di un Piano di circolazione esistente, lo stesso parte da una condizione di rispetto dei termini di legge, andando a valutare i Rischi residui, secondo uno dei principi fondamentali del D. Lgs. 81/08 e s.m.i., rappresentato dall'adeguamento allo stato dell'arte ed al grado di evoluzione della tecnica della prevenzione e della protezione (rif. art. 18 D. Lgs. 81/08) e definendo tipologia di interventi e priorità dettata dai risultati della Valutazione dei rischi [1].
Si è quindi proceduto attraverso:
1. Censimento ed organizzazione delle aree di lavoro per tipologia, in particolare, accomunate da:
   - Destinazione d'uso (aree produttive/aree di stoccaggio e magazzini/uffici/aree di transito/locali tecnici)
   - Presenza di sostanze pericolose
   - Bassa, media, elevata presenza di traffico (Rif. rappresentazione grafica "Flussi movimentazioni")
2. Definizione dei fattori di rischio secondo la classificazione di cui al paragrafo 3 seguente
3. Calcolo del livello di rischio

4. Definizione degli interventi, in funzione della priorità evidenziata dal livello di rischio di cui sopra

3. Elenco fattori di rischio “Specifici” e fattori di rischio “Predisponenti”

In un contesto caratterizzato da rischi di “incidenti rilevanti”, peculiare valore assume l’introduzione di fattori di rischio “predisponenti”, che insieme ai fattori di rischio “specifici”, attraverso coefficienti moltiplicativi, vanno ad aumentare il dettaglio del calcolo del livello di rischio e a rappresentare tali specifici scenari. In particolare, questi ultimi sono i fattori che intervengono nel prodotto tra “Probabilità” e “Danno”, che va a quantificare il livello di rischio finale.

In particolare, seguono i Fattori di rischio “specifici”:

- Collisione
- Investimento
- Sversamento di sostanze pericolose
- Caduta, inciampo, urti
- Caduta materiale dall’alto
- Incendio
- Elettrocuzione accidentale

Ed i Fattori di rischio “predisponenti”:

- **Stato e condizioni di manutenzione dei luoghi di lavoro**: in particolare condizioni / mantenimento dello stato della pavimentazione, da cui possono dipendere perdite del carico, perdite del controllo del mezzo, ecc.
- **Rumore**: favorisce il rischio collisione / investimento poiché un alto livello di rumore ambientale, ad esempio a causa di processi produttivi / macchine / linee / attività caratterizzate da livelli sonori superiori a 80 dB(A), può essere causa di scarsa udibilità di mezzi in arrivo e di segnalazioni acustiche di mezzi in transito / manovra.
- **Elevati livelli di traffico**: è stato effettuato uno studio relativo ai flussi / movimentazioni / spostamenti con carrelli elevatori nelle aree esterne dello stabilimento, al fine di individuare i percorsi caratterizzati dalla maggior presenza di traffico [8]. Il risultato è rappresentato da un diagramma dedicato, dove si evidenziano i percorsi con colori diversi (verde / giallo / rosso), in funzione del numero di passaggi rilevati. Si riporta in figura n. 1 un estratto relativo all’area di lavoro ripresa nella scheda esemplificativa riportata al paragrafo 4 seguente
- **Pericolosità delle sostanze**: caratteristiche di pericolosità definite dalla scheda di sicurezza delle sostanze manipolate / prodotte (frasi di rischio) [6].
- **Presenza di impianti fissi con fluidi / gas in pressione**.
- **Livello di conoscenza dei luoghi di lavoro da parte del personale**: un basso livello di conoscenza dei luoghi di lavoro e dei processi produttivi può contribuire a un peggioramento del livello di sicurezza.
- **Livello di eccessiva confidenza con i luoghi di lavoro da parte del personale**: un elevato livello di conoscenza dei luoghi di lavoro e dei processi

produttivi e della ripetitività delle azioni quotidiane può contribuire a diminuzione dell'attenzione, da cui dipende il livello di sicurezza.

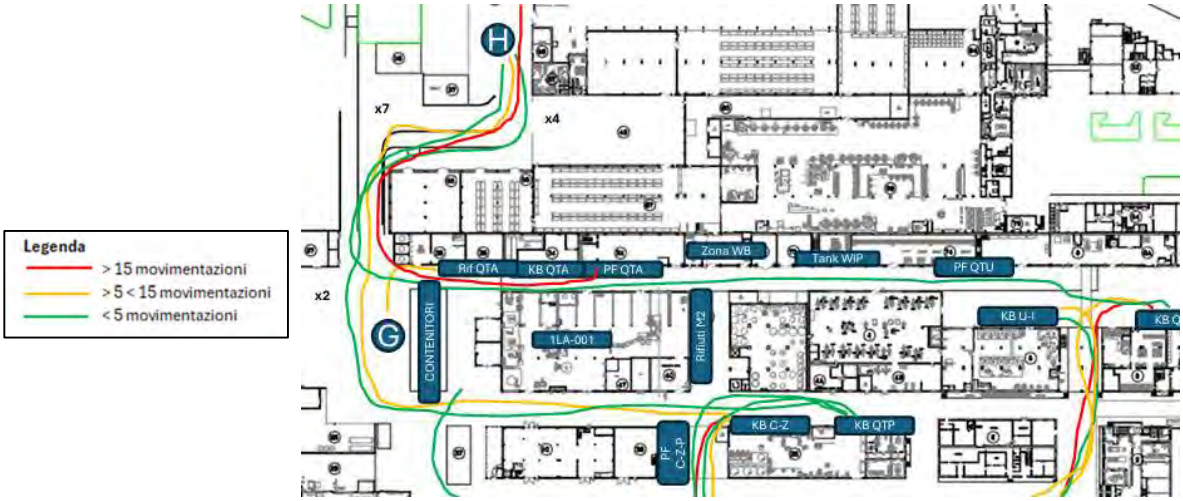


Figura 1. Estratto rappresentazione grafica "Flussi movimentazioni" [8]

4. Calcolo del livello di rischio

La metodologia consolidata per il calcolo del livello di rischio, effettuata ai sensi del D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. [1], prevede l'utilizzo del calcolo del livello di rischio definito come segue: R = P (pericolo) x D (danno), con il principio generale per cui:

- il rischio risulta trascurabile se il pericolo non è presente,
- il rischio risulta trascurabile se il contatto non può avvenire: impossibilità assoluta per l'uomo di venire in contatto con il pericolo.

Il risultato numerico è dato dal prodotto della Probabilità di accadimento (P) per la Gravità del danno (D):

$$R = F \times C \times D = P \times D$$

dove:
R = Rischio;
F = Frequenza di ripetizione dell'evento indesiderato;
C = Probabilità che dall'evento derivi un danno tenendo conto delle misure precauzionali già messe in atto;
D = Ampiezza del danno detta anche Magnitudo;
P = Probabilità dell'evento dannoso tenendo conto delle misure precauzionali già messe in atto.

Come sopra accennato, dai rischi "predisponenti" sopradescritti ricaviamo coefficienti moltiplicativi, che intervengono nella formula di calcolo del livello di rischio, andando ad amplificare i fattori "probabilità" e "danno", come nella ripartizione sottoelencata:

- Stato e condizioni di manutenzione dei luoghi di lavoro
- Rumore
- Elevati livelli di traffico
- Livello di conoscenza dei luoghi di lavoro da parte del personale
- Livello di eccessiva confidenza dei luoghi di lavoro da parte del personale

sono considerati fattori amplificativi della **probabilità di accadimento** dell'evento, mentre:

- Pericolosità delle sostanze (infiammabilità, esplosività, pericolo per la salute, ecc.)
- Presenza di impianti con fluidi / gas in pressione

sono considerati elementi amplificativi del potenziale **danno**.
Dalla combinazione delle due scale (P x D) in una matrice si ottiene la Matrice dei rischi sotto riportata in tabella n. 1.

		Danno					
		1	2	3	4	5	6
Probabilità	1	1	2	3	4	5	6
	2	2	4	6	8	10	12
	3	3	6	9	12	15	18
	4	4	8	12	16	20	24
	5	5	10	15	20	25	30
	6	6	12	18	24	30	36

Tabella n. 1: Matrice dei rischi

5. Misure di intervento

Si procede quindi definendo misure di intervento, sia in termini di priorità che di tipologia, in funzione dei fattori che determinano il calcolo del livello di rischio di cui al paragrafo 3, secondo il seguente elenco esemplificativo:

- Aree di passaggio caratterizzate da elevata densità di transito di mezzi:
  - Definizione di percorsi alternativi atti a ridurre il numero di passaggi giornaliero, attraverso introduzione di senso unico, semaforo, ecc. [3]
  - Dotazione ai trasportatori di specifica applicazione per la prenotazione degli accessi, atta a ridurre le attese e presenza di mezzi in coda
  - Ottimizzazione degli approvvigionamenti di materia prima, prodotto semilavorato e prodotto finito ai reparti, al fine di concentrare il più possibile i materiali trasportati, riducendo il numero di viaggi
- Stato e conservazione della pavimentazione: definizione di procedure di controllo oggettive volte alla verifica della presenza di pavimentazione sconnessa, buche, superfici scivolose, ecc. (procedura con checklist)
- Cartellonistica, diversificata per tipologia di destinazione d'uso:
  - Identificazione: Cartello Nome reparto con colore sfondo o carattere in funzione della tipologia di reparto, secondo i principi della psicologia cromatica, tenendo conto che dell'utilizzo di combinazioni cromatiche ad alto contrasto, al fine di migliorare la leggibilità sia di giorno che di notte, con particolare attenzione alle persone con disabilità visive [5].
  - Direzione: per gli autotrasportatori, percorsi segnalati con linee colorate in funzione della zona di recapito specifica per la tipologia di materiale (striscia di colore giallo per i mezzi in ingresso che recapitano materie prime /

semilavorati, striscia di colore marrone per i mezzi in uscita che trasportano i prodotti finiti).
    - Prediligere nelle zone esterne, caratterizzate da difficoltà a garantire adeguata illuminazione, l'utilizzo di percorsi a terra luminosi proiettati.
    - Orientamento: introduzione in zone di zone di accesso / uscita, incroci strategici, ecc. di planimetrie digitali interattive collocate su totem di facile e intuitivo utilizzo (eventuale utilizzo di realtà aumentata), anche da parte di soggetti con potenziali disabilità
    - Segnaletica di Sicurezza
    - Segnaletica Regolamentativa
    - Segnaletica Informativa
    - Segnaletica Digitale e Interattiva
    - Segnaletica per Accessibilità e Inclusione: es. zone di riposo e ristoro
- Procedure a garanzia del mantenimento della cartellonistica
- Dispositivi di segnalazione led per carrelli elevatori (es. proiezione sul pavimento di linee di sicurezza ai lati del carrello elevatore / punto che segnala l'avvicinamento del carrello)

6. Valutazione del rischio - Conclusioni

Il risultato del presente studio è definire misure di intervento specifiche per ciascun luogo di lavoro, al fine di minimizzare il livello di rischio residuo.
Segue una scheda esemplificativa dell'applicazione di principi metodologici sopra espressi, applicati ad un'area esterna aziendale (piazzale B).

REPARTO: AREE ESTERNE: PIAZZALE B (AREA DI CARICO / SCARICO AUTOMEZZI, BAIA DI CARICO)	**SCHEDA N. 1**	

FATTORI DI RISCHIO "SPECIFICI"	COLLISIONE TRA MEZZI DI TRASPORTO E SOLLEVAMENTO
	RISCHIO DI INVESTIMENTO PER ESPOSIZIONE A TRAFFICO
	SVERSAMENTO DI SOSTANZE PERICOLOSE
	CADUTA, INCIAMPO, SCIVOLAMENTO, URTI
	CADUTA MATERIALE DALL'ALTO
	INCENDIO
	ELETTROCUZIONE ACCIDENTALE
FATTORI DI RISCHIO "PREDISPONENTI"	STATO E CONDIZIONI DI MANUTENZIONE DEI LUOGHI DI LAVORO
	RUMORE
	PERCORSI CON MAGGIOR FREQUENZA DI PASSAGGI
	LIVELLO DI CONOSCENZA DEI LUOGHI DI LAVORO DA PARTE DEL PERSONALE
	LIVELLO DI ECCESSIVA CONFIDENZA DEI LUOGHI DI LAVORO
	AGENTI CHIMICI PERICOLOSI
	FLUIDI E GAS IN PRESSIONE

A titolo esemplificativo, si riporta di seguito un estratto della valutazione del rischio e definizione delle misure di intervento riferite all'area esterna, per i rischi "collisione", "investimento" e "sversamento di sostanze pericolose".

VALUTAZIONE DEL RISCHIO E DEFINIZIONE MISURE DI INTERVENTO								
FATTORI DI RISCHIO	**MATRICE DEI RISCHI**			**UDIBILITA' SEGNALI ACUSTICI (Rif. Poster di reparto)**	**CARTELLONISTICA**	**PROCEDURE**	**MISURE DI INTERVENTO**	**LOCALIZZAZIONE**
	P	**D**	**R**					
COLLISIONE TRA MEZZI DI TRASPORTO E SOLLEVAMENTO	3	6	18			EMSOP 036 EMSOP 061 EMSOP 062 Procedura garanzia mantenimento cartellonistica	Obbligo mezzi procedere a passo d'uomo	Tutte le aree esterne, vie di transito e manovra, incroci
							Senso unico di circolazione	Piazzale B
							Precedenza a mezzi in uscita	Baie di carico
							Senso unico alternato (consentito il transito di un solo mezzo alla volta)	Zona di carico/scarico
							Dispositivo semaforico	Rif. Planimetria
							Percorso segnalato con segnaletica orizzontale (striscia colorata)	Aree esterne di transito
							Dispositivi di segnalazione led per carrelli elevatori	-
							(Rif. Planimetria n. 00 Aree esterne - Piano circolazione aziendale)	
INVESTIMENTO PER ESPOSIZIONE A TRAFFICO	3	6	18			EMSOP 036 EMSOP 061 EMSOP 062 Procedura garanzia mantenimento cartellonistica	Percorso pedonale (con ausilio di percorsi a terra luminosi proiettati ove necessita per aumentare la visibilità)	Aree di carico / scarico e baia di carico
							Totem con planimetria digitale interattiva	Tutte le aree esterne
							(Rif. Planimetria n. 00 Aree esterne - Piano circolazione aziendale)	
SVERSAMENTO SOSTANZE PERICOLOSE	3	5	15	N.A.		EMSOP041 PEI	Materiale assorbente [6]	Aree di carico / scarico e baia di carico

Nel corso delle verifiche ispettive condotte ai sensi del D. Lgs. 105/2015, l'osservazione diretta sul campo ha evidenziato come le criticità più ricorrenti fossero riconducibili all'interferenze tra flussi operativi differenti, all'inadeguatezza della segnaletica e, non da ultimo, all'insufficiente diffusione e comprensione delle procedure da parte degli operatori.
In questo quadro, la circolazione interna non può essere considerata un mero aspetto logistico, ma deve essere concepita, progettata e gestita come un fattore strutturale e determinante per la prevenzione dei rischi agendo in modo significativo sulla gestione complessiva della sicurezza.
In tale prospettiva, la progettazione e gestione dei flussi interni richiedono un approccio integrato, fondato su una pianificazione rigorosa, su strumenti comunicativi efficaci e su un coinvolgimento attivo del personale. La formazione continua e partecipata si configura come un aspetto essenziale per consolidare la consapevolezza operativa e favorire la segnalazione tempestiva di anomalie, contribuendo in modo significativo al rafforzamento della cultura della sicurezza e a migliorare l'efficacia delle misure adottate.
Infine, l'adozione di meccanismi strutturati di riesame, quali audit periodici e simulazioni di scenari, risulta necessaria per garantire l'adeguatezza dinamica dei piani di circolazione interna rispetto all'evoluzione degli impianti, dei processi produttivi e dei rischi associati attraverso un meccanismo di miglioramento continuo.
In conclusione, la circolazione interna si configura come un ambito strategico e trasversale per la prevenzione degli incidenti rilevanti, nel quale innovazione tecnologica, assetti organizzativi e processi formativi devono integrarsi in modo sinergico all'interno di un sistema coerente ed efficace.

Bibliografia

[1] D.Lgs. 81/08 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro"
[2] D.Lgs. 105/2015 "Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose"
[3] D.P.R. 16/02/1992 N. 495 "Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada"
[4] Decreto 22/01/2019 "Individuazione della procedure di revisione, integrazione e apposizione della segnaletica stradale destinata alle attività lavorative che si svolgono in presenza di traffico veicolare"
[5] UNI EN ISO 7010:2023 "Segni grafici - Colori e segnali di sicurezza - Segnali di sicurezza registrati"
[6] UNI/TS 11886-1:2022 e UNI/TR 11886-2:2022 "Protezioni antiurto in ambito industriale"
[7] Regolamento UE. N. 878/2020 (Schede di Sicurezza)
[8] Studio "Spaghetti chart" eseguito a febbraio del 2025 dall'ente PROCESS ENGINEER

Integrity Operating Windows intelligenti: dalla sorveglianza statica alla gestione predittiva e in tempo reale dell'integrità degli asset

A. Mura[1], A. Rubinato[1]

[1] Antea S.r.l.

Sommario
Il mantenimento dell'integrità meccanica degli impianti industriali è sempre più sfidante a causa dell'invecchiamento delle attrezzature, dei budget ridotti e dei flussi crescenti di dati complessi. Gli approcci tradizionali, basati su ispezioni prescrittive e modelli RBI a intervalli fissi, risultano spesso inefficaci, portando a interventi superflui o ritardi critici, con conseguenti aumenti dei costi operativi e dei downtime non pianificati. Studi recenti evidenziano che la mancanza di dati operativi in tempo reale può generare fino al 30% di costi aggiuntivi dovuti a over-maintenance.
Le Intelligent Integrity Operating Windows (IOW) rappresentano una soluzione avanzata, trasformando la sorveglianza statica in un sistema dinamico e predittivo. Integrando IIoT e Intelligenza Artificiale, queste IOW elaborano dati in tempo reale provenienti da DCS, sensori, laboratori, ispezioni e rilievi in campo, aggiornando automaticamente i limiti operativi e generando alert immediati in caso di deviazioni. La combinazione con strategie RBI in tempo reale consente valutazioni di rischio più precise e pianificazioni ispettive ottimizzate.
L'adozione di IOW intelligenti conformi ad API 584 [1] consente di ridurre fino al 30% i costi di manutenzione e ispezione, migliorando la tempestività degli interventi e limitando le attività superflue. Questi sistemi basati su dati multi-sorgente supportano decisioni operative più accurate, incrementando sicurezza, disponibilità degli impianti ed efficienza complessiva. In sintesi, le Intelligent IOW superano i limiti degli approcci tradizionali, offrendo un modello predittivo e reattivo per la gestione dell'integrità degli asset nell'industria 4.0.

1. Il costo degli approcci tradizionali nella gestione dell'integrità degli asset

Negli ultimi anni, il costo del downtime non pianificato è diventato un tema critico per le industrie asset-intensive come Oil & Gas, petrolchimico e chimico. Studi recenti mostrano che un'impresa petrolifera può subire circa 27 giorni di downtime non pianificato all'anno, con perdite finanziarie che arrivano fino a 38 milioni di dollari, e in casi estremi possono superare gli 88 milioni di dollari per piattaforma. La maggioranza delle aziende utilizza ancora strategie di manutenzione reattiva o basate su intervalli di tempo fissi, mentre meno del 24% adotta approcci predittivi o basati sui dati [2].
A livello globale, il costo cumulativo del downtime non pianificato tra le industrie di processo è stimato nell'ordine di 1 trilione di dollari all'anno, con impatti significativi

su produttività, ricavi e affidabilità degli impianti [3]. Anche in Europa, i dati confermano la gravità del problema: indagini condotte da ABB evidenziano che oltre il 65% delle aziende affronta interruzioni non programmate almeno una volta al mese, con costi che possono arrivare fino a 125.000 dollari per ora di downtime [4].
In risposta a questa criticità, il mercato della manutenzione predittiva sta registrando una crescita significativa: si stima che nel 2025 il mercato globale raggiungerà circa 7,5 miliardi di dollari, riflettendo un'adozione crescente di tecnologie di monitoraggio avanzato e intelligenza artificiale [5]. L'adozione di soluzioni predittive non è quindi solo una tendenza tecnologica, ma una risposta concreta alla necessità di ridurre i costi, aumentare la continuità operativa e ottimizzare l'allocazione delle risorse.
Questi dati evidenziano come gli approcci tradizionali, basati su valutazioni statiche dello stato di integrità e su manutenzione reattiva o a intervalli fissi, risultino inefficaci e costosi. Le conseguenze pratiche includono:

- costi elevati dovuti alla manutenzione reattiva;
- scarsa flessibilità nell'adattarsi a variazioni di processo o condizioni operative;
- allocazione inefficiente delle risorse ispettive;
- ritardi nell'identificazione del degrado degli asset.

In sintesi, la gestione tradizionale dell'integrità degli asset risulta poco reattiva rispetto alla complessità operativa attuale. Solo attraverso strategie innovative, supportate da manutenzione predittiva e tecnologie digitali avanzate, le aziende possono migliorare l'affidabilità degli asset, ridurre i downtime e rafforzare la resilienza operativa nel lungo periodo.

2. Integrity Operating Windows (IOW): il collegamento tra processo e integrità degli asset

Le Integrity Operating Windows (IOW) rappresentano uno strumento chiave per colmare il divario tra process intelligence e risposta di integrità, trasformando i dati di processo in informazioni operative utili per la protezione degli asset. Le IOW definiscono limiti operativi predefiniti sui parametri di processo che hanno un impatto diretto sull'integrità delle apparecchiature, consentendo di mantenere gli impianti entro condizioni di esercizio sicure, affidabili e sostenibili nel tempo.
L'obiettivo principale delle IOW non è solo il rispetto dei limiti di processo, ma l'anticipazione dei meccanismi di degrado. In questo senso, le IOW fungono da indicatori precoci di potenziali problemi di integrità, permettendo agli operatori di intervenire prima che le deviazioni operative si traducano in danni materiali o perdita di contenimento.

2.1 Classificazione delle IOW secondo API 584

Lo standard API RP 584, come rappresentato in figura 1, classifica le IOW in tre categorie, in funzione della velocità e della severità con cui il superamento dei limiti può influire sull'integrità degli asset:

- Critical IOW: Parametri per i quali il superamento dei limiti può portare a un rapido deterioramento dell'attrezzatura, tipicamente nell'arco di ore o giorni. Queste IOW richiedono una risposta immediata, poiché il rischio di danni gravi o di eventi di sicurezza aumenta rapidamente.
- Standard IOW: Parametri il cui superamento, se protratto nel tempo, causa un incremento del tasso di degradazione dell'asset. Gli effetti si manifestano generalmente in un periodo di settimane o mesi e richiedono azioni correttive pianificate per prevenire danni a medio termine.
- Informational IOW: Parametri monitorati principalmente per individuare meccanismi di danno a lungo termine. Pur non richiedendo un intervento immediato, forniscono informazioni preziose per l'analisi delle tendenze e la pianificazione strategica della manutenzione.

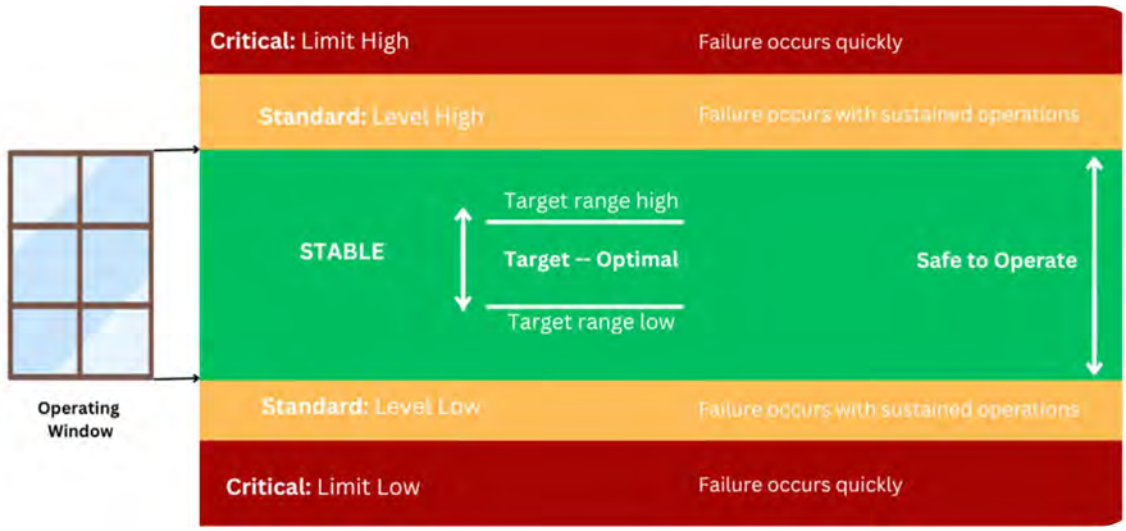


Figura 1. Suddivisione delle IOW secondo API 584

2.2 Ruolo delle IOW nella Mechanical Integrity (MI)

Le IOW svolgono un ruolo centrale nei programmi di Mechanical Integrity, in particolare nel contesto degli standard API 510 [6], 570 [7] e 653 [8]. Esse forniscono input fondamentali per lo sviluppo e l'aggiornamento dei piani ispettivi, assicurando che le attività di ispezione siano allineate alle reali condizioni operative degli asset.

Le segnalazioni di superamento delle IOW consentono agli operatori di adottare un approccio proattivo alla manutenzione, spostando il focus dalla reazione al guasto alla prevenzione del degrado. Le informazioni derivate dal monitoraggio delle IOW supportano inoltre la prioritizzazione delle attività di ispezione e manutenzione, permettendo un utilizzo più efficiente delle risorse disponibili.

2.3 Integrazione delle IOW nei programmi di Risk Based Inspection (RBI)

Nei programmi di Risk Based Inspection (RBI), come definiti dallo standard API 581 [9], le IOW rappresentano un elemento abilitante per una valutazione del rischio più accurata. Il monitoraggio delle deviazioni rispetto alle IOW consente di identificare condizioni operative che aumentano la Probability of Failure (PoF), influenzando direttamente la priorità e la frequenza delle ispezioni.

Incorporando le informazioni derivanti dalle IOW nei modelli RBI, è possibile:

- individuare tempestivamente aree a rischio crescente;
- affinare la priorità delle ispezioni in funzione delle reali condizioni operative;
- migliorare l'accuratezza complessiva delle valutazioni di rischio.

In sintesi, le Integrity Operating Windows non sono semplici limiti operativi, ma un meccanismo strutturato di collegamento tra processo, integrità e rischio, che consente alle organizzazioni di evolvere verso una gestione dell'integrità degli asset più dinamica, predittiva e basata sui dati.

3. Limiti degli approcci tradizionali alla gestione dell'integrità

Gli approcci tradizionali alla gestione dell'integrità degli asset e delle Integrity Operating Windows (IOW) presentano numerose criticità che ne limitano l'efficacia in contesti industriali complessi. In molti casi, gli operatori di sala controllo sono esposti a un elevato numero di allarmi che non mostrano una correlazione chiara e immediata con il reale degrado degli asset; ciò può portare a fenomeni di alarm fatigue e a una progressiva desensibilizzazione, riducendo la capacità di riconoscere tempestivamente eventi realmente critici. Inoltre, i sistemi tradizionali sono spesso privi di dashboard intuitive e non risultano integrati con strumenti avanzati quali digital twin, sistemi di controllo o piattaforme di Asset Integrity Management, limitando la situational awareness degli operatori e ostacolando la collaborazione tra funzioni operative, ispettive e ingegneristiche.

Un ulteriore limite rilevante è rappresentato dalla scarsa integrazione tra le IOW e i programmi di Risk-Based Inspection (RBI). Le violazioni delle finestre operative raramente attivano in modo automatico una rivalutazione delle priorità ispettive o un aggiornamento dei modelli di rischio, creando un disallineamento tra ciò che accade in tempo reale sul campo e il profilo di rischio formalmente gestito. I sistemi IOW statici, inoltre, difficilmente includono meccanismi strutturati di notifica ed escalation verso i team multidisciplinari: mancano logiche di instradamento intelligente delle informazioni, collegamenti con i modelli di rischio di major incident (MI) e workflow integrati per la presa in carico degli eventi.

Queste carenze rendono l'approccio prevalentemente reattivo, generando un pericoloso ritardo tra la rilevazione dell'evento e la risposta ingegneristica. In definitiva, l'efficacia delle decisioni in ambito di Asset Integrity dipende fortemente

dalla qualità, tempestività e rilevanza delle informazioni effettivamente ricevute dalle persone coinvolte nei processi decisionali.

4. L'accessibilità dei dati oggi

I recenti progressi nella sensoristica e nell'analisi dei dati hanno aumentato in modo significativo la disponibilità di informazioni di processo in tempo reale, trasformando profondamente la gestione della manutenzione e dell'Asset Integrity. Parametri operativi, condizioni ambientali e segnali di degrado possono oggi essere acquisiti e analizzati con elevata frequenza e dettaglio. Parallelamente, la crescente pressione normativa e l'evoluzione degli standard industriali richiedono strategie di manutenzione sempre più proattive, basate su evidenze oggettive e su una gestione dinamica del rischio.

In questo contesto, un ruolo centrale è svolto dall'integrazione delle diverse fonti di dato all'interno delle moderne piattaforme di Asset Integrity Management. I risultati ispettivi, i dati di spessore, le informazioni sulla protezione catodica e sui trattamenti anticorrosivi, così come i dati di processo provenienti dagli historian dei sistemi DCS (ad esempio AVEVA PI), sono oggi disponibili in modo strutturato e direttamente utilizzabili. A questi si aggiungono i dati di laboratorio e le informazioni provenienti dai sistemi CMMS/EAM, relativi a interventi manutentivi, guasti e storico operativo, contribuendo a una visione complessiva dell'integrità degli asset.

Alla luce di questa ampia disponibilità di dati eterogenei, l'adozione di modelli di controllo statici risulta sempre meno giustificata. Le tecnologie attuali consentono alle Integrity Operating Windows di evolvere da semplici limiti operativi a soglie dinamiche e intelligenti, alimentate da dati in tempo reale, contestualizzate sui meccanismi di danneggiamento e collegate a trigger ispettivi e manutentivi. Questo approccio riduce il divario tra monitoraggio operativo e gestione del rischio, supportando decisioni più tempestive ed efficaci lungo l'intero ciclo di vita dell'impianto.

5. IOW Intelligenti

Le Integrity Operating Windows (IOW) intelligenti rappresentano un'evoluzione degli approcci tradizionali, trasformando limiti operativi statici in strumenti dinamici, adattivi e orientati al rischio. Questa evoluzione è resa possibile dall'adozione delle tecnologie di Industrial Internet of Things (IIoT), che consentono l'integrazione tra dati di processo, integrità, ispezione e manutenzione, colmando il divario tra sistemi eterogenei.

Il prerequisito fondamentale per l'implementazione delle IOW intelligenti è l'unificazione delle fonti dati. L'integrazione tra piattaforme di Asset Integrity Management, sistemi di controllo di processo, historian, CMMS e strumenti di laboratorio permette di costruire una visione olistica dell'asset. Su questa base, dashboard in tempo reale forniscono visibilità continua sullo stato delle IOW e dei

parametri monitorati, migliorando la consapevolezza situazionale e la collaborazione tra le diverse funzioni.
Guidate da segnali operativi in tempo reale, le IOW intelligenti consentono di intercettare non solo il superamento dei limiti, ma anche l'avvicinamento alle soglie critiche, segnalando variazioni nel profilo di rischio dell'asset. Il sistema può quindi attivare notifiche automatiche ai ruoli coinvolti e supportare decisioni rapide e informate tramite la visualizzazione immediata dei dati contestualizzati.
Se integrate con un Digital Twin tridimensionale, le IOW intelligenti consentono inoltre valutazioni, simulazioni e pianificazioni anche da remoto. Il digital twin aggrega e contestualizza i dati in una replica virtuale dinamica dell'asset, fornendo una visione condivisa e in tempo reale delle condizioni operative e dei livelli di rischio, a supporto di azioni correttive tempestive e decisioni basate sui dati.

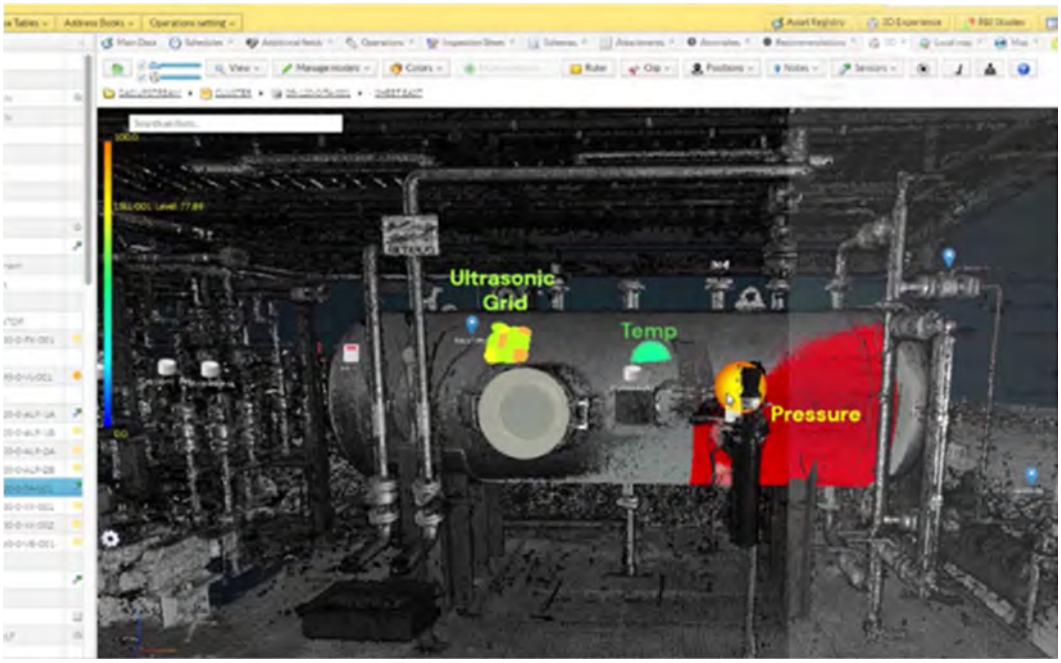


Figura 2. Visualizzazione delle IOW in un digital twin tridimensionale

Un elemento distintivo delle IOW intelligenti è la loro capacità di alimentare direttamente e in modo continuo le strategie di Risk-Based Inspection (RBI). I parametri monitorati dalle IOW possono infatti essere collegati agli input utilizzati per il calcolo della Probability of Failure (PoF), rendendo il processo RBI dinamico e non più limitato a una valutazione puntuale nel tempo. Le IOW vengono definite e configurate all'interno del software di gestione dell'integrità; il sistema rileva automaticamente le deviazioni, supporta l'aggiornamento automatizzato o assistito delle valutazioni di rischio e consente l'adeguamento dei piani ispettivi e manutentivi in funzione delle nuove condizioni operative, in conformità agli standard API 580/581.

L’accesso continuo a dati integrati, inclusi quelli provenienti dalle IOW, rende possibile un monitoraggio costante delle condizioni operative e ambientali, migliorando l’accuratezza e la tempestività delle valutazioni di rischio. Questo approccio fornisce inoltre le informazioni necessarie per supportare le analisi di Fitness For Service (FFS) secondo API 579 [10], rafforzando i processi decisionali relativi alla gestione dell’asset e alla definizione delle azioni successive più appropriate.
La disponibilità delle IOW intelligenti tramite applicazioni mobile estende ulteriormente il valore di questo modello. Il personale di campo può visualizzare in tempo reale lo stato delle IOW, ricevere notifiche immediate, accedere ai dati storici e contestualizzati e interagire con il sistema per confermare eventi, inserire osservazioni o avviare azioni correttive. Questo rende la gestione dell’integrità e della manutenzione più reattiva, collaborativa e realmente proattiva, contribuendo in modo concreto all’evoluzione verso la Manutenzione 4.0.
Lo schema di condivisione dei dati tra IDMS (Inspection Data Management System), RBI, IOW e altri sistemi integrati è rappresentato in figura 3.

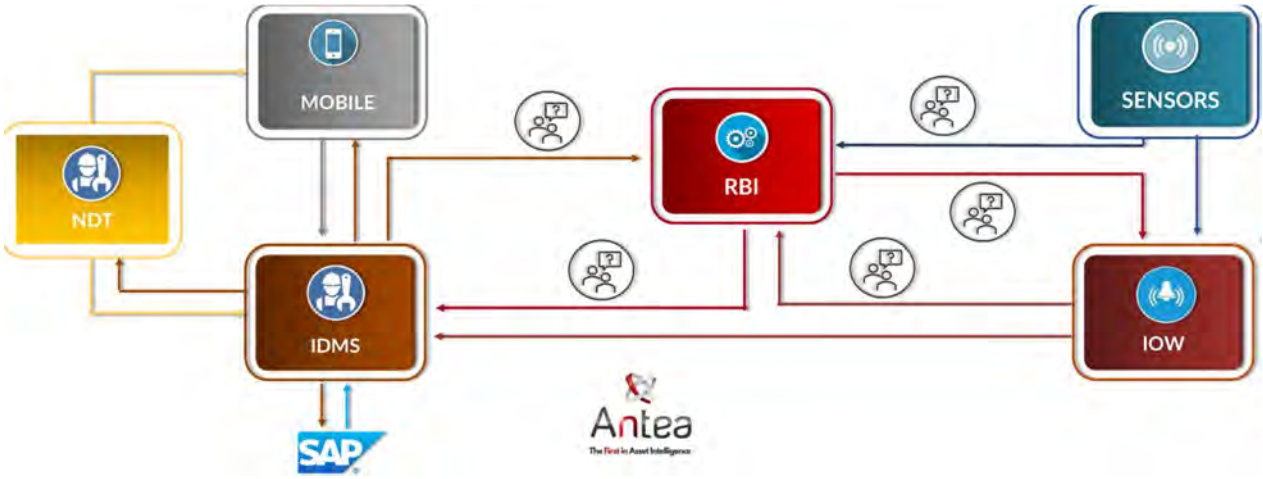


Figura 3. Schema di integrazione delle IOW

6. Esempio applicativo: Heat Exchanger della Crude Unit

Un esempio concreto dell’applicazione delle IOW intelligenti integrate con Asset Integrity Management e Manutenzione riguarda uno scambiatore di calore di una Crude Unit, utilizzato per il raffreddamento dell’effluente del desalter. L’apparecchiatura è realizzata in acciaio al carbonio con cladding in AISI 304 sul fascio tubiero, progettato per una pressione di 150 psig e una temperatura di progetto di circa 150 °C, operante in un servizio caratterizzato da elevato contenuto di cloruri.
I principali meccanismi di danneggiamento associati a questo servizio includono Chloride Stress Corrosion Cracking (SCC) sul cladding in acciaio inox, corrosione

sotto deposito, fouling ed erosione-corrosione. Per questo vengono identificate le IOW di Tabella 1.

Parametro	Limite IOW	Giustificazione
Concentrazione di cloruri	Max 20 ppm	Elevata concentrazione di cloruri favorisce la SCC (corrosione sotto sforzo)
Portata	Min 150 m^3/h	Una bassa portata può causare fouling e corrosione sotto deposito
Temperatura	Max 140 °C	Temperature elevate accelerano la SCC nel rivestimento
Differenziale di pressione	Max 25 psi	Un ΔP elevato può indicare fouling o rischio di rottura dei tubi

Tabella 1. IOW di esempio

A questo punto ipotizziamo che le condizioni rilevate cambino come indicato nella figura 4.

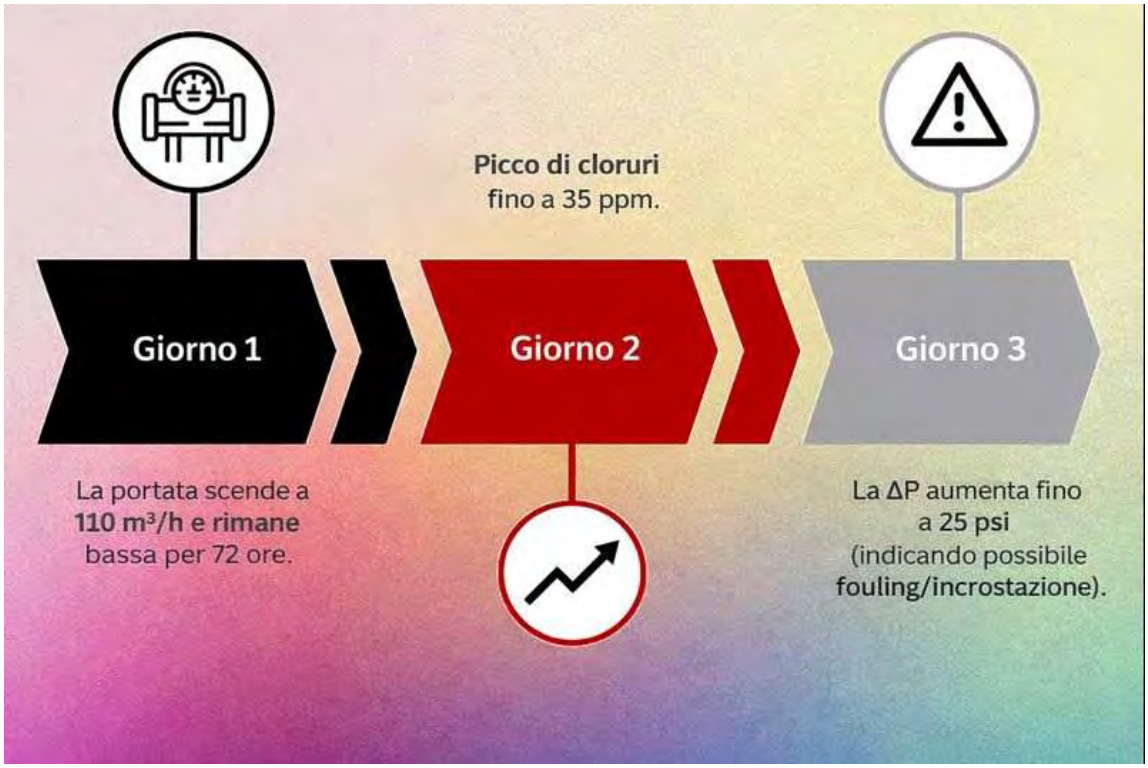


Figura 4. Cambio di condizioni di esempio

Nel caso analizzato, il superamento progressivo di una IOW legata alla combinazione cloruri × tempo a temperatura viene intercettato dal sistema. Il

modello di esposizione identifica un aumento significativo della probabilità di innesco e propagazione accelerata di SCC. Utilizzando i dati di processo reali, il sistema può ricalcolare il profilo di rischio: la matrice di rischio subisce quindi una variazione: la Probability of Failure (PoF) passa da un livello medio a medio-alto, determinando un nuovo ranking di rischio complessivo elevato.
A seguito di questo aggiornamento, il piano ispettivo viene adattato dinamicamente: la prossima ispezione viene anticipata di 12 mesi, passando da una pianificazione originaria a 18 mesi a una nuova scadenza a 6 mesi. Contestualmente, la strategia ispettiva viene rafforzata, prevedendo l'adozione di tecniche NDE più avanzate e mirate, quali Ultrasuoni (UT), Eddy Current sui tubi e replica metallografica sul cladding esterno del tubesheet, in linea con le raccomandazioni degli standard API applicabili.
L'integrazione tra piattaforma di Asset Integrity Management e CMMS consente inoltre la generazione automatica degli ordini di lavoro, la pianificazione delle attività ispettive e la tracciabilità completa delle azioni intraprese. Tutti gli eventi, le decisioni e le modifiche al piano ispettivo vengono documentati a fini di compliance normativa, garantendo coerenza con i requisiti API e supportando audit e verifiche future.
Questo esempio evidenzia come l'adozione di IOW intelligenti e di un approccio dinamico al rischio consenta di trasformare dati di processo in azioni concrete di ispezione e manutenzione, riducendo l'esposizione al rischio, ottimizzando le risorse e migliorando l'affidabilità complessiva dell'impianto.

7. Conclusioni

Nel contesto industriale odierno, i team responsabili della Mechanical Integrity sono sempre più chiamati a gestire risorse limitate, garantendo al contempo la sicurezza e l'affidabilità degli impianti. I metodi di ispezione tradizionali, basati su interventi periodici e reattivi, si rivelano spesso costosi e poco efficienti, limitando la capacità di focalizzare l'attenzione sulle criticità reali.
L'adozione di IOW intelligenti, integrate con piattaforme di Asset Integrity Management, sistemi CMMS e strumenti digitali avanzati come IIoT e Digital Twin, permette di ottimizzare l'efficienza delle ispezioni, concentrando le risorse solo dove sono maggiormente necessarie e anticipando le potenziali criticità. La disponibilità di dati in tempo reale e la loro contestualizzazione migliorano la visibilità del rischio, rendendo possibile l'identificazione tempestiva di minacce all'integrità degli asset e supportando decisioni più informate.
In questo approccio, la gestione degli asset diventa adattiva e data-driven, con insight continuamente aggiornati che consentono di ricalibrare piani di ispezione e manutenzione in funzione delle condizioni operative effettive. Tale metodologia non solo ottimizza i costi, riducendo interventi superflui, ma previene anche guasti costosi, incrementando la sicurezza, la produttività e la resilienza complessiva dell'impianto.

In sintesi, la sinergia tra tecnologie digitali, IOW intelligenti e strategie dinamiche di gestione del rischio offre ai team di Mechanical Integrity un modello operativo più efficace, proattivo e sostenibile, segnando un passo fondamentale verso la Manutenzione 4.0 e l'eccellenza gestionale degli asset industriali.

Bibliografia

[1] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 584, Integrity Operating Windows, 2nd Edition, January 2021.

[2] Hint Global, https://www.hint-global.com/blog/cost-of-unplanned-downtime/, 30/12/2025.

[3] ARC Advisory Group, https://www.isa.org/intech-home/2019/march-april/features/key-performance-metrics-and-indicators-survey-high, 30/12/2025.

[4] ABB, https://new.abb.com/news/detail/107660/abb-survey-reveals-unplanned-downtime-costs-125000-per-hour, 30/12/2025.

[5] FutureMarketReport, https://www.futuremarketreport.com/it/industry-report/predictive-maintenance-solution-market, 30/12/2025.

[6] American Petroleum Institute, API 510, Pressure Vessel Inspection Code, Edizione 11, Ottobre 2022

[7] American Petroleum Institute, API 570, Piping Inspection Code, Edizione 5, Febbraio 2024

[8] American Petroleum Institute, API 653, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Edizione 5, Novembre 2014

[9] American Petroleum Institute, API 581, Risk-Based Inspection Methodology, Edizione 4, Febbraio 2025

[10] American Petroleum Institute, API 579, Fitness-For-Service, Edizione 4, Dicembre 2021

Utilizzo di metodi avanzati di meccanica della frattura per il calcolo delle curve di avviamento (MPT) di apparecchi a pressione in materiale basso-legato e in servizio idrogeno

L. Scano[1]

[1] S.S.I. s.r.l. – Studio Scano - Udine

Sommario

In ambito Oil&Gas, è comune incontrare attrezzature a pressione esercite ad alta pressione e temperatura e in servizio idrogeno. Tali apparecchi, fabbricati tipicamente in acciai basso-legati, sono caratterizzati da elevati spessori di parete e sono, contemporaneamente, esposti al fenomeno dell'infragilimento da idrogeno. Quest'ultimo può condurre sia a meccanismi di crescita sub-critica dei difetti eventualmente presenti nel materiale che a eventi catastrofici di "fast fracture" con conseguente perdita globale di stabilità delle membrature. Inoltre, a causa del range tipico di temperatura in cui tali apparecchi si trovano ad operare (345 – 575 °C), essi sono anche esposti al problema dell'infragilimento da rinvenimento, originato dalla segregazione di elementi parassiti ai bordi del grano cristallino. Essendo questi tipi di infragilimento attivi a bassa temperatura, è fondamentale che tali attrezzature siano quindi avviate in condizioni controllate di pressione-temperatura, individuando le curve limite di avviamento (MPT – Minimum Pressurization Temperature).

In questo lavoro viene presentata una procedura basata su metodi avanzati di meccanica della frattura e sull'Annex 9J dello standard API 579-1 [1] per determinare le curve MPT di attrezzature a pressione in servizio idrogeno. Verrà preso ad esempio un caso studio (reattore ad asse verticale in acciaio Grado 22) che sarà valutato utilizzando metodi standard di meccanica della frattura (Part 9 Level 2 – FAD) e analisi FEM di meccanica della frattura computazionale (Part 9 Level 3).

L'impiego di tali metodiche avanzate rappresenta l'attuale gold-standard tecnico-normativo per la determinazione delle curve MPT, al fine sia della performance che della sicurezza degli apparecchi in servizio idrogeno in ambito Oil&Gas.

1. Nomenclatura

c_H	Concentrazione di idrogeno nella matrice metallica (ppm)
C_{T0}	Coefficiente funzione delle Exemption Curves ASME per il calcolo di T_{0B}
D_i	Diametro interno delle membrature (mm)
$FATT$	Fracture Appearance Transition Temperature (°C)
$HEE\ Index$	Indice di infragilimento da idrogeno
J	Fattore per temper-embrittlement (materiale base)
$K_{I/J}$	Stress Intensity Factor (MPa√m)
K_{mat}	Tenacità del materiale (MPa√m)
K_r	Rapporto tra K_I e K_{mat}
L	Lunghezza della cricca di riferimento (mm)
L_r	Rapporto tra σ_{ref}^{P} e σ_y
$MAWP$	Maximum Allowable Working Pressure (barg)
n	Esponente per HEE Index

P	Pressione interna dell'apparecchio (barg)
P_f	Probabilità di fallimento
P_{H2}	Pressione parziale di idrogeno (kPa)
PS	Pressione massima di progetto (barg)
T	Temperatura (°C)
t	Spessore delle membrature (mm)
T_0	Temperatura di transizione di riferimento (materiale degradato, °C)
T_{0B}	Temperatura di transizione di riferimento (materiale non degradato, °C)
T_{0E}	Temperatura di transizione di riferimento (temper-embrittlement, °C)
T_{0HE}	Temperatura di transizione di riferimento (hydrogen-embrittlement, °C)
T_{0TE}	Temperatura di transizione di riferimento (temper-embrittlement materiale base, °C)
T_{0TEW}	Temperatura di transizione di riferimento (temper-embrittlement saldatur, °C)
T_{IH}	Temperatura critica per crescita sub-critica dei difetti (°C)
$\bar{X}$	Fattore per temper-embrittlement (saldature)
α	Coefficiente per HEE Index
σ_{ref}^{P}	Reference stress carichi primari (MPa)
σ_y	Carico di snervamento (MPa)
σ_{ya}	Carico di snervamento a T ambiente (MPa)

2. Introduzione

Durante l'esercizio, le attrezzature a pressione possono incontrare condizioni ambientali o di funzionamento tali da condurre alla perdita di duttilità dei materiali da costruzione (infragilimento). Quest'ultimo è estremamente pericoloso perché può portare a fenomeni di frattura fragile e di propagazione rapida dei difetti presenti nel materiale, con conseguenze spesso catastrofiche.

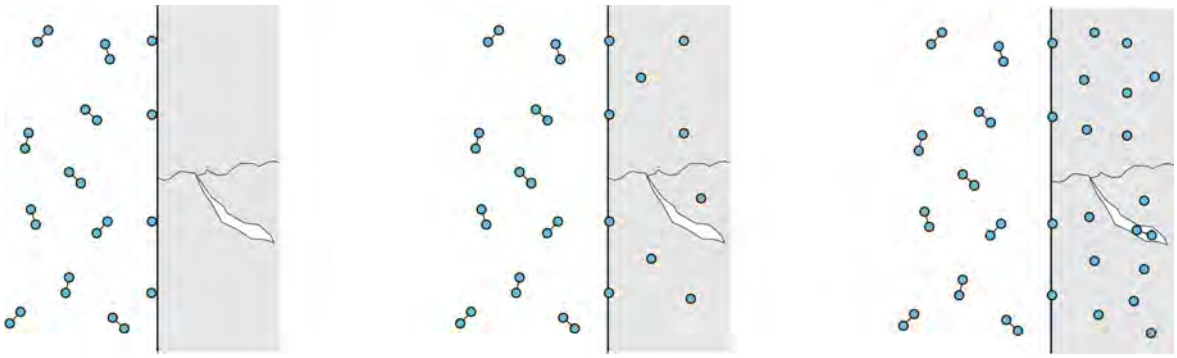
La protezione da frattura fragile è affidata, in prima istanza, ai codici di progettazione, che, in funzione del tipo di materiale e dei dati di progetto in termini di pressione e spessore delle membrature, determinano la minima temperatura ammissibile. In genere, le curve utilizzate in sede di progetto, ad esempio le Exemption Curves ASME VIII-1 [2], sono caratterizzate da diverse limitazioni, tra cui: correlazioni datate e spesso non affidabili tra tenacità e resilienza dei materiali secondo prova Charpy, ipotesi teoriche basate unicamente sulla meccanica della frattura lineare elastica e con considerazioni semplificate sugli effetti di spessore e, soprattutto, incapacità di incorporare gli effetti di infragilimento dovuto al degrado dei materiali in servizio. Per superare queste limitazioni, standard tipo Fitness-For-Service come l'API 579-1, contengono indicazioni precise per calcolare, sulla base di principi solidi di meccanica della frattura, la temperatura minima ammissibile (MAT) in funzione della geometria effettiva del componente, del materiale, della pressione di esercizio e di eventuali meccanismi di infragilimento in esercizio.

In ambito Oil&Gas, in particolare per quanto concerne le attrezzature a pressione di hydroprocessing, diversi fattori possono contribuire all'insorgere di fenomeni di infragilimento dei materiali da costruzione che, viste le elevate temperature di esercizio tipiche, sono normalmente acciai basso-legati. I principali sono l'esposizione ad atmosfere di idrogeno gassoso (hydrogen-embrittlement) e la transizione attraverso temperature critiche per la segregazione di elementi parassiti ai bordi del grano cristallino (temper-embrittlement). L'elevato spessore delle membrature di tali

apparecchi induce, poi, fenomeni di triassialità degli sforzi che possono esacerbare, in termini di tenacità, tali problematiche. A partire dall'edizione 2021 dell'API 579-1, sono state introdotte, all'Annex 9J, delle regole precise per determinare le curve MAT pressione-temperatura per questo tipo di attrezzature in servizio idrogeno. In tale ambito, esse sono conosciute come MPT (Minimum Pressurization Temperature). Questo approccio utilizza esplicitamente metodi avanzati di meccanica della frattura e, considerando che hydrogen e temper-embrittlement sono tipicamente attivi a bassa temperatura, fornisce agli Utilizzatori uno strumento importante per l'avvio e lo spegnimento in sicurezza delle attrezzature, minimizzando i tempi e i costi di fermo-impianto.
Questa memoria, a partire dalla descrizione dei meccanismi di infragilimento e dai metodi classici di prevenzione, presenterà il workflow operativo per la determinazione delle curve MPT secondo la Parte 9 dell'API 579-1, con riferimento anche a un caso-studio.

3. Hydrogen-embrittlement

Il termine infragilimento da idrogeno è una definizione ad ampio spettro che accomuna diversi meccanismi di danneggiamento che colpiscono i materiali metallici posti a contatto con idrogeno gassoso ad elevata pressione. Lo standard API RP 571 [3] definisce l'infragilimento da idrogeno come la perdita di duttilità e di tenacità a frattura dei materiali sensibili, a causa della diffusione di idrogeno atomico nel reticolo cristallino. Questi materiali sono, in particolare, gli acciai basso-legati, gli acciai ad alta resistenza, gli acciai inossidabili serie 400, duplex e alcune leghe di nickel.
Il fenomeno consiste nell'assorbimento e nella successiva diffusione di idrogeno atomico all'interno della matrice cristallina (hydrogen charging) e la concentrazione, con successiva ricomposizione molecolare, dell'idrogeno all'interno delle discontinuità del materiale (cricche, bordi del grano, ecc., Figura 1).



Fase iniziale: assorbimento | Diffusione idrogeno atomico | Ricomposizione idrogeno molecolare

Figura 1. Hydrogen charging and embrittlement.

Per temperature superiori a 150 °C, l'idrogeno rimane diffuso nella matrice cristallina e non origina fenomeni rilevanti di infragilimento. A temperature prossime a quelle ambientali, invece, l'idrogeno diffuso nel reticolo tende ad accumularsi all'apice dei difetti, soprattutto in presenza di stati di sforzo triassiale (elevati spessori). Esso abbassa inoltre l'energia di legame dei piani cristallini, favorendo l'innesco di micro-

cricche (Hydrogen Enhanced DEcohesion – HEDE [4]). Il primo meccanismo di danno indotto da idrogeno è pertanto la frattura instabile trans-granulare (fast fracture). Esiste tuttavia un secondo fenomeno indotto dall'idrogeno diffuso e apparentemente antitetico: l'aumento della plasticità locale originata da un effetto "lubrificante" dell'idrogeno atomico sul moto delle dislocazioni (Hydrogen Enhanced Local Plasticity – HELP [4]). Questo meccanismo, unito a quello decoesivo, favorisce l'emissione di dislocazioni dall'apice dei difetti, incrementando la crescita sub-critica delle cricche con conseguente aumento del crack-growth rate (Adsoption-Induced Dislocation Emission – AIDE [4]). Cricche in apparecchi in servizio idrogeno possono quindi propagare anche in assenza di regime di funzionamento ciclico.
L'infragilimento da idrogeno dipende dalla concentrazione e dalla pressione parziale dell'atmosfera. La concentrazione critica è individuata in 1.0 ppm [1][5] mentre la dipendenza dalla pressione parziale P_{H2} è tipicamente espressa sottoforma dell'indice HEE (Hydrogen Environmental Embrittlement) [6]:

$$HEE\ Index = \alpha \cdot P_{H2}^{-n} \qquad (1)$$

La Figura 2, tratta da [5] e [6], presenta gli effetti della concentrazione e della pressione parziale da idrogeno, in termini di tenacità del materiale e HEE Index, rispettivamente.

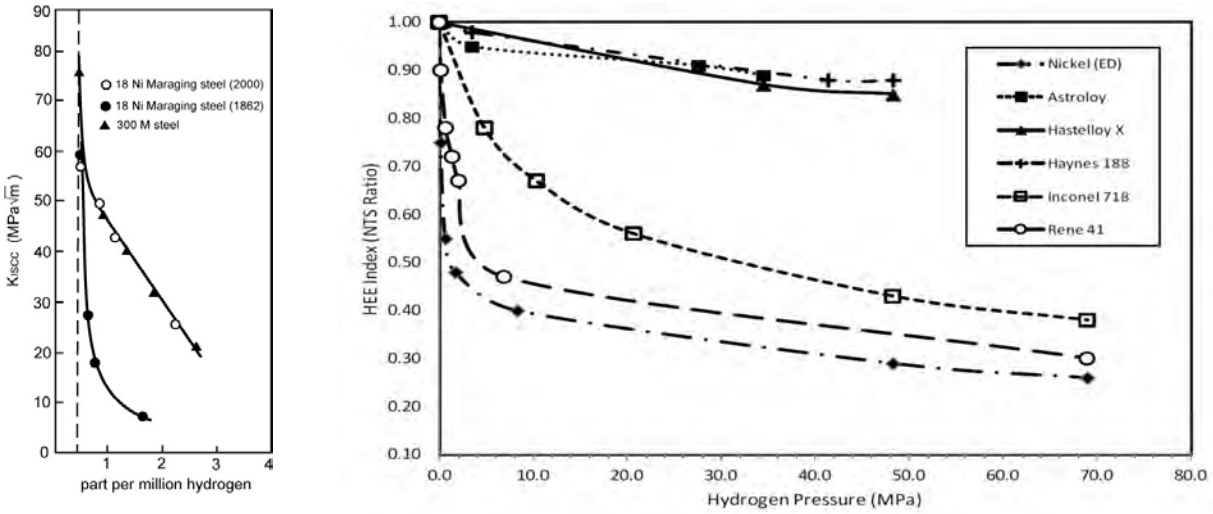


Figura 2. Effetto della concentrazione e della pressione parziale di idrogeno.

4. Temper-embrittlement

Le attrezzature a pressione in servizio di hydroprocessing sono tipicamente esercite a temperature comprese tra 345 e 575 °C. In tale intervallo, alcuni materiali basso-legati, in particolar modo il Grado 22, sono soggetti ad un meccanismo di infragilimento da rinvenimento causato dalla permanenza ad alta temperatura (temper-embrittlement). Come per l'infragilimento da idrogeno, anche quello da rinvenimento non si manifesta normalmente in condizioni di esercizio, a causa dell'elevata tenacità dei materiali in temperatura, ma può presentarsi durante i transitori di avviamento e spegnimento a seguito dell'abbassamento della transizione duttile-fragile e, in particolare, del tratto lower-shelf [7].

Il meccanismo di danno è causato dalla presenza, e successiva precipitazione ai bordi del grano cristallino, di elementi parassiti, principalmente Mn, P, Si e Sn. Eventuali trattamenti termici possono avere, inoltre, un effetto sullo sviluppo del fenomeno. Watanabe [8] ha definito un fattore J per quantificare l'impatto della composizione chimica degli acciai Grado 22 sulla tendenza al temper-embrittlement:

$$J = (\%Mn + \%Si) \cdot (\%P + \%Sn) \cdot 1000 \qquad (2)$$

Maggiore il valore di J, maggiore il rischio. Qualora la composizione dell'acciaio non sia nota, è possibile utilizzare una scala di riferimento empirica elaborata da Iwadate [9] e che raggruppa gli acciai Grado 22 in quattro classi in funzione della data di ipotetica produzione:

- Prima generazione (1965-1972): J ≥ 350
- Seconda generazione (1973-1980): J ≈ 250
- Terza generazione (1981-1987): J ≈ 125
- Quarta generazione (1988-presente): J ≤ 100

Lo stesso Iwadate propone, inoltre, la definizione di un fattore $\overline{X}$, analogo a J ma per il materiale saldato, sulla base degli elementi parassiti P, Sb, Sn e As:

$$\bar{X} = (10 \cdot \%P + 5 \cdot \%Sb + 4 \cdot \%Sn + \%As) \cdot 100 \qquad (3)$$

5. Stabilità dei difetti secondo API 579-1 Part 9

La Parte 9 dello standard API 579-1 utilizza metodi avanzati di meccanica della frattura per valutare la stabilità e la propagazione di difetti affilati (cricche) in attrezzature a pressione. I fattori che influenzano l'analisi sono lo stato di sforzo del componente, dipendente dalla geometria e dalle condizioni di esercizio, la dimensione del difetto, tipicamente determinabile tramite Controlli-Non-Distruttivi (CND) e la tenacità del materiale, suscettibile di effetti di degenerazione.

Al di là di semplici valutazioni di screening (Level 1), la Parte 9 fornisce, per componenti aventi geometria standardizzata, un metodo di calcolo basato su soluzioni tabulate di meccanica della frattura e sul calcolo dello stato di sforzo nel componente non danneggiato (Level 2). La valutazione è formalmente effettuata tramite il diagramma FAD (Failure Assessment Diagram), il cui background teorico è da ricercare nella teoria della plasticità all'apice del difetto nota come strip-yield model e sviluppata da Dugdale negli anni 60 del secolo scorso [10]. La forza dell'approccio FAD è la capacità di verificare, in un unico strumento, tutto il range di possibili cedimenti, dalla frattura fragile al collasso plastico, in funzione del componente, del materiale, delle condizioni di cimento e dei difetti interni (Figura 3). L'assessment viene condotto tramite stress analysis del componente privo di difetti, tramite formule o FEA, e la valutazione dello stress intensity factor K_I e del reference stress relativo ai carichi primari σ^P_{ref} attraverso formule tabulate negli Annex 9B e 9C. Queste ultime sono basate su una estesa campagna di meccanica della frattura computazionale, tuttora in corso.

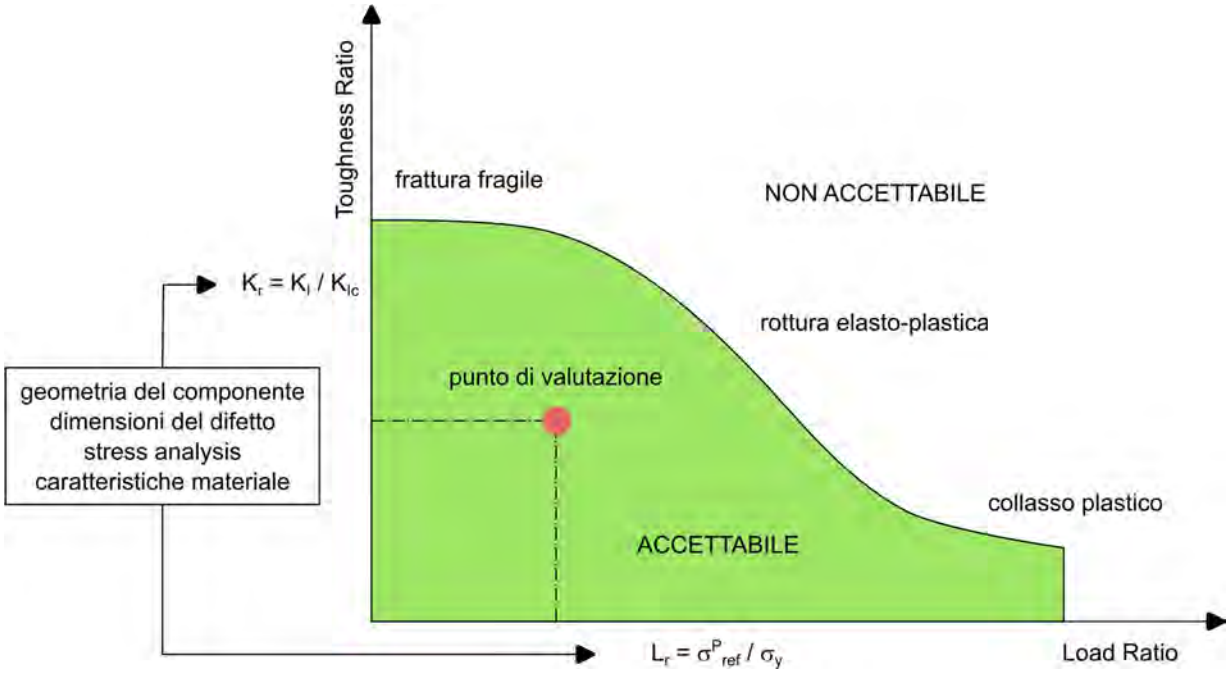


Figura 3. Failure Assessment Diagram.

Nonostante il metodo FAD possegga indubbi vantaggi, non è privo di limitazioni. In particolar modo, è basato su analisi di tipo elastico lineare e sulla classificazione delle tensioni. Le analisi Level 2, inoltre, sono limitate alle sole geometrie tabulate nella Parte 9 dell'API 579-1. Per queste ragioni, nei casi più complessi, è possibile eseguire analisi Level 3 basate sulla meccanica della frattura computazionale in accordo all'Annex 9G, includendo i difetti nei modelli di calcolo numerico e determinando il J-integral e lo stress intensity factor elasto-plastico K_J, che risulta in questo modo confrontabile direttamente con la tenacità del materiale.

6. Approcci storici per il calcolo della MAT

Macejko [11] ha recentemente pubblicato una comprensiva presentazione delle metodologie sviluppate, nel corso degli anni, per determinare la MAT e le curve MPT nelle attrezzature di hydroprocessing.

Considerando che, a livello di codici di progettazione, non vengono fornite indicazioni per il calcolo della MAT, storicamente tale compito è ricaduto, in sede di esercizio, sugli Utilizzatori, che hanno adottato diverse best-practice. Una prassi comune è quella di adottare una singola MAT ad una soglia di pressione pari al 20-30% della MAWP. Tale approccio, ovviamente, non considera esplicitamente le problematiche relative all'infragilimento.

Iwadate [9] ha considerato l'effetto del temper-embrittlement sulla MAT e messo in correlazione il fattore J con la temperatura di transizione FATT, prescrivendo che MAT ≥ FATT per acciai Grado 22 e ≥ FATT+ 20 °C per acciai Grado 11.

Sakai [12] ha invece investigato il ruolo dell'hydrogen-embrittlement, proponendo di incrementare la MAT di 10 °C per ogni 1.0 ppm di idrogeno disciolto nell'acciaio, in aggiunta a ogni altra correzione prevista per il temper-embrittlement.

In tempi più recenti, la normativa tecnica ha presentato approcci più moderni basati sulla meccanica della frattura per il calcolo della MAT. Da citare, in particolare, i WRC Bulletin 562 [13], 599 [14] e la Parte 4 della norma API TP 934F [15]. Quest'ultima ha fornito le basi per il metodo presentato all'Annex 9J dell'API 579-1 che è oggetto della presente memoria.

7. Calcolo delle curve MPT tramite API 579-1

Uno schema di flusso per la determinazione della curva MPT secondo API 579-1 per acciai Grado 22 è presentato alla Figura 4. Il punto di partenza è il calcolo della temperatura di transizione di riferimento T_{0B} per il materiale base non degradato. Questa è la temperatura corrispondente a una tenacità di 100.0 MPa√m sulla curva sperimentale tenacità-temperatura nella regione di transizione (Master Curve). T_{0B} è calcolabile tramite correlazioni semi-empiriche con i dati delle prove di resilienza, se disponibili (9F.4.3.2(b) e (c)), oppure utilizzando le Exemption Curves ASME (coefficiente C_{T0}) in funzione del tenore di zolfo dell'acciaio (9F.4.3.2(a)) e del carico unitario di snervamento a temperatura ambiente σ_{ya}:

%S ≤ 0.01	%S > 0.01	
$T_{0B} = C_{T0} + 0.0958 \cdot \sigma_{ya}$	$T_{0B} = C_{T0} + 0.1021 \cdot \sigma_{ya}$	(4)

La temperatura T_{0B} deve essere quindi corretta per l'effetto del temper e dell'hydrogen-embrittlement. Il primo ha un effetto solo per temperature superiori a 345 °C e prevede il calcolo dei fattori J e $\bar{X}$ sulla base della composizione chimica del materiale base (9F.112, Eq. 3) e di quello saldato. Per il materiale base, se la composizione chimica non è nota, J può essere stimato per materiale "vintage" (9F.4.7.3(a)(1)(ii)) come J = 50 (fabbricazione post 1990), J = 146 (1975 – 1990) e J = 230 (pre 1975). La temperatura di transizione di riferimento per materiale degradato per temper-embrittlement può essere quindi calcolata, per il materiale base e saldato, come (9F.115, 9F.120):

$$T_{0TE} = FATT - 50\,°C \qquad (5)$$

FATT = -30 °C	per J ≤ 50
FATT = 0.8333 · J - 71.667	per 50 < J < 230
FATT = 120 °C	per J ≥ 230

$$T_{0TEW} = FATT - 50\,°C \qquad (6)$$

FATT = -30 °C	per $\bar{X} \le 10$
FATT = 11.538 · $\bar{X}$ – 145.385	per $10 < \bar{X} < 23$
FATT = 120 °C	per $\bar{X} \ge 23$

In caso non sia nota la composizione chimica della saldatura, si suppone una correzione pari a quella del materiale base: $T_{0TEW} = T_{0TE}$.
La temperatura di riferimento finale, pesata per il temper-embrittlement è $T_{0E} = \max(T_{0TE}, T_{0TEW})$.
Essa deve quindi essere, a sua volta, corretta per l'effetto dell'idrogeno, qualora la sua concentrazione c_H nel metallo superi 1.0 ppm. La concentrazione c_H è determinabile in funzione della pressione parziale di idrogeno nella miscela gassosa a contatto col metallo secondo la formula 9J.4:

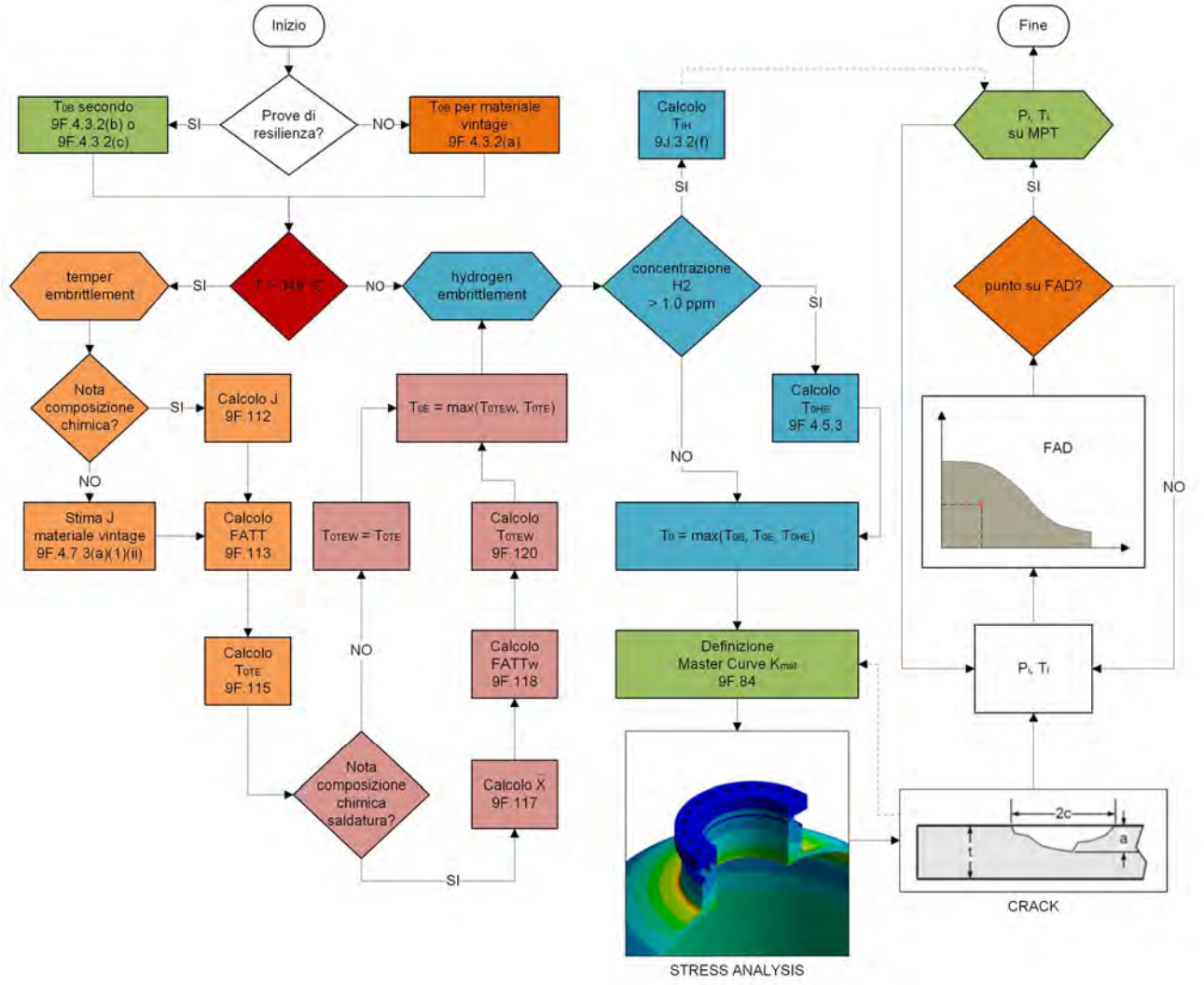


Figura 4. Schema di flusso per il calcolo delle curve MPT per acciai Grado 22.

$$c_H = 3.362\sqrt{P_{H2}} \cdot e^{\left(\frac{-3257}{T+273.15}\right)} \qquad (7)$$

L'effetto dell'hydrogen-embrittlement è quello di spostare verso destra la Master Curve, aumentando la temperatura di transizione di 50 °C per il Grado 22:

$$T_{0HE} = T_{0E} + 50\,°C \qquad (8)$$

La temperatura di riferimento finale, inclusiva degli effetti di infragilimento, è pari a T_0 = max(T_{0E}, T_{0HE}, T_{0B}). Essa è utilizzata per il calcolo della Master Curve secondo l'equazione 9F.84:

$$K_{mat} = 20 + \left(11 + 77 \cdot e^{0.019(T-T_0)}\right) \cdot \left[\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right)\left(\frac{25}{L}\right)\right]^{0.25} \qquad (9)$$

dove L è la lunghezza della cricca di riferimento (150 mm in assenza di dati CND) e P_f la probabilità di fallimento, normalmente ipotizzata pari al 5%.

Nota la tenacità del materiale infragilito, l'analisi prosegue con un calcolo di meccanica della frattura secondo la Parte 9 e approccio Level 2/FAD o Level 3/Annex 9G. Si assume una coppia iniziale P_1/T_1 e si verifica se il punto valutato cade, o meno, sulla curva FAD (o se supera, o meno, i limiti dell'analisi Level 3). In funzione del risultato, la temperatura viene modificata fino a far ricadere il punto valutato sulla curva FAD (o esattamente ai limiti dell'analisi Level 3). In questo modo la coppia P_1/T_i è un punto della curva MPT. Iterando quindi sulla pressione si costruisce tutta la curva.
Infine, l'effetto della crescita sub-critica dei difetti in idrogeno è valutato attraverso la temperatura critica T_{IH}, calcolata in funzione della concentrazione di idrogeno nella matrice. Per acciai ad elevata FATT:

$$T_{IH} = 17.193 + 112.9 \cdot c_H - 44.425 \cdot {c_H}^2 + 9.3309 \cdot {c_H}^3 - 0.7278 \cdot {c_H}^4 \qquad (10)$$

T_{IH} ha un'azione di cut-off della curva ottenuta al 20% e al 100% della pressione massima ammissibile MAWP (Figura 5).

8. Caso-studio: reattore di hydroprocessing

Si presenta un esempio di calcolo delle curve MPT per un apparecchio a pressione in hydrogen-service e i cui dati di progetto sono presentati di seguito.

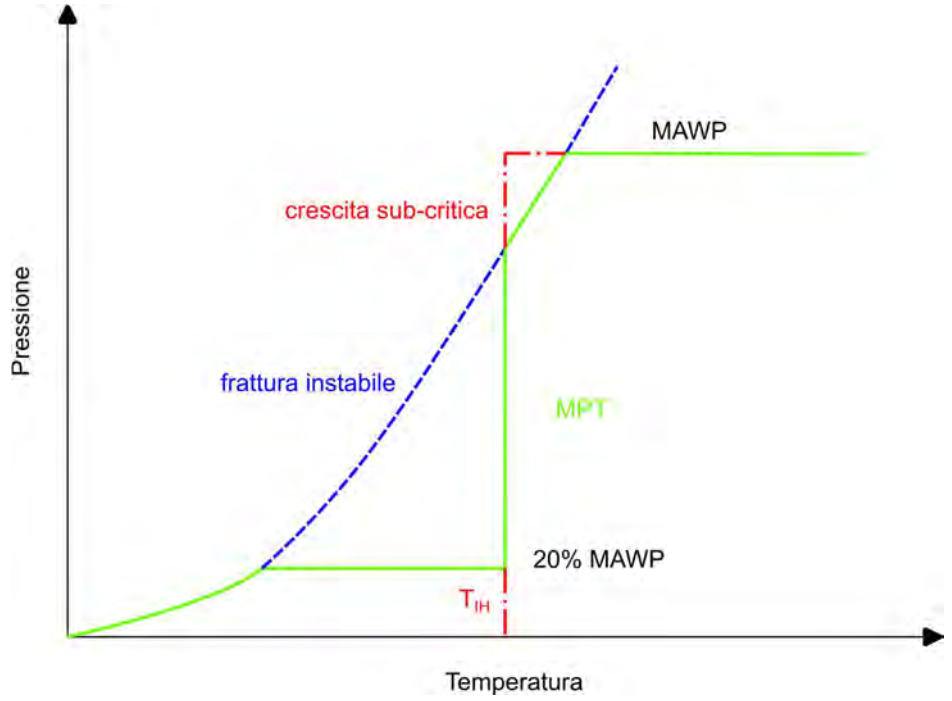


Figura 5. Effetto della crescita sub-critica dei difetti sulla curva MPT.

- Reattore in hydrogen-service
- Materiale da costruzione: ASME SA-387-22-2
- PS = MAWP = 65.0 barg
- Temperatura di progetto: 380 °C
- Massima temperatura di esercizio: 350 °C
- Codice di costruzione: ASME VIII-1
- D_i = 2000 mm
- t = 55.0 mm
- Fondi semiellittici 2:1, t = 55.0 mm
- Inlet nozzle autorinforzante 24” #600
- Outlet nozzle autorinforzante 6” # 600

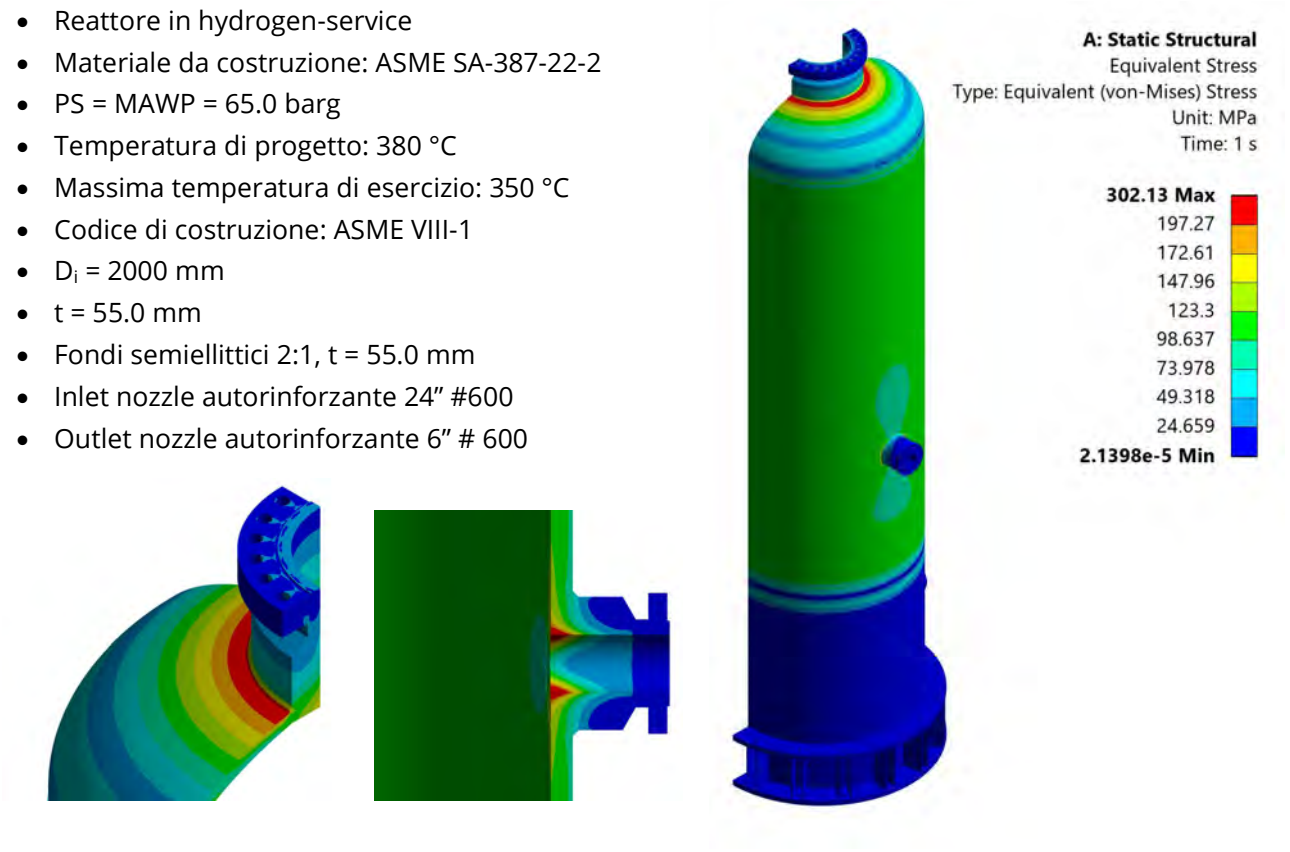


Figura 6. Caso-studio: dati di progetto e stress-analysis.

Una stress-analysis preliminare identifica i due punti critici nelle connessioni dei bocchelli di ingresso/uscita con le membrature principali (Figura 6).
Si calcola la T_{0B} per acciaio con Exemption Curve ASME C e nell’ipotesi di basso tenore di zolfo: T_{0B} = -24.9 °C.
L’apparecchio è potenzialmente soggetto a temper-embrittlement, quindi si calcola il fattore J, la FATT e la temperatura di riferimento corretta T_{0TE} ipotizzando una composizione chimica del materiale base pari a: %Mn = 0.66, %Si = 0.35, %P = 0.025 e %Sn = 0.0. Risulta: J = 252.5, FATT = 138.74 °C, T_{0TE} = 88.74 °C.
Supponendo una pressione parziale di idrogeno nella miscela contenuta pari a 5.0 barg, si ottiene una concentrazione di idrogeno nel metallo c_H = 1.2 ppm. Si applica quindi la correzione per hydrogen-embrittlement ottenendo T_0 = T_{0HE} = 138.74 °C. La Master Curve ottenuta a partire da questa temperatura di transizione del materiale degradato, considerando P_f = 0.05, è riportata alla Figura 7.
Il bocchello radiale da 6” ha una geometria standard coperta dalla Parte 9 dell’API 579-1. È possibile quindi calcolare K_I e σ_{ref}^P per formule (Level 2), utilizzando la stress analysis dei componenti non-criccati. Fissando una coppia arbitraria pressione/temperatura, ad esempio 30.0 barg / 0 °C, si determina K_{mat} dalla Master Curve e quindi si identifica un punto sul FAD al di sotto della curva limite (Figura 8 – triangolo verde). Si aumenta progressivamente la pressione fino al valore 33.7 barg che fa cadere il punto di analisi sulla curva limite (Figura 8 – stella rossa) e quindi 33.7 barg / 0 °C è un punto della MPT per il componente. Procedendo allo stesso modo con diversi

valori di temperatura, si costruisce la curva completa, includendo l'effetto della crescita sub-critica dei difetti tramite T_{IH} = 102 °C (Figura 9 - sinistra).
Il bocchello da 24" non è trattabile invece per formule: è necessario effettuare una analisi Level 3 con modellazione FEM del componente criccato e calcolo del K_J elasto-plastico (Annex 9G, Figura 10). Esso viene confrontato con K_{mat} e la configurazione criccata verificata staticamente per collasso plastico tramite analisi limit-load. La procedura iterativa è analoga al caso Level 2. Vista la natura numerica dell'analisi, è tuttavia conveniente ipotizzare una coppia P/T, calcolare K_J, ricavare una nuova T dalla Master Curve e procedere iterativamente fino a convergenza, determinando i punti della curva MPT (Figura 9 - destra).
La curva MPT dell'apparecchio è pari all'inviluppo di quelle delle singole componenti.

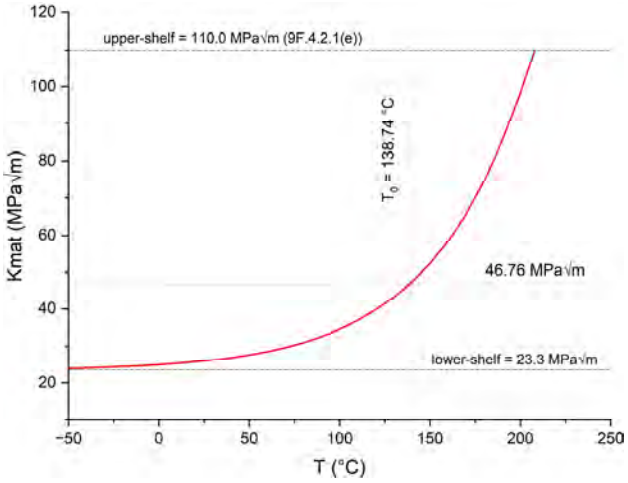


Figura 7. Caso-studio: Master Curve.

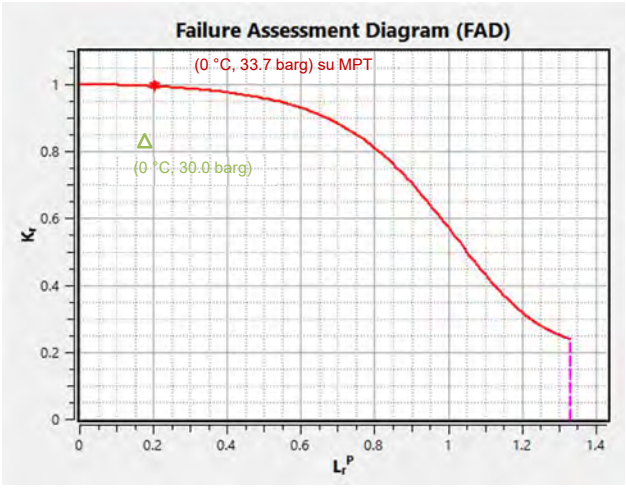


Figura 8. Caso-studio: Level 2 FAD.

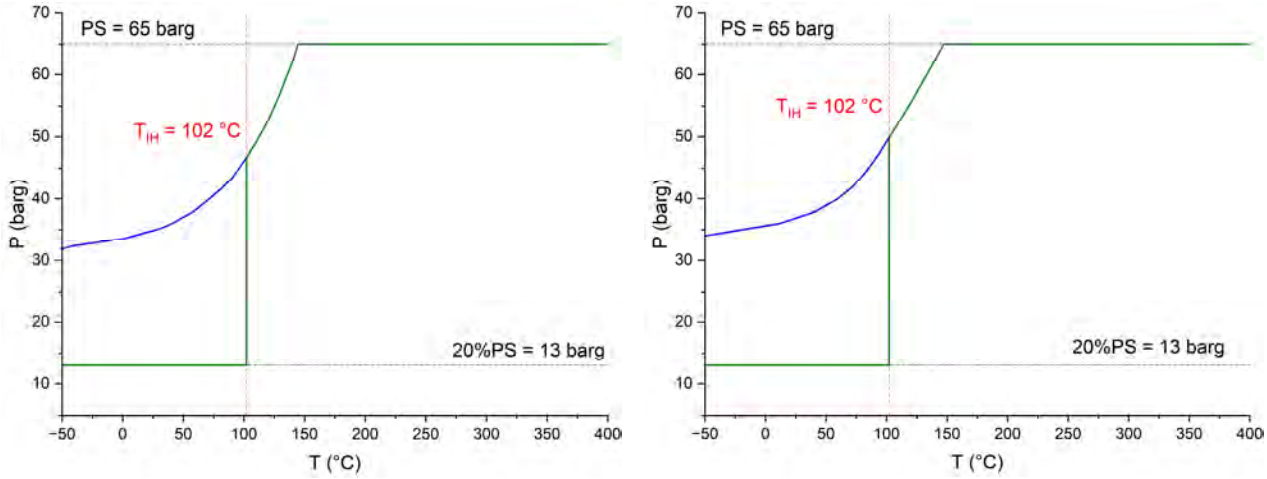


Figura 9. Caso-studio: curve MPT per bocchello 6" (sinistra) e 24" (destra).

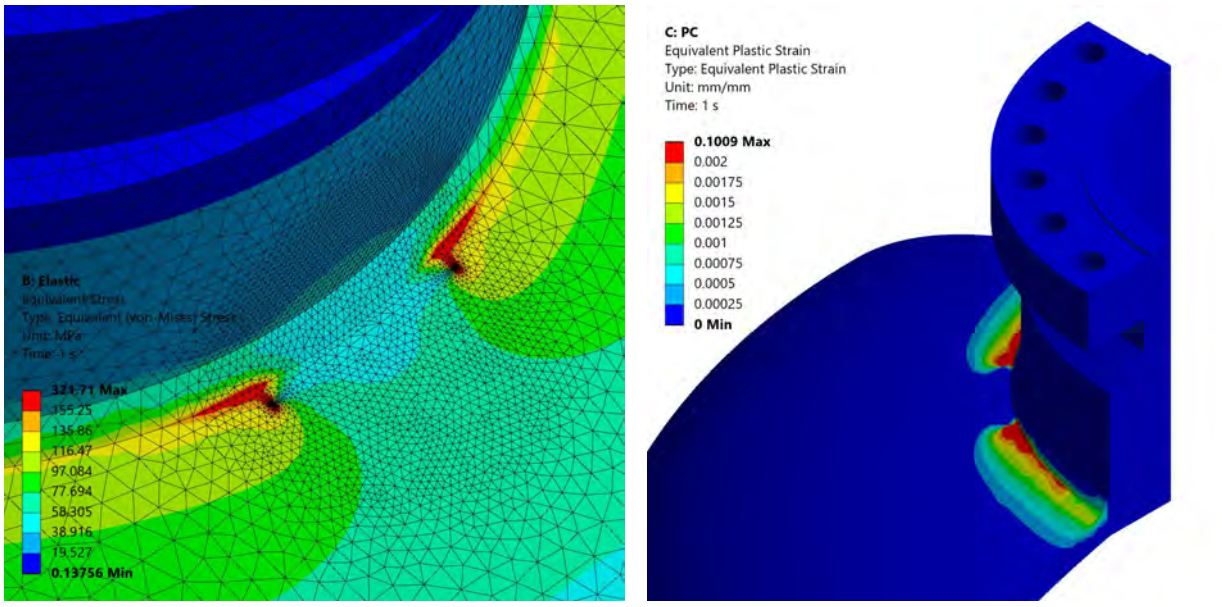


Figura 10. Caso-studio: FEA del componente criccato.

9. Conclusioni

Nella presente memoria è stato descritto il metodo dello standard API 579-1 per il calcolo delle curve di pressurizzazione di apparecchi in acciai basso-legati ed eserciti in hydrogen-service ad alta temperatura.

L'approccio, basato sulla meccanica della frattura, rappresenta un moderno e solido riferimento teorico per la gestione sicura dei transitori di avviamento e spegnimento di tali attrezzature, ottimizzando, allo stesso tempo i tempi e i costi di intervento.

Bibliografia

[1] ASME/API, API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2021

[2] ASME, Boiler And Pressure Vessel Code Section VIII Division 1 – Rules for Construction of Pressure Vessels, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2025

[3] API 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, American Petroleum Institute, Washington, 2020

[4] Qidong L., Hesamedin G., Vahid J., Tahrim A., Zoheir F., Md. Aminul I., Hydrogen Impact: A Review on Diffusibility, Embrittlement Mechanisms, and Characterization, *Materials*, 2024, 17(4), pp. 965

[5] Dautovich D. P., Floreen S., Staehle R. W., Hochman J., Stress Corrosion Cracking and Hydrogen-embrittlement of Iron Base Alloys, *NACE Publication*, 1977, Houston

[6] Lee J., Hydrogen-embrittlement, NASA/TM-2016-218602, 2016

[7] Prueter P., A Guide to Metallurgical Embrittlement Management, *Inspectioneering Journal*, 2024

[8] Watanabe, J., Shindo, J., Murakami, J., Adachi, T., Ajiki, S., Miyar, K., Temper-embrittlement of 2-1/4Cr-1 Mo Pressure Vessel Steel, 1974, *ASME 29th Petroleum Mechanical Engineering Conference*.

[9] Iwadate T., Pressurization Temperature of Pressure Vessels Made of Cr-Mo Steels, *ASME PVP Vol. 288*, 1994
[10] Dugdale D. S., Yielding of steel sheets containing slits, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8, pp. 293-306
[11] Macejko B., Seijas A., Ganhao L., Wood J., Wang N., Rodriguez E., Steinberg R., Leveraging Recent Advancements in Fitness-For-Service Technology to Optimize Equipment Minimum Allowable Temperature / Minimum Pressurization Temperature Limits, PVP2025-154251, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Montreal, Quebec, July 20-25, 2025
[12] Sakai T., Takahashi T., Yamada M., Nose S., Katsumata M., Effect of Hydrogen on MPT and De-Hydrogenation During Shut Down in Hydroprocessing Reactors, *ASME PVP Vol. 344*, 1994
[13] Osage D.A., Spring D., Anderson T., Kummari S., Prueter P., Wallin K., Recommendations for Establishing the Minimum Pressurization Temperature (MPT) for Equipment, *WRC Bulletin 562*, Welding Research Council, 2017
[14] Macejko B.R., Kummari S.R., Osage D.A., Recommendations for Evaluating Resistance to Brittle Fracture for Carbon and Low Alloy Steel Equipment and Piping, *WRC Bulletin 599*, Welding Research Council, 2023
[15] API Technical Report 934F Part 4, The Effects of Hydrogen for Establishing a Minimum Pressurization Temperature (MPT) for Heavy Wall Steel Reactor Vessels, American Petroleum Institute, Washington, 2018

Analisi del danno da creep di componenti in pressione soggetti a concomitante perdita di metallo localizzata

L. Scano[1], F. Piccini[1], S. Palomba[1]

[1] S.S.I. s.r.l. – Studio Scano (Udine)

Sommario

Lo scorrimento viscoso a caldo è un tipico meccanismo di danno delle attrezzature a pressione esercite ad elevate temperature. Inoltre, l'impiego di fluidi in pressione conduce spesso alla contestuale perdita localizzata di metallo. Entrambi i meccanismi di danno devono essere valutati al fine del calcolo della vita residua di tali componenti, in accordo a standard internazionali come la norma API 579-1 [1].

La perdita di metallo, diminuendo lo spessore di parete, incrementa lo stato di sforzo e accelera la progressione del creep che, a sua volta, favorisce il rilassamento delle tensioni e la loro ridistribuzione. Di conseguenza, i due fenomeni sono strettamente interagenti e competono alla definizione del danno complessivo che viene accumulato nel tempo.

In questo lavoro, l'impatto sul danno da creep della perdita di metallo localizzata è stato valutato tramite creep-FEA per due casi studio (tubo diritto e curva in acciaio basso-legato Grado 22). L'analisi FEM ha incorporato il modello di creep del materiale sia in termini di creep-strain che di time-to-rupture (API 579-1 Larson-Miller). Il danno da creep è stato calcolato al passo di integrazione tramite custom user-subroutine mentre la perdita di metallo è stata inserita nell'analisi attraverso deattivazione progressiva degli elementi del modello nella zona corrosa. Uno studio parametrico ha quindi permesso di valutare l'effetto dei tassi di creep e corrosione sul danno accumulato, stimando, allo stesso tempo, il margine di conservatività di un tipico metodo di valutazione semplificata che prevede, invece, il calcolo del danno da creep in condizioni di massima perdita di spessore.

1. Nomenclatura

A	Coefficiente di Norton creep secondario
C	Costante di Larson-Miller
C_k	Costanti funzione di Larson-Miller
D_c	Danno da creep
J_1	Traccia del tensore di sforzo (ksi)
L	Vita residua a creep (h)
LMP	Parametro di Larson Miller
n	Esponente di creep secondario
Q	Energia di attivazione (kJ/mol)
R	Costante dei gas (8.314 J/molK)
S_e	Stress effettivo inclusivo di triassialità (ksi)
S_s	Norma della terna principale di sforzo (ksi)
T	Temperatura assoluta (K)
t	Tempo in esercizio (h)
$\dot{\varepsilon}_c$	Minimo strain rate secondario (1/h)
σ	Stress (generico, MPa)

Pedici:

$_i$	Passo temporale

2. Introduzione

Nel corso delle analisi di integrità di attrezzature a pressione, è molto comune riscontrare la presenza di meccanismi di danno multipli. In particolare, in regime di creep, è quasi sempre associata la concomitante perdita di metallo (corrosione) e norme tipo Fitness-For-Service come l'API 579-1 lasciano all'analista l'onere di valutare l'iterazione tra i differenti tipi di danneggiamento. Le parti 4 e 5 di tale standard presentano le metodologie di valutazione in caso di perdita di metallo localizzata, mentre la parte 10 tratta del danno da creep. In caso entrambi i meccanismi di danno siano presenti, la valutazione diventa Livello 3 e necessita di un approccio di valutazione avanzato basato sull'analisi a elementi finiti FEM/FEA e incorporante i dati, in termini di rilievo spessimetrico, provenienti dai Controlli-Non-Distruttivi (CND).

Una pratica comune è quella di inserire nel calcolo numerico la condizione di massima, prevedibile, perdita di metallo, ovvero la massima corrosione attesa all'interno del periodo di riqualificazione. Tale perdita di spessore rimane quindi costante durante l'analisi a creep nel dominio del tempo. Questo approccio, sicuramente conservativo, garantisce di limitare la complessità dell'analisi numerica. In realtà, sia creep che corrosione sono danneggiamenti dipendenti dal tempo e sono caratterizzati da un elevato livello di accoppiamento e rinforzo reciproco. Entrambi, infatti, influenzano la distribuzione di sforzo nei componenti a pressione: il creep induce meccanismi di ridistribuzione e rilassamento delle tensioni ed è accelerato dall'effetto di concentrazione introdotto dalla perdita di metallo che, al contrario, incrementa lo stato di sforzo, soprattutto in caso di corrosione localizzata.

In questa memoria, il livello di conservativismo intrinseco nell'analisi a creep in condizione di spessore ultimo è stato valutato per il caso-studio di un tubo diritto e di una curva in acciaio basso-legato Grado 22, entrambi sottoposti a pressione interna in regime di creep. Nei componenti è stata introdotta una perdita di metallo localizzata ed è stata eseguita una analisi FEM avanzata includendo il creep al passo e la concomitante deattivazione degli elementi nello spessore in modo da simulare la progressiva perdita di metallo. I risultati ottenuti sono stati quindi confrontati con quelli ottenuti in modelli di confronto in condizioni di spessore ultimo.

3. Caso studio e proprietà del materiale in regime di creep

Il caso-studio presentato in questa memoria è costituito da un tubo diritto e da una curva Long-Radius aventi diametro DN250 e spessore pari a 24.72 mm. Il materiale da costruzione è un acciaio basso-legato tipo ASME SA-335-P22 e i componenti si suppone siano eserciti ad una pressione interna costante pari a 10.4 MPa e ad una temperatura pari a 500 °C, all'interno del regime di creep del materiale. Ai fini dell'analisi numerica, è stato considerato un materiale elastico/perfettamente-plastico a partire dalle caratteristiche meccaniche riportate in ASME BPVC II-DM [2]. Le leggi di creep secondario del materiale, in termini delle classiche curve di Norton in formato Arrhenius (Eq. (1)), sono state invece ricavate sulla base dei dati

sperimentali liberamente disponibili all'interno del database giapponese NIMS [3]. Le curve creep-strain/stress individuate hanno incluso sia il regime di creep diffusivo che quello di creep dislocativo visto il rilevante impatto del primo sull'accumulo del danno in componenti eserciti a basso tasso di sforzo come già messo in evidenza da uno degli autori in precedenti pubblicazioni [4][5] (Figura 1).

$$\dot{\varepsilon}_c = A \cdot e^{-Q/RT}\sigma^n \qquad (1)$$

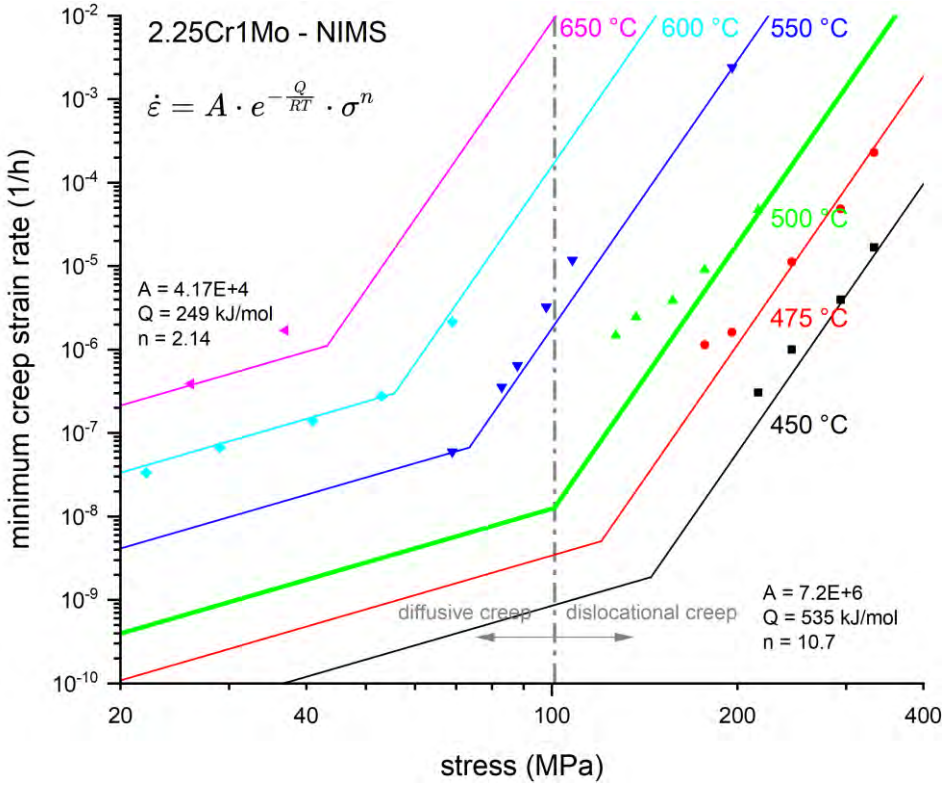


Figura 1. Curve di creep del materiale in regime diffusivo e dislocativo.

La differente pendenza delle curve di Figura 1 è evocativa della transizione dal regime di creep controllato da meccanismi diffusivi a quello in controllo di dislocazione.
Il modello di creep-rupture, necessario per la valutazione del danno da creep D_c secondo time-fraction all'interno dell'analisi FEM insieme alle curve di creep-strain, è stato inserito utilizzando i dati sperimentali minimum-time-to-rupture presenti in API 579-1 Annex 10B e il metodo di Larson-Miller come presentato nella parte 10 di tale standard:

$$L_i = 10^{\left(\frac{1000 \cdot LMP(S_{e,i})}{T+460}\right)} - C \qquad (2) \qquad S_{e,i} = \sigma_i \cdot e^{0.24 \cdot \left(\frac{J_{1,i}}{S_{s,1}} - 1\right)} \qquad (3)$$

$$J_{1,i} = \sum_{j=1}^{3} \sigma_{j,i} \qquad (4) \qquad S_{s,i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{3} \sigma_{j,i}^2} \qquad (5)$$

$$LMP(\sigma) = \frac{C_0 + C_2\sigma^{0.5} + C_4\sigma + C_6\sigma^{1.5}}{1 + C_1\sigma^{0.5} + C_3\sigma + C_5\sigma^{1.5}} \qquad (6) \qquad D_c = \sum \frac{t_i}{L_i} \qquad (7)$$

Nelle precedenti equazioni, lo sforzo equivalente ad ogni passo di integrazione σ_i, estratto dall'analisi numerica, è stato pesato per gli effetti di triassialità secondo la teoria di Huddlestone [6] e la vita residua L risulta funzione del parametro di Larson-Miller LMP, a sua volta funzione dello sforzo equivalente così modificato.

4. Modelli FEM

I modelli FEM dei componenti sono stati realizzati attraverso il software commerciale ANSYS. Data la simmetria delle geometrie e del caricamento per pressione interna, è stato sviluppato un modello assialsimmetrico per il tubo diritto e un modello tridimensionale con simmetria meridiana per la curva. La perdita di metallo localizzata (Local Thin Area – LTA) è stata inserita con profondità massima pari a 5.0 mm nel tubo diritto e 23.0 mm nella curva (Figura 2).

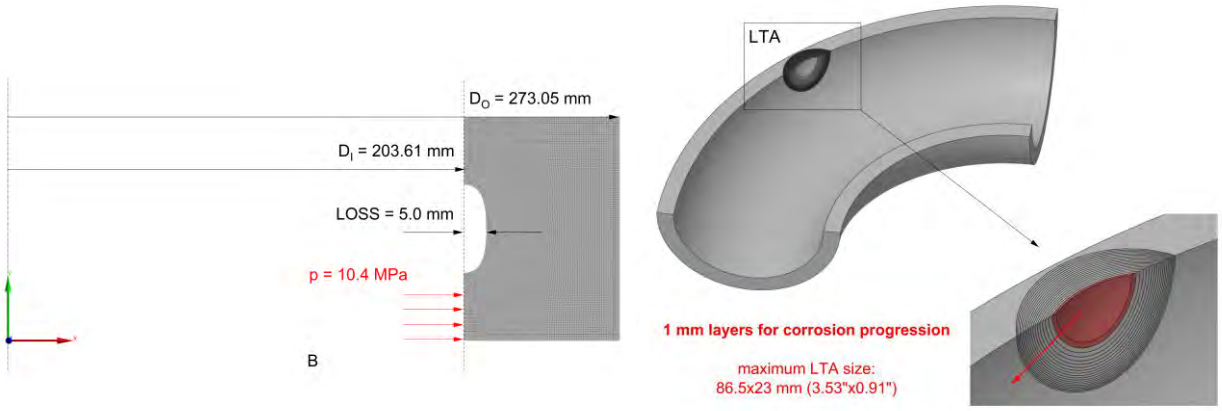


Figura 2. Modelli geometrici per tubo diritto e curva con LTA.

La meshatura dei modelli è stata realizzata tramite elementi piani quadri (tubo diritto) e solidi esaedrici (curva) aventi funzioni di forma del secondo ordine. Nel caso del tubo diritto la dimensione degli elementi è stata fissata a 0.5 mm fuori dalla LTA e 0.1 mm all'interno della LTA: questo ha consentito di inserire 100 layer di progressiva deattivazione degli elementi per simulare la progressione della perdita di metallo (Figura 3 - sinistra). La dimensione degli elementi della curva è stata invece settata a 5.0 e 1.0 mm rispettivamente fuori e all'interno della LTA in modo da ottenere un modello di dimensioni ragionevoli in termini di numero di nodi e di onere computazionale. Per compensare in parte il minor numero di layer di progressione, la profondità della LTA, in tale caso, è stata spinta fino al limite dello spessore (23.0 mm, Figura 3 - destra).
I modelli sono stati vincolati ad un estremo e caricati per pressione interna. Quest'ultima ha indotto un'azione flettente nel piano della curva in unione allo stato di sforzo circonferenziale presente anche nel tubo diritto. Durante le analisi con corrosione valutata al passo di integrazione, gli elementi corrispondenti ai vari layer nelle LTA sono stati progressivamente disattivati e il carico da pressione spostato

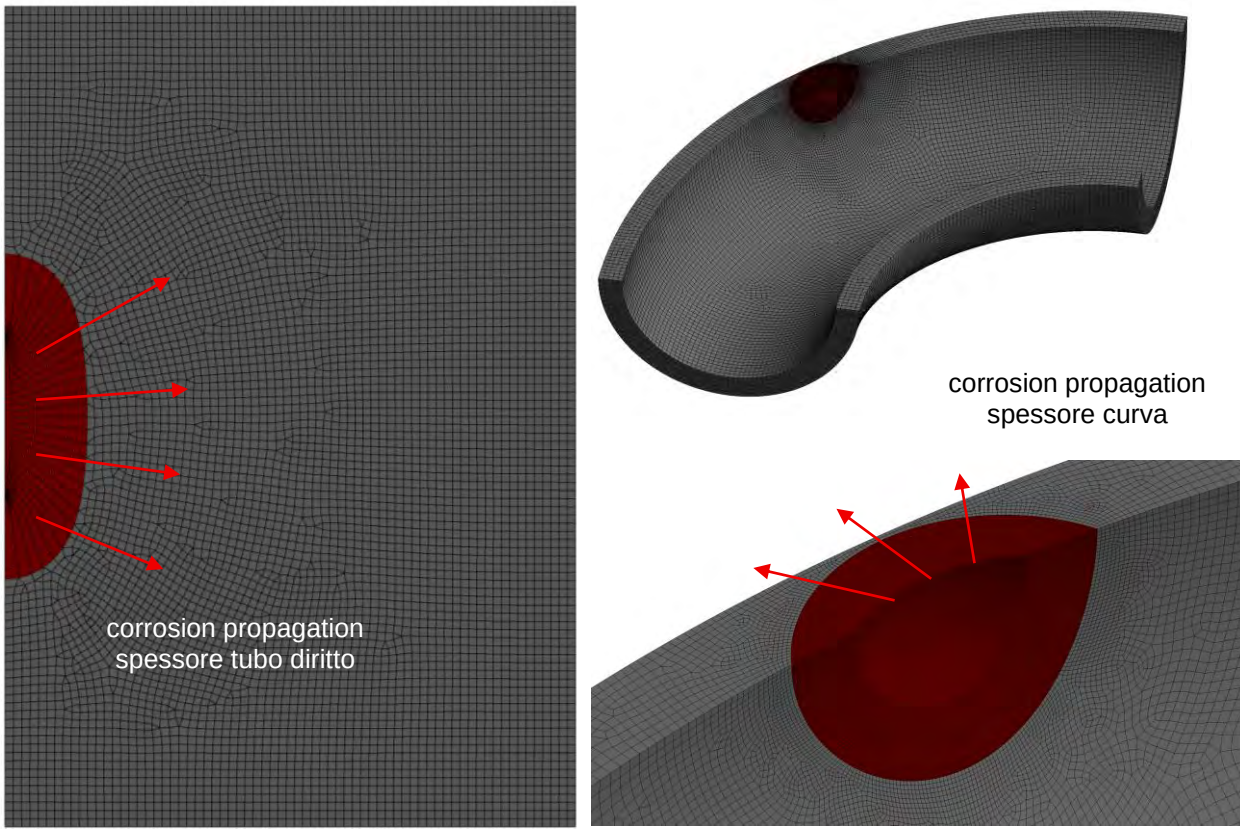


Figura 3. Mesh dei modelli e delle LTA.

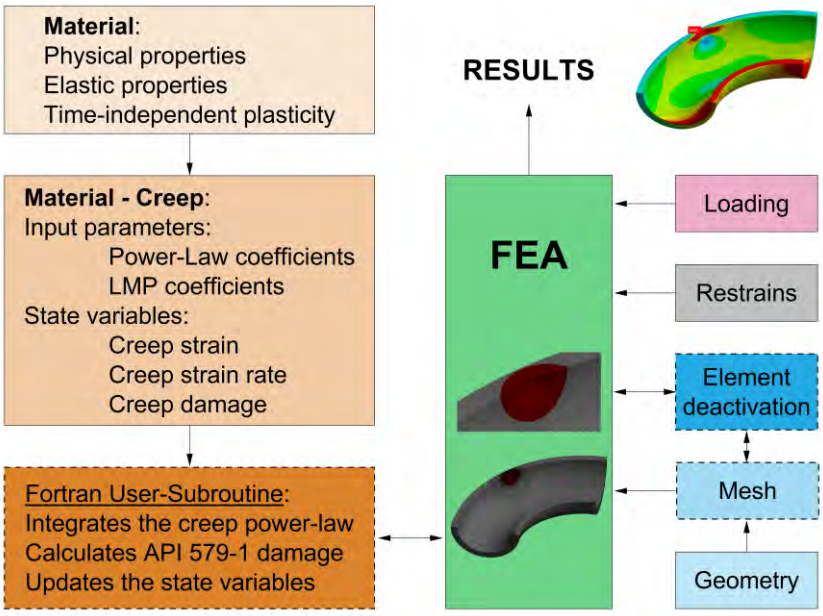


Figura 4. FEA workflow.

sugli strati a spessore ridotto. Il rapporto tra lo spessore dei layer e il tempo di integrazione dell'analisi è, per definizione, il tasso di corrosione caratteristico.

Le leggi di creep del materiale e il modello di danno di Larson-Miller secondo API 579-1 sono stati inseriti nel framework di calcolo attraverso custom user-subroutine in Fortran compilate direttamente nel solutore FEM. Tutte le grandezze di calcolo, incluso D_c, sono state inserite come funzioni di stato e valutate ad ogni passo di integrazione.
Il workflow dell'analisi, nel suo complesso, è riportato alla Figura 4.

5. Analisi creep-corroding FEA

L'analisi a creep dei componenti è stata condotta sia con geometria completamente corrosa (approccio semplificativo) che includendo la perdita di metallo attraverso la deattivazione degli elementi nello spessore. Quest'ultima ha potuto progredire parallelamente all'accumulo di deformazione da creep e al rilassamento degli sforzi in modo da studiare l'effetto reciproco dei due fenomeni.

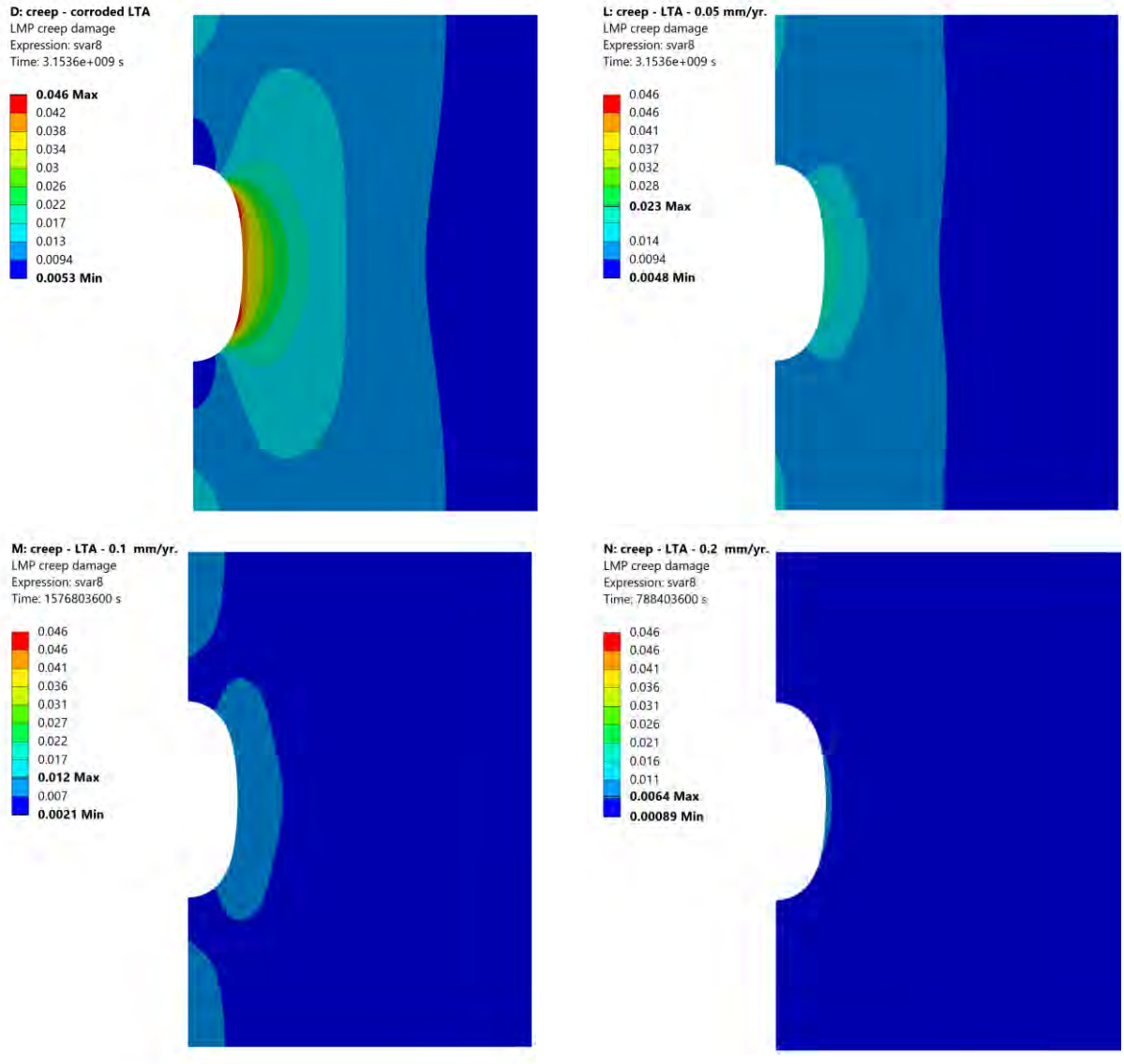


Figura 5. Danno da creep per LTA profonda 5.0 mm nel tubo diritto.

L’analisi con LTA statica è stata condotta alla massima profondità di 5.0 mm per il tubo diritto e a 5.0, 11.0, 20.0 e 23.0 mm per la curva. In questo caso, la perdita di metallo è rimasta costante durante tutta l’analisi a creep (ipotesi conservativa). Per quanto riguarda invece l’analisi con corrosione al passo, sono stati considerati 6 tassi di corrosione per il tubo diritto (0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 e 0.5 mm/anno) e 4 per la curva (0.25, 0.5, 1.0 e 2.0 mm/anno).
La Figura 5 presenta il confronto dei contour-plot del danno da creep al termine dell’analisi per il tubo diritto con modello completamente corroso e con corrosione al passo avente tasso di progressione pari a 0.05, 0.1 e 0.2 mm/anno.
Si osserva immediatamente come il danno da creep del modello completamente corroso sia almeno pari al doppio di quello valutato con corrosione al passo. L’incremento del margine con il tasso di corrosione è dovuto al fatto che, per tassi alti, la massima profondità della LTA è raggiunta in minor tempo e quindi con minore accumulo di danno da creep.

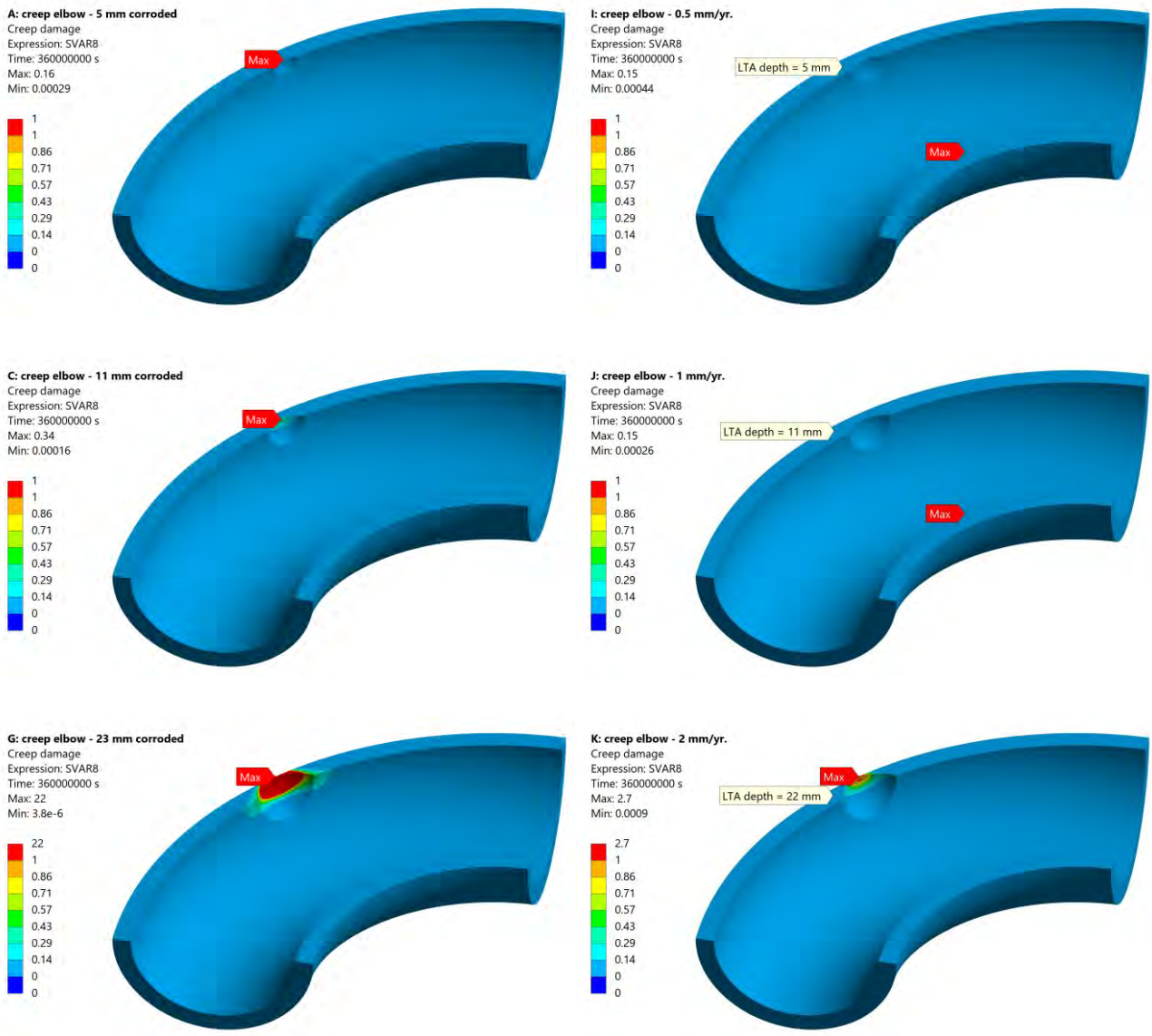


Figura 6. Danno da creep nella curva.

La Figura 6 illustra invece il caso della curva: è presentato il confronto tra il danno da creep nel modello completamente corroso con LTA profonda 5.0, 11.0 e 23.0 mm e quello calcolato con corrosione al passo e tasso di corrosione pari a 0.5, 1.0 e 2.0 mm/anno fino a una perdita di metallo pari a 5.0, 11.0 e 22.0 mm.
Anche in questo caso, a parità di profondità della LTA, il danno da creep del modello completamente corroso è risultato nettamente superiore a quello calcolato tramite la valutazione della perdita di metallo al passo. Si nota, inoltre, che per zone corrose poco profonde e nelle analisi incorporanti la corrosione, il massimo danno da creep non si concentra al fondo della LTA, come per i modelli completamenti corrosi, ma all'intradosso della curva. Questo è dovuto al fatto che, in questi modelli, al tempo zero l'effetto di intaglio dovuto alla LTA è nullo e il danno da creep si localizza dove ci sono effetti di concentrazione, ovvero all'intradosso geometrico. La LTA diventa il punto critico, in termini di danno da creep, solo per elevate profondità e, indirettamente, per alti tassi di corrosione.

6. Analisi dei risultati

I risultati dell'analisi sono stati sintetizzati in alcuni diagrammi al fine di valutare il ruolo dell'effetto di intaglio e del rilassamento delle tensioni sul danno da creep, nel caso dei modelli semplificati e in quello di quelli con corrosione al passo.
La Figura 7 presenta l'andamento nel tempo del massimo sforzo equivalente di Von Mises nel tubo diritto (fondo della LTA). La linea grigia è la classica curva di rilassamento delle tensioni in regime di creep ed è calcolata per il modello completamente corroso in cui l'effetto di intaglio della LTA rimane costante durante

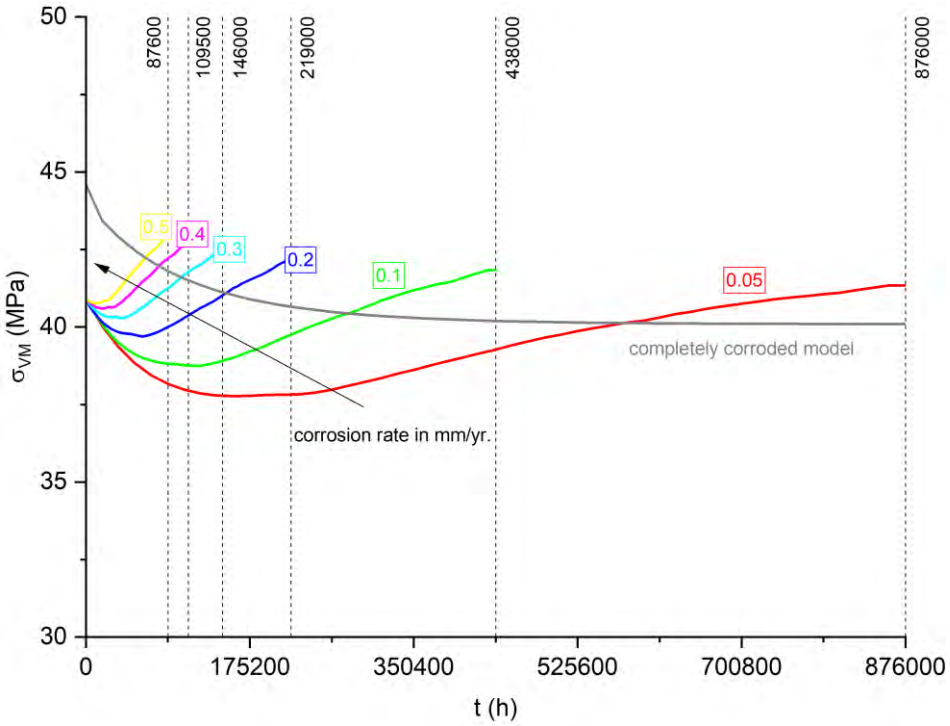


Figura 7. Effetto del rilassamento delle tensioni nel tubo diritto.

l'analisi. Le curve colorate sono invece relative alle analisi con progressiva perdita di metallo. Si osserva come lo sviluppo della corrosione e l'aumento della profondità della LTA nel tempo abbia un effetto inibente sul rilassamento delle tensioni a causa del progressivo aumento dell'effetto di intaglio che viene introdotto nel modello. A bassi tassi di corrosione l'effetto del rilassamento è ancora evidente nelle prime fasi dell'analisi mentre, per alti valori esso risulta praticamente inesistente a causa dell'elevato rateo di incremento della concentrazione di sforzo. Si nota, infine, come il livello di sforzo al termine delle analisi con corrosione al passo sia sempre superiore a quello ottenuto, per lo stesso tempo di analisi, nel modello semplificato.
La Figura 8 mostra il caso della curva. Sono rappresentati 4 tracciati grigi corrispondenti al rilassamento delle tensioni nei modelli completamente corrosi con LTA avente profondità pari a 5.0, 11.0, 20.0 e 23.0 mm. Le curve in colore sono invece relative alle analisi con progressiva perdita di metallo, per i 4 tassi di corrosione considerati. Lungo i tracciati sono indicate le progressive profondità della LTA, fino al limite ultimo di 23.0 mm. Si nota come, nel caso della curva, l'effetto del rilassamento sia sempre inibito dall'effetto di intaglio introdotto dalla LTA. Come nel caso del tubo diritto, inoltre, il livello di sforzo risulta sempre superiore a quello valutato nel modello semplificato, soprattutto per LTA profonde.

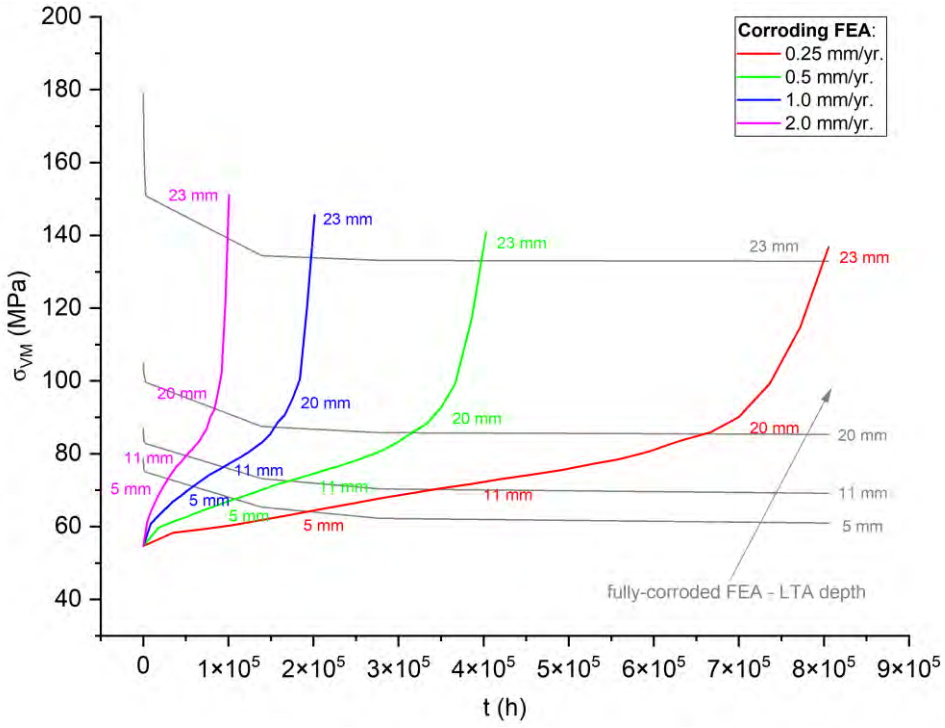


Figura 8. Effetto del rilassamento delle tensioni nella curva.

L'impatto della corrosione sul danno da creep è riassunto nei diagrammi riportati in Figura 9 per il tubo diritto (alto) e per la curva (basso).
Il tracciato superiore relativo al tubo diritto mostra, in linea grigia, l'accumulo nel tempo del massimo danno da creep nel modello completamente corroso. Questo si

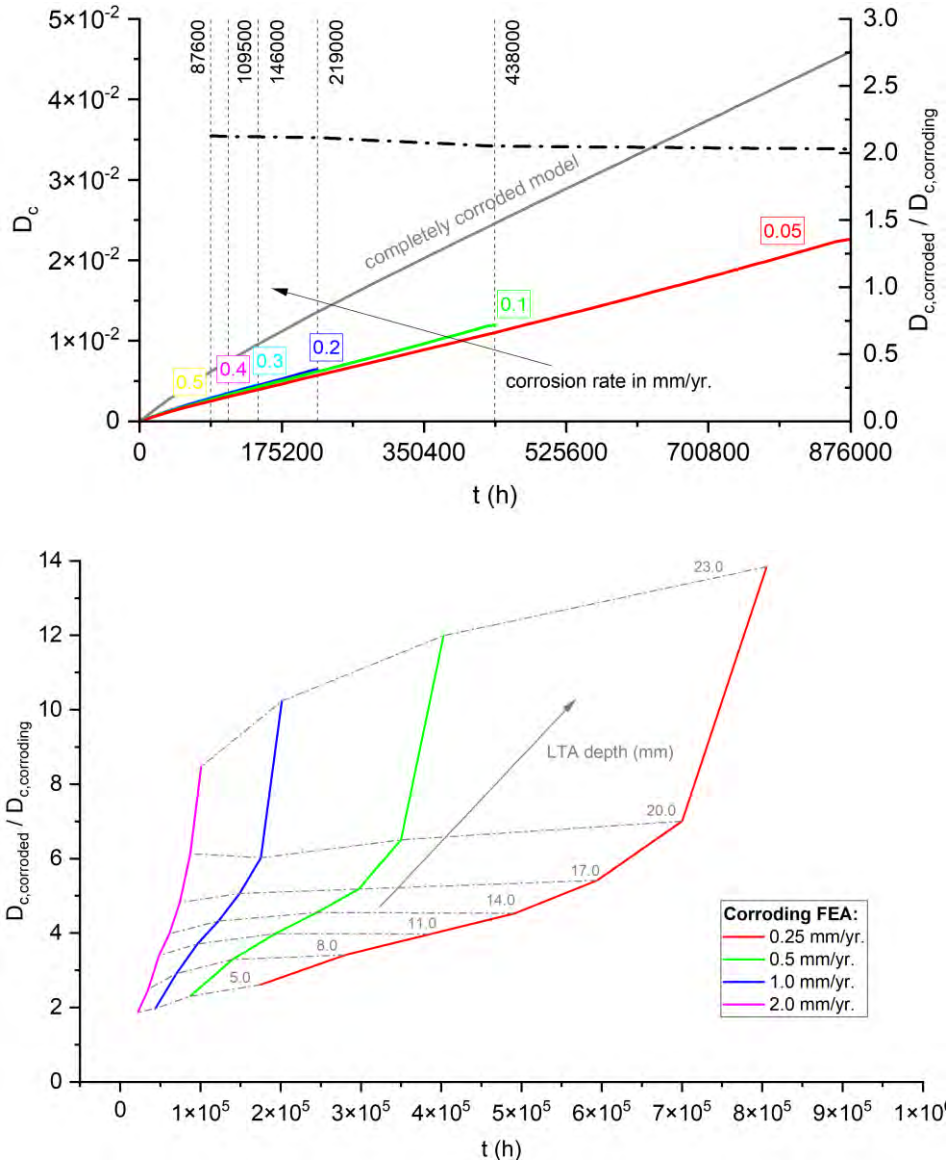


Figura 9. Danno da creep nel tubo diritto (sopra) e nella curva (sotto).

concentra nel fondo della zona corrosa come è evidente dalla Figura 5 in alto a sinistra. Le curve in colore rappresentano invece il progredire del danneggiamento nei modelli con perdita di metallo attiva. I tracciati si interrompono via via in meno tempo perché la massima profondità della LTA, pari a 5.0 mm, è raggiunta prima per tassi di corrosione elevati. Il rapporto tra il danno da creep nel modello completamente corroso e in quelli con corrosione al passo è rappresentato dalla curva nera tratto-punto (asse Y destro) che è sostanzialmente una retta di ordinata pari a 2.0. Questo vuol dire che l'approccio semplificato e conservativo di eseguire analisi a creep in condizioni di massima corrosione è caratterizzato da un fattore di sicurezza intrinseco pari a 2 per corrosione localizzata in tubo diritto sottoposto a pressione interna. Il danno da creep, inoltre, tende ad aumentare all'aumentare del tasso di corrosione, anche se l'effetto è non-trascurabile solo per ratei bassi.

Il tracciato inferiore è invece caratteristico della curva e rappresenta il rapporto tra il danno da creep nel modello con LTA statica e quello nei modelli con corrosione attiva, per i diversi tassi di corrosione analizzati. Le curve grigie tratto-punto rappresentano le iso-profondità della LTA. Si nota immediatamente come, nel caso della curva, il margine di conservativismo dell'approccio semplificato sia sempre almeno pari a 2, valore che si ottiene per zone corrose profonde 5.0 mm e che risulta in linea con l'analisi nel tubo diritto. Se aumenta la profondità e dunque l'effetto di intaglio, tuttavia, il rapporto tende ad incrementare con velocità proporzionale al tasso di corrosione e alla profondità della LTA. Per zone corrose molto profonde, l'utilizzo di modelli di calcolo a creep in condizioni di massima corrosione risulta irrealisticamente conservativo in termini di danno calcolato (rapporto superiore a 8).

7. Conclusioni

In questa memoria è stato investigato il ruolo della perdita di metallo localizzata nel calcolo del danno da creep tramite analisi FEM avanzate. In particolare, è stato valutato il margine di conservativismo intrinseco nel comune approccio di effettuare analisi creep-FEA in condizioni di massima corrosione, ovvero in quelle previste, sulla base dei CND spessimetrici, al termine del periodo di riqualificazione.

Ai fini della valutazione è stato considerato il caso-studio di un tubo diritto e di una curva fabbricati in acciaio basso-legato Grado 22 e soggetti a pressione interna in regime di creep secondario stazionario. Sono state condotte analisi a creep in accordo alla parte 10 dello standard API 579-1 (metodo di Larson-Miller) sia in condizioni di massima perdita di metallo che con corrosione valutata al passo tramite progressiva deattivazione degli elementi sulla zona corrosa, in modo da avere un confronto diretto tra le due metodologie.

Il primo effetto della perdita di metallo è stato quello di inibire il rilassamento delle tensioni a causa dell'aumento locale del tasso di sforzo causato dall'effetto di intaglio nella zona corrosa. Il relativo aumento del danno da creep associato è risultato tuttavia sempre inferiore a quello valutato tramite modelli con perdita di metallo statica, con margini di sicurezza pari almeno a 2 per zone corrose poco profonde, fino ad arrivare a più di 8 per elevate profondità dei difetti.

Bibliografia

[1] ASME/API, API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2021

[2] ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Sec. II Materials Part D Properties (Metric), American Society of Mechanical Engineers, New York, 2025

[3] NIMS Testing Division, Data Sheets on the Elevated-Temperature Properties of 2.25Cr-1Mo Steel for Boiler and Heat Exchanger Seamless Tubes (STBA 24), 3B, National Research Institute for Metals, 1986

[4] Scano L., Esposito, E., Effects of Secondary Creep Formulation on API 579-1 Residual Life Evaluation, PVP2017-65512, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Waikoloa, HI, July 16-20, 2017
[5] Scano L., Esposito, E., Effects of Primary and Secondary Creep Formulation on API 579-1 Residual Life Evaluation, PVP2018-84407, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Prague, Czech Republic, July 15-20, 2018
[6] Huddlestone R. L., An Improved Multiaxial Creep-Rupture Strength Criterion, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1985, 107, (4), pp. 421-429

Controlli non distruttivi e analisi di vita utile su apparecchiature in PRFV

A. Russo[1] R. Acerboni[2] A. De Palma[2] N. Altamura[3] G. Saputi[4]

[1]VED Vetroresina Engineering Development
[2]Inail - UOT di Venezia
[3 2]Inail - UOT di Bari
[4] INAIL DC Ricerca

Le strutture in PRFV (Plastica Rinforzata con Fibra di Vetro) sono ampiamente utilizzate negli impianti industriali per la loro resistenza chimica e leggerezza. Tuttavia, nel tempo, sono soggette a fenomeni di degrado che possono comprometterne l'integrità meccanica. Le tecniche tradizionali di controllo, come l'ispezione visiva e la misura della durezza superficiale, risultano spesso limitate e non predittive.
Lo scopo del lavoro è descrivere un metodo di ispezione non distruttiva basato sull'impiego di ultrasuoni (UT) per la valutazione dell'integrità strutturale dei componenti in PRFV.
Il metodo prevede l'analisi dell'attenuazione del segnale ultrasonico attraverso il laminato composito, integrata con ispezioni visive e con l'elaborazione dei dati tramite un algoritmo sviluppato a partire da un ampio archivio di dati sperimentali.
Il sistema consente di stimare la resistenza meccanica residua e la vita utile rimanente, senza necessità di sezionamenti o fermo impianto.
L'applicazione della tecnologia ha permesso di ottenere valutazioni oggettive di *Fitness-for-Service*, identificare difetti interni non visibili e pianificare interventi correttivi mirati, con un impatto minimo sulle operazioni e una riduzione dei costi di manutenzione.
Quanto proposto può rappresentare un nuovo standard per l'ispezione dei materiali compositi, superando i limiti delle tecniche tradizionali e ottimizzando la gestione dei rischi, i costi e le attività di manutenzione.

1. Introduzione [1] [2]

Negli impianti industriali, in particolare in quelli petrolchimici, è frequente riscontrare la presenza di numerosi serbatoi e/o apparecchiature in PRFV (Plastica Rinforzata con Fibra di Vetro) o dual laminate (liner in materiale composito e strato meccanico resistente in materiale composito).



Figura 1. Apparecchiatura in PRFV.

I materiali compositi in PRFV sono costituiti da una matrice polimerica rinforzata con fibre, tipicamente di vetro, carbonio o altri materiali. Il polimero è solitamente una resina termoindurente, epossidica o vinilestere. Il rinforzo fornisce la maggior parte della resistenza strutturale, mentre il polimero funge da legante, impedisce perdite idrauliche e fornisce protezione dalla corrosione contro sostanze chimiche aggressive. Esaminando una sezione di una parete di una apparecchiatura in materiale composito si possono osservare i seguenti strati:

- Liner (o barriera anticorrosione) consistente in un primo strato a diretto contatto con il fluido stoccato, è uno strato ad alta percentuale di resina.
  Il ruolo del liner è quello di garantire la tenuta idraulica dell'apparecchiatura oltre a garantire una elevata resistenza chimica dell'apparecchiatura.
- Strato meccanico resistente, è costituito da fibre di vetro "E", sotto forma di filamenti continui (Rovings), impregnati di resina, ed avvolte su liner interno sotto tensione controllata. Esso ha la funzione di garantire la resistenza meccanica della parete dell'apparecchiatura alle sollecitazioni a cui essa sarà sottoposta in esercizio (sollecitazioni di pressione interna ed esterna, sollecitazioni di flessione dovute a eventuali carichi esterni, etc.) nonché alle sollecitazioni a cui essa sarà sottoposta durante le operazioni di trasporto e posa in opera.
- Finitura o strato esterno traslucido, costituito da resina pura senza rinforzo, la cui funzione è quella di garantire la completa impregnazione delle fibre di vetro periferiche, così da avere una superficie esterna del tubo priva di fibre affioranti e di aumentare la resistenza della parete dell'apparecchiatura stessa all'aggressione chimica da parte degli agenti esterni (agenti atmosferici nel caso di linee fuori terra ed agenti del terreno nel caso di linee interrate), nonché alla resistenza ai raggi U.V.

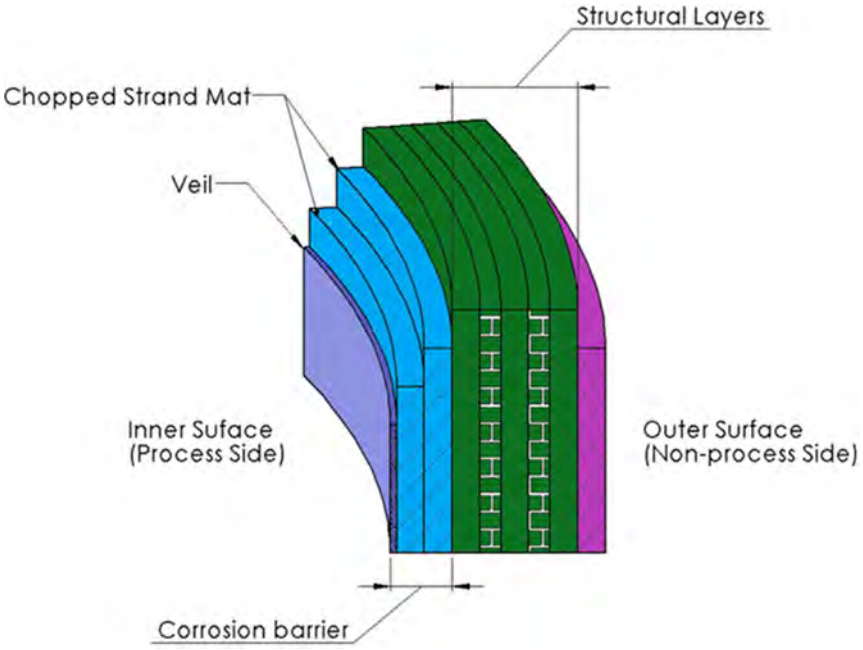


Figura 2. Stratificazione di una parete di una apparecchiatura in PRFV

Le apparecchiature, in materiale composito, rispetto a quelle in acciaio, presentano i seguenti vantaggi:

- Resistenza alla corrosione e elevata resistenza chimica: il PRFV presenta eccellenti resistenze chimiche, specialmente contro fluidi aggressivi all'acciaio come acqua, molti prodotti chimici, reflui, acqua mare.
- Leggerezza: A parità di volume, il PRFV è molto più leggero dell'acciaio. Questo comporta trasporti e installazioni più semplici ed economici.
- Manutenzione minore: grazie all'elevata resistenza chimica, l'utilizzo del PRFV comporta manutenzioni ridotte. Questo deriva dal fatto che si riscontrano fenomeni di degradazione minori rispetto all'acciaio (assenza di corrosione, assenza di fenomeni di riduzione dello spessore del materiale e sfogliature).

Per queste ragioni, apparecchiature e/o tubazioni in PRFV sono state utilizzate con successo per decenni come alternativa sicura ed economica all'acciaio per la realizzazione di serbatoi, cisterne e tubazioni che immagazzinano e trasportano materiali corrosivi in una vasta varietà di settori industriali.
Tuttavia, ancora oggi è diffusa l'assenza di una metodologia collaudata di prove non distruttive (CND) per valutare l'idoneità al servizio delle apparecchiature e/o tubazioni in PRFV.
Mentre le norme e i codici per la progettazione e la costruzione di manufatti in PRFV tengono conto delle proprietà uniche di questi materiali compositi, le norme per l'ispezione delle strutture in PRFV in servizio sono in ritardo.
Sono presenti diverse norme attuali che tendono a imporre requisiti per l'ispezione delle apparecchiature metalliche, ma per quanto riguarda il PRFV non sono ancora presenti normative o prescrizioni riguardo l'ispezione di apparecchiature in servizio.

Di conseguenza, le norme e i codici disponibili forniscono poche indicazioni agli ispettori per aiutarli a comprendere i danneggiamenti che ci si può attendere una volta che le apparecchiature in PRFV sono in servizio. [3]
In generale, nelle apparecchiature in acciaio si osserva una graduale riduzione dello spessore nel tempo a causa della corrosione, senza rivelare particolari decadimenti delle caratteristiche meccaniche del materiale; al contrario, nel PRFV solitamente non si osserva una riduzione dello spessore, ma si può evidenziare nel tempo una graduale perdita della rigidità e resistenza strutturale, fenomeno non visibile a occhio nudo e difficilmente rilevabile, a meno di eseguire dei controlli non distruttivi sull'apparecchiatura in materiale composito. A questo fenomeno fanno eccezione le applicazioni in PRFV in ambienti altamente aggressivi come il biossido di cloro Cl_2O (in questi casi, in fase di progettazione si considera uno strato maggiorato del liner considerando il degrado nel tempo).
In condizioni di servizio, nelle apparecchiature in acciaio l'ambiente esterno oppure il fluido stoccato possono innescare fenomeni di corrosione tali da far raggiungere un punto critico chiamato limite di corrosione. A quel punto l'apparecchiatura in acciaio, prima di raggiungere un punto in cui viene considerata non più idonea all'uso perché non soddisfa i requisiti progettuali, vengono attivate le attività di manutenzione.
Le normative di riferimento, ad esempio, facilitano il compito degli ispettori in quanto richiedono che lo spessore e la tolleranza di corrosione siano scritti direttamente sulla targa, nella dichiarazione di conformità, nel disegno di costruzione o nel manuale di uso manutenzione delle apparecchiature in acciaio, in modo da rendere evidente se la stessa è idonea al servizio o soddisfa i requisiti di progettazione.
Tuttavia, poiché attualmente non esistono normative applicabili in modo da valutare le apparecchiature in materiale composito, non esistono chiari e evidenti valori di resistenza meccanica e/o valori di spessori minimi trascritti sulle targhe delle apparecchiature.

2. Ispezione di apparecchiature in PRFV tramite ultrasuoni

I controlli non distruttivi (CND) sono un pilastro fondamentale per la sicurezza degli impianti industriali. All'interno della famiglia dei controlli non distruttivi il metodo ad ultrasuoni è uno dei più utilizzati, in particolare per verificare l'integrità strutturale delle apparecchiature in acciaio. La stessa tecnologia viene utilizzata per ispezionare le apparecchiature in materiale composito. Nel dettaglio, si impiega una metodologia denominata Attenuation-based Ultrasound (UAX).
Il metodo UAX in generale è una combinazione del metodo acustico-ultrasonico (AU) e del controllo ultrasonico (UT), in cui vengono utilizzate apparecchiature di controllo ultrasonico convenzionali per applicare impulsi ultrasonici al PRFV. Vengono quindi effettuati dei calcoli sui riflessi ultrasonici restituiti dal materiale in modo da determinare la quantità di attenuazione del segnale lungo il suo percorso, nonché lo spessore del materiale o il tempo di transito. È stato dimostrato che l'attenuazione è

direttamente correlata al danno accumulato dalla matrice polimerica costituente il PRFV. Il metodo si basa su ulteriori standardizzazioni, procedure e calcoli sviluppati utilizzando dati empirici raccolti nel corso di ispezioni su migliaia di apparecchiature in servizio, nonché su test interni approfonditi che sono stati verificati da diversi laboratori di terze parti.
Questo approccio è essenziale per l'analisi del PRFV, materiale intrinsecamente anisotropo e non omogeneo, nel quale le proprietà meccaniche e acustiche variano in funzione della direzione delle fibre, della qualità della matrice polimerica e del livello di degrado chimico-meccanico accumulato nel tempo.
Il sistema non si limita quindi alla determinazione geometrica dello spessore, ma analizza il comportamento del segnale ultrasonico durante la sua propagazione attraverso il laminato, misurandone l'attenuazione. Tale attenuazione risulta direttamente correlata allo stato della matrice polimerica e all'integrità del legame fibra-resina, che rappresentano i fattori chiave per la capacità strutturale e la resistenza alla corrosione del composito.
Il parametro ingegneristico principale calcolato dal sistema è la Percentuale di Rigidezza di Progetto residua (PDS – Percentage of Design Stiffness).

$$PDS = \frac{Current\ FRP\ Flexural\ Modulus}{Theoretical\ FRP\ Flexural\ Modulus}$$

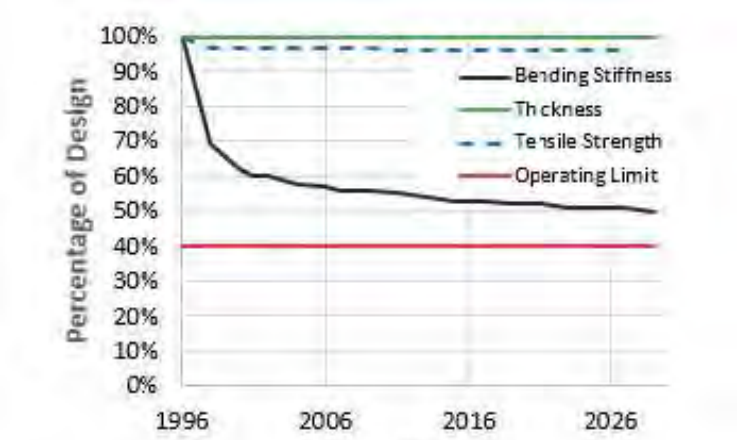


Figura 3. Variazione del PDS e dello spessore durante gli anni di servizio di una apparecchiatura in PRFV

Q

dell'apparecchiatura rispetto alle condizioni originali di progetto e costituisce il riferimento oggettivo per la valutazione della vita residua della stessa.
La determinazione del PDS tiene conto dei principali meccanismi di degrado che interessano i materiali compositi in PRFV, valutati attraverso tecniche specifiche:

- Creep viscoelastico, riconosciuto come il meccanismo di cedimento dominante nei materiali compositi. Esso si manifesta come una perdita progressiva e irreversibile di rigidezza dovuta all'azione combinata di stress meccanici, temperatura di esercizio e aggressione chimica nel tempo.

- Perdita di spessore strutturale, conseguente a fenomeni di abrasione, erosione o ossidazione (in ambienti particolarmente aggressivi), che riducono la sezione resistente del laminato composito.
- Danno alla barriera anticorrosione, valutato sia in termini di profondità di penetrazione dell'attacco chimico sia in funzione della riduzione della rigidezza residua della matrice polimerica destinata alla protezione del laminato strutturale.

L'ispezione di apparecchiature in materiale composito tramite ultrasuoni viene perciò condotta seguendo una procedura strutturata che comprende la raccolta sistematica dei dati ultrasonici sul campo (spesso oltre 1.000 punti di misura in una giornata lavorativa), un'ispezione visiva esterna, corredata da una analisi delle parti ammalorate visibili a occhio nudo e l'elaborazione dei dati mediante algoritmi affinati con l'esperienza.

L'intero processo consente di determinare in modo oggettivo la vita utile residua (Remaining Service Life – RSL) dell'apparecchiatura e di individuare il punto di fine vita operativa, generalmente identificato quando il valore PDS scende al di sotto del 40%. Tale soglia è riconosciuta come indicativa di un rischio elevato di cedimento strutturale imminente.

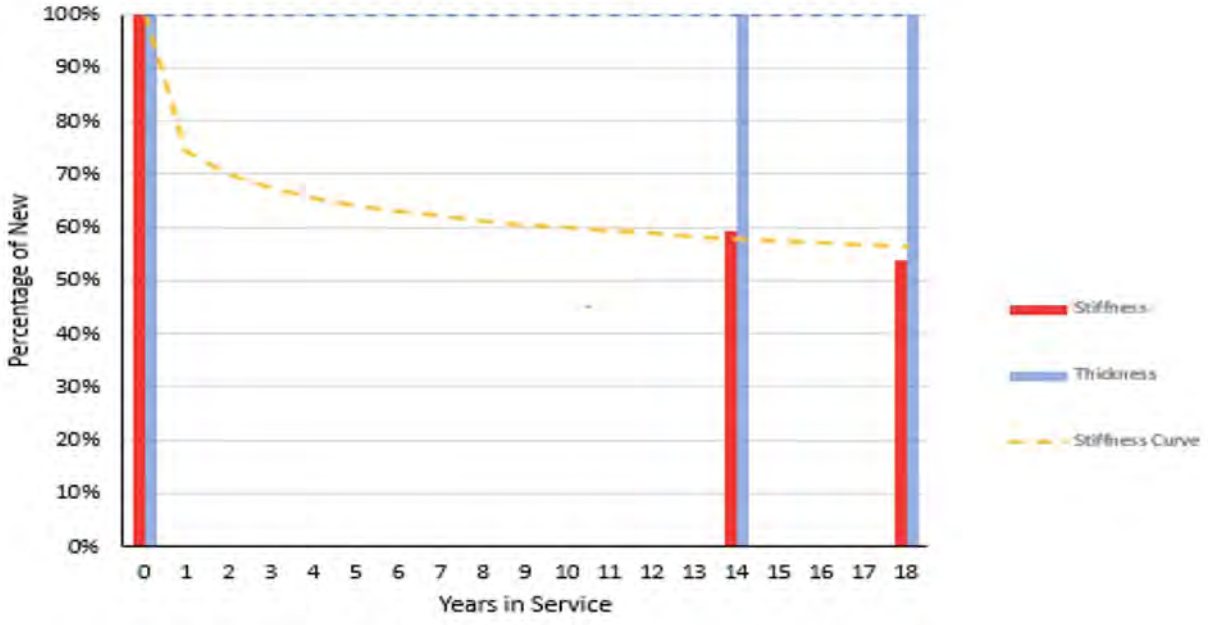


Figura 4. Il grafico mostra la riduzione della Percentuale di Rigidezza di Progetto residua durante gli anni di servizio dell'apparecchiatura in PRFV

Come evidenziato dal grafico sovrastante, riferente a un caso studio, si evince come, con il passare degli anni, lo spessore dell'apparecchiatura in PRFV non varia mentre il PDS si riduce fino a raggiungere un valore vicino al fine vita (intorno al 40%).

Il valore impostato come PDS critico e utilizzato per definire la fine del ciclo di vita dell'apparecchiatura è stato sviluppato empiricamente attraverso un'ampia e approfondita esperienza. Questo valore è indipendente dagli standard di progettazione utilizzati, dal tipo di resina impiegata o dal rinforzante. Quando gli algoritmi danno come risultato un PDS inferiore al PDS critico, l'apparecchiatura è a rischio e viene considerata non idonea al servizio.
L'ispezione di un'apparecchiatura comporta la preparazione di un piano di ispezione in cui vengono identificati i punti di monitoraggio delle condizioni (Condition Monitoring Locations, CML) da ispezionare. I CML sono collocati nelle aree in cui statisticamente si riscontra un accumulo di danni causati da sollecitazioni, attacchi chimici e/o altri fattori ove quindi una presenza di danneggiamenti è più elevata e/o in cui si sono verificati più frequentemente guasti.
Per ogni CML identificato nel piano di ispezione, viene raccolta una serie di letture ultrasoniche in modo da poter utilizzare l'analisi statistica e modellare la distribuzione statistica dei risultati.

3. Benefici in termini di sicurezza dell'ispezione mediante ultrasuoni

Per eseguire una accurata analisi di integrità delle apparecchiature in materiale composito, ad oggi, si sono eseguite tecniche di ispezione convenzionali come l'ispezione visiva esterna, tecnica che risulta limitata in quanto soggettiva e non completa (nessuna visione dall'interno e nessuna informazione sullo stato dello strato meccanico resistente).
Per eseguire analisi più scrupolosa è richiesto solitamente l'accesso all'interno (spazio confinato e/o l'utilizzo di prove distruttive su un campione dell'apparecchiatura.
L'accesso a spazi confinati è:

- Pericoloso, si richiedono adeguate procedure di sicurezza per operare;
- Dispendioso in termini di tempo e di costi, poiché richiede l'arresto delle apparecchiature;

In aggiunta, le ispezioni visive sono chiaramente soggettive per natura e dipendono interamente dalla capacità del singolo ispettore di osservare e identificare eventuali danneggiamenti.
A meno che non si prelevi un campione per sottoporlo a una prova distruttiva, non è possibile determinare con esattezza l'entità del danno.
Inoltre, i test distruttivi sono onerosi e complessi in quanto richiedono preliminarmente che le attrezzature vengano rese "non idonee" al servizio prelevando diversi campioni dall'apparecchiatura e poi rese, in seguito, nuovamente idonee al servizio, con costi aggiuntivi per le adeguate riparazioni e i tempi di inattività.
Al contrario, nel caso delle ispezioni tramite ultrasuoni, esse vengono eseguite interamente dall'esterno dell'apparecchiatura, eliminando o riducendo drasticamente la necessità di ingressi in spazi confinati, con conseguente riduzione dell'esposizione del personale a rischi chimici e ambientali.



Figura 5. Operatore raccoglie dei dati, tramite ultrasuoni, sulla parete dell'apparecchiatura in PRFV.

La possibilità di effettuare ispezioni in marcia, ovvero con impianto in esercizio, consente inoltre di evitare i rischi associati alle fasi di fermo e riavvio, statisticamente tra le più critiche in termini di incidenti industriali.
In aggiunta, il monitoraggio dello stato della barriera anticorrosione permette di identificare precocemente il rischio di perdite di contenimento e di rilascio di sostanze pericolose, intervenendo prima che si verifichino eventi con potenziale impatto ambientale e sulla sicurezza degli operatori.

4. Conclusioni

Il metodo di ispezioni tramite ultrasuoni di apparecchiature e/o tubazioni in materiale composito rappresenta un vero cambiamento di paradigma nella gestione degli asset in materiale composito, trasformando un'attività storicamente basata su valutazioni soggettive in una procedura ingegneristica quantitativa, accurata, ripetibile e basata sui dati.
Colmando un vuoto normativo decennale in materia di ispezione in servizio del PRFV, il sistema, in chiave fortemente innovativa, fornisce una valutazione oggettiva della Fitness-For-Service, consentendo di ottimizzare i costi manutentivi, prevenire cedimenti catastrofici e garantire elevati standard di sicurezza per il personale, l'ambiente e le infrastrutture industriali.

Bibliografia e sitografia

[1] ISO, “ISO14692: Petroleum and natural gas industries – Glass reinforced plastics (GRP) piping”, 2017

[2] ISO, “EN 13121 GRP Tanks and Vessels for use above ground”, 2022

[3] Clarkson Geoff, WRC Bulletin 601. Welding Research Council, Inc. 2023, pp. 6-9

Controllo mediante ultrasuoni di tubazioni HDPE – valutazione della Probability Of Detection (POD)

G. Augugliaro[1], F. Brini[1], L. Bruzzo[2], C. Mennuti[1], P. Quaresima[1], A. Demma[3]

[1]Inail - Dit Roma
[2]Inail – Uot di Livorno
[3]Omnia Integrity - UK

Sommario
Il controllo non distruttivo in tubazioni di HDPE, con particolare riferimento alla saldatura, è un argomento rilevante per il settore ed è regolato dalle normative della serie UNI EN 13100 "Prove non distruttive di giunti saldati di prodotti semifiniti di materiale termoplastico", con normative specifiche su esame visivo (VT), controllo radiografico a raggi X (RT) e controllo per mezzo di ultrasuoni (UT).
Un problema significativo nel controllo mediante UT di prodotti in HDPE è il rilevamento di echi di difetti in presenza di rumore strutturale dovuto alla diffusione delle onde ultrasoniche e all'elevata attenuazione del segnale.
In questo lavoro sono stati effettuati dei controlli mediante ultrasuoni, utilizzando sonde piane, con la finalità di valutare la probabilità di detezione (POD, *Probability Of Detection*) di difetti artificialmente prodotti in tubazioni DCR+RC (*Dioxide Chlorine Resistant* + *Resistant to Crack*) con l'approccio "*hit/miss data*" attraverso la costruzione di curve POD.
I difetti analizzati sono sia monodimensionali, per simulare la presenza di una cricca, sia bidimensionali, per simulare la presenza di corrosione/erosione.
I risultati del controllo con UT confermano la diminuzione della probabilità di detezione di difetti con l'aumentare dello spessore della tubazione.
I risultati vengono poi confrontati con quelli ottenuti con il metodo delle microonde su una lastra di HDPE con difetti artificiali

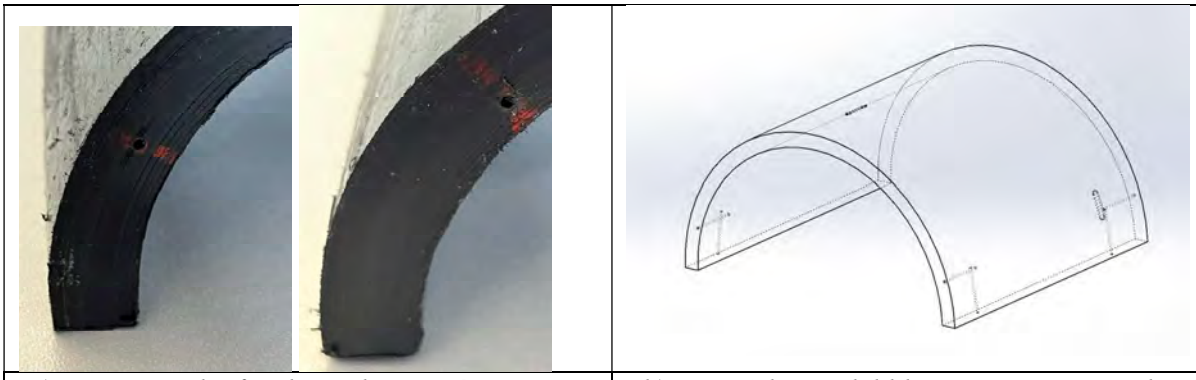
1. Introduzione

L'esame difettoscopico a ultrasuoni (UT) delle tubazioni in HDPE è attualmente impiegato soprattutto per il controllo delle saldature, ma può essere utilizzato anche per valutare lo stato di conservazione e l'efficienza della condotta. In entrambi i casi è necessario considerare le difficoltà legate all'elevata attenuazione del materiale e, per le saldature, alla particolare geometria del giunto.
In questo studio viene presentata un'analisi preliminare finalizzata a definire una metodologia per la costruzione di curve POD mediante la simulazione di difetti artificiali. A tal fine è stato realizzato un blocco campione contenente difetti standard (fori laterali paralleli all'asse, noti come SDH – *side drilled holes*), sul quale sono state eseguite prove sperimentali UT con sonda piana. I risultati ottenuti sono stati utilizzati per validare le simulazioni sviluppate con il software CIVA^{NDE}, attraverso il quale è stato modellato in 3D il blocco campione con i difetti SDH utili alla calibrazione.

Dopo aver confrontato il modello con il provino reale, sono stati creati modelli di difetti lineari con lo scopo di riprodurre indicazioni di tipo planare; successivamente sono state realizzate simulazioni di controllo UT variando tipologia e quantità dei difetti. I risultati delle simulazioni, integrati da un errore di misura per rappresentare la variabilità dovuta all'operatore, sono stati infine utilizzati come base per la costruzione delle curve POD.
Infine, viste le difficoltà di avere risultati attendibili per alti spessori, è stato realizzato un campione con difetti "*bottom hole*" a fondo piatto per confrontare il metodo UT e il metodo a microonde.

2. Realizzazione del blocco campione e prove sperimentali

Come pubblicato in [1], è stato realizzato il blocco campione seguendo la ASME V articolo V "metodo ultrasonoro per i materiali", nella appendice X "Esame ultrasonoro del HDPE", nel paragrafo X.434 "Blocchi campione"; è stato utilizzato un tubo in HDPE DCR+RC di diametro esterno 280 mm e spessore 14 mm. Il blocco campione è stato realizzato con una porzione di tubo di lunghezza 250 mm, tagliandolo a metà in direzione longitudinale per poter creare i SDH, uno a ¼ dello spessore (¼ T) il secondo a metà dello spessore (½ T) e l'ultimo a ¾ T, come indicato in figura 1.



a) Foto dei fori laterale a metà spessore e a ¾ dell spessore del blocco campione

b) Schema del blocco campione realizzato

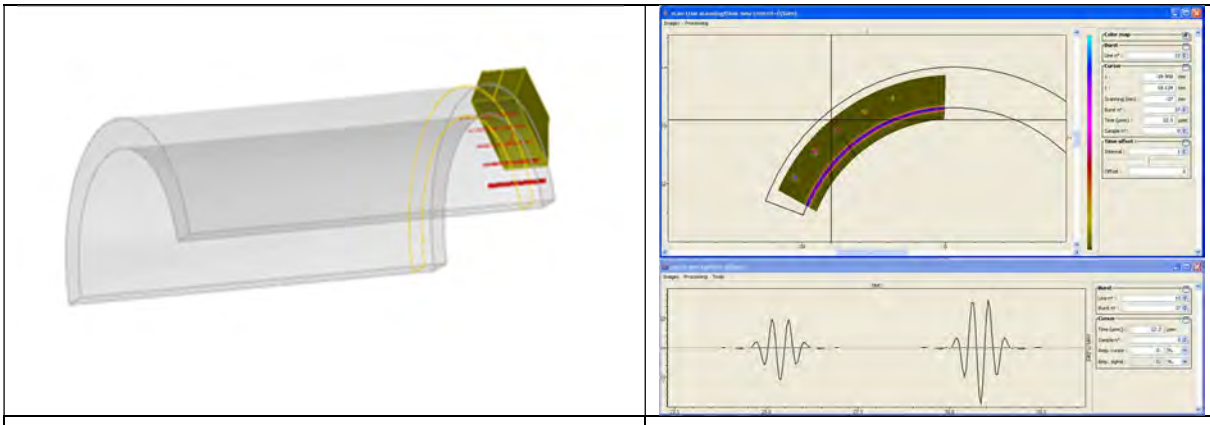
Figura 1. blocco campione

Il trasduttore utilizzato per questo lavoro ha frequenza 2,25 MHz e diametro ½ pollice; nella norma UNI EN 13100-3 viene indicato che per le ispezioni delle termoplastiche deve essere utilizzato un trasduttore con frequenza tra 1 MHz e 5 MHz. Nei controlli UT di tubazioni HDPE può essere utilizzata anche una frequenza di 0,5 MHz per superare l'alta attenuazione del materiale, soprattutto in grossi spessori, anche se questa frequenza non è tra quelle prescritte dalla normativa.

3. Simulazione

Per la modellazione e la simulazione del controllo ultrasonoro del giunto saldato ci si è avvalsi del codice CIVA^{NDE}, prodotto multi–piattaforma validato per innumerevoli applicazioni pratiche della software house CEDRAT Group di Meylan (Francia).
Nel caso specifico il set di discontinuità iniziale è costituito da SDH di dimensioni

variabili da 0,1 a 2 mm di lunghezza con un incremento di 0,1 mm e in aggiunta il diametro di 0,45 per infittire la curva in un punto importante per la curva POD per il foro a ¼ T; I fori sono stati simulati ad una profondità di ¼ T, ½ T e ¾ T, per un totale di 63 discontinuità.
Per ogni indicazione è stato simulato il segnale UT come evidenziato in figura 2.

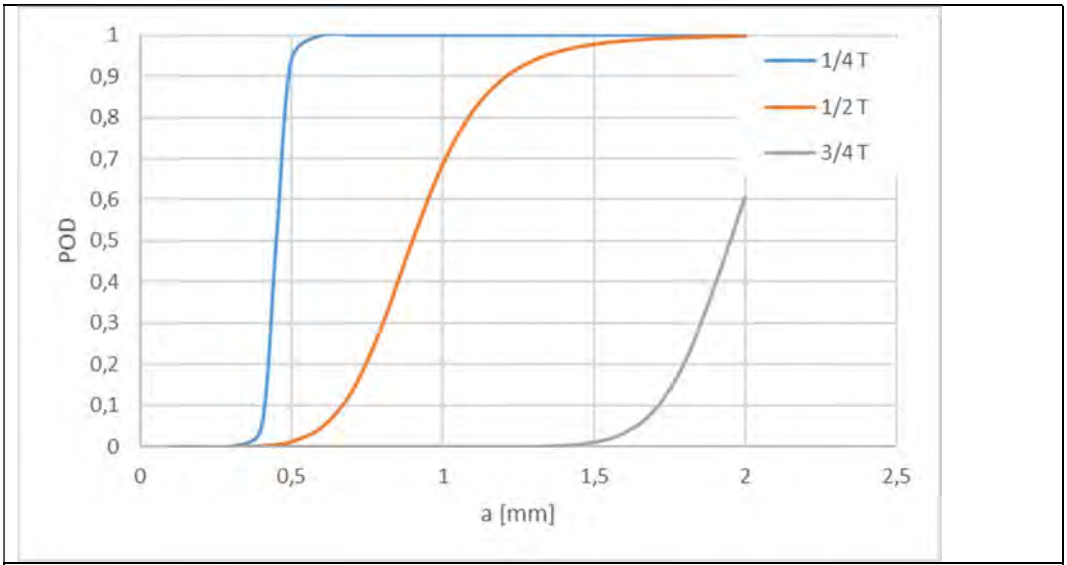


Schema CIVA$_{NDE}$	*Output CIVA$_{NDE}$* – BSCAN e ASCAN

Figura 2: esempio di simulazione di 5 SDH a metà dello spessore

4. Curve POD

Poiché la costruzione delle curve POD è basata su analisi di tipo probabilistico, è di fondamentale importanza avere a disposizione i risultati di un numero elevato di controlli per la stessa discontinuità. Dal punto di vista pratico è molto dispendioso (in termini di risorse umane e di tempo) realizzare un data-set che abbia una sufficiente "massa critica". Il codice CIVA^{NDE}, simulando l'effettuazione del controllo UT, permette di superare agevolmente questi ostacoli di carattere pratico. Questo approccio tramite simulazioni numeriche basate su modelli fisici per la determinazione delle curve POD si chiama approccio MAPOD, "Model-Assisted Probability of Detection" [2-3-4-5-6-7].
Le modalità di costruzione delle curve sono riportate in [1].
I risultati di questo studio sono i seguenti:
Per quanto riguarda i SDH, simulati a ¼ T, ½ T e ¾ T, utilizzando le formule sopra richiamate, si è pervenuti alla costruzione delle curve POD riportate in figura 3. Si ricorda che affinché le curve POD siano attendibili si richiede che il limite inferiore dell'intervallo di confidenza sia pari al 95%; mentre la discontinuità significativa è quella che corrisponde al 90% di Probabilità di Detezione $(a)_{90}$.



POD al variare del diametro del foro laterale per profondità del foro ¼, ½, ¾ T

Figura 3. Curve POD per SDH

Dall'analisi della curva POD ottenuta per i SDH, figura 3, si può dedurre che:

- per i fori a ¼ T, quindi vicini alla superficie di scansione, si raggiunge il 90% della POD quando il foro è di 0,5 mm di diametro e la curva scende molto ripida verso valori più bassi;
- per i fori a ½ T si raggiunge il 90% della POD quando il foro è di 1,2 mm;
- per i fori a ¾ T non si raggiunge il 90% della POD per diametri fino a 2 mm di diametro (si raggiungerebbe a 2,2 mm);

5. Realizzazione della piastra con difetti

Per approfondire il lavoro è stato realizzato un blocco campione a partire da una lastra di HDPE con lo spessore di 12,5 mm, e sono stati realizzati 5 difetti a fondo piatto con profondità da 1 a 5 mm e diametro costante di 18 mm, come indicato in figura 4; questi difetti sono poi stati analizzati con il metodo UT utilizzando la stessa sonda piana utilizzata in precedenza, e successivamente con il metodo delle microonde.





Lastra HDPE con difetti	Difetti ingranditi

Figura 4: Lastra di HDPE

5.1 Metodo UT

Anche in questa applicazione, il trasduttore utilizzato ha frequenza 2,25 MHz e diametro ½ pollice. Utilizza onde longitudinali, con velocità dell'onda di 2400 m/sec.
I difetti sono stati scelti di queste dimensioni perché eravamo sicuri di poterli rilevare sperimentalmente con il metodo degli UT; per questa sperimentazione è stato portato il segnale del difetto più profondo all'80% della scala verticale, come riferimento.
Le modalità di effettuazione delle prove sperimentali sono indicate in figura 5.
I risultati sperimentali hanno dato il risultato indicato in figura 6.
Nella figura 6, i puntini rappresentano l'ampiezza misurata con il metodo pulse-echo e si può evidenziare che il segnale del difetto di 1 mm, e quindi più lontano dalla superficie su cui viene applicata la sonda, è quello con ampiezza più bassa; inoltre, passando sopra ai difetti da 2, 3, 4, 5 mm, l'ampiezza dell'onda misurata aumenta sempre della stessa quantità, infatti si può vedere che la dipendenza dell'ampiezza dalla profondità del difetto è lineare, come indicato dalla retta che rappresenta la regressione lineare dei punti di misura.

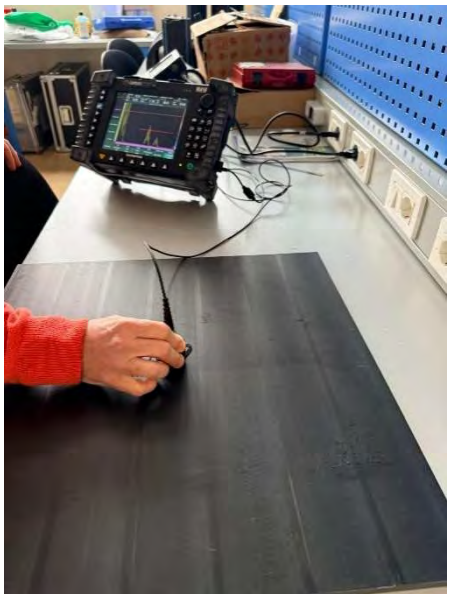


Figura 5. Controllo UT

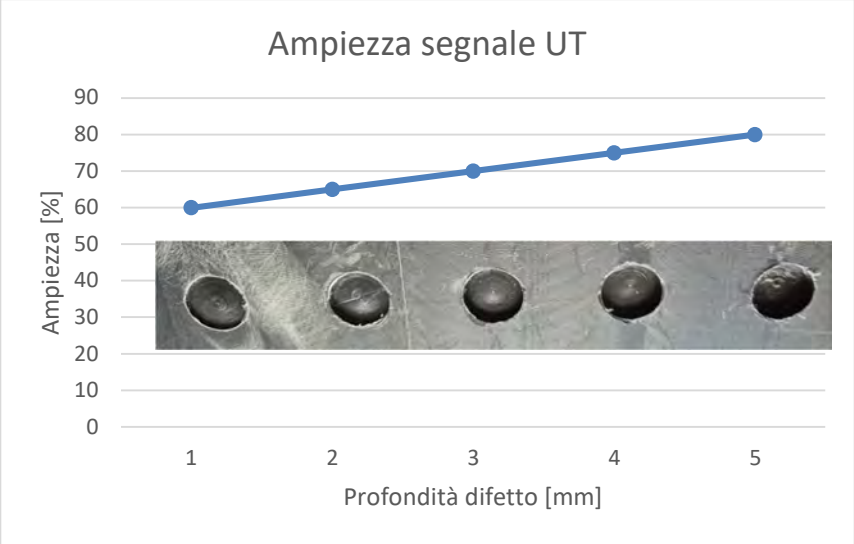


Figura 6. Risultati del controllo UT

5.2 Metodo Microonde

Le microonde sono onde elettromagnetiche caratterizzate da lunghezze d'onda comprese tra un metro e un millimetro, corrispondenti a frequenze che vanno da 300 MHz (per 1 m) fino a 300 GHz (per 1 mm). Il prefisso *micro* non indica che la loro lunghezza d'onda sia necessariamente inferiore al millimetro, ma deriva dal confronto con le onde radio di dimensioni molto maggiori impiegate prima dell'avvento delle microonde.

Un'applicazione relativamente recente consiste nel loro utilizzo per l'ispezione di materiali compositi, elastomeri, ceramici e, più in generale, di qualunque materiale di tipo dielettrico. In tali ambiti, le microonde si sono dimostrate particolarmente efficaci, permettendo ispezioni affidabili anche su materiali che rappresentavano una sfida significativa per i metodi di controllo tradizionali.

Si evidenzia che il metodo mediante microonde risulta applicabile esclusivamente ai materiali dielettrici; nei materiali conduttivi, infatti, gli elettroni liberi assorbono l'onda elettromagnetica in uno strato superficiale molto sottile (dell'ordine di 100–500 nm), riflettendo gran parte dell'energia sotto forma di onde secondarie e generando un'elevatissima riflettività.
Essendo radiazioni elettromagnetiche, le microonde possiedono un campo elettrico e uno magnetico, l'interazione di questi campi con il materiale dipende dalle proprietà del materiale stesso, determinando il modo in cui l'onda si propaga, si attenua o viene riflessa. Quando il segnale a microonde raggiunge un'interfaccia caratterizzata da un cambiamento nella costante dielettrica, viene riflesso subendo una variazione sia di fase sia di ampiezza. In questo modo nel mezzo si genera un'onda stazionaria che ritorna verso il sensore: dalle caratteristiche di fase e di ampiezza dell'onda di ritorno siamo in grado di comprendere lo stato del volume attraversato.
Il controllo è stato effettuato con la strumentazione OmniScan della Omnia Integrity, con sonda 24 GHz e encoder a due dimensioni.
Il risultato del controllo tramite microonde alla piastra in HDPE con difetti artificiali è rappresentato in figura 7, in cui si distinguono chiaramente i difetti dal fondo.

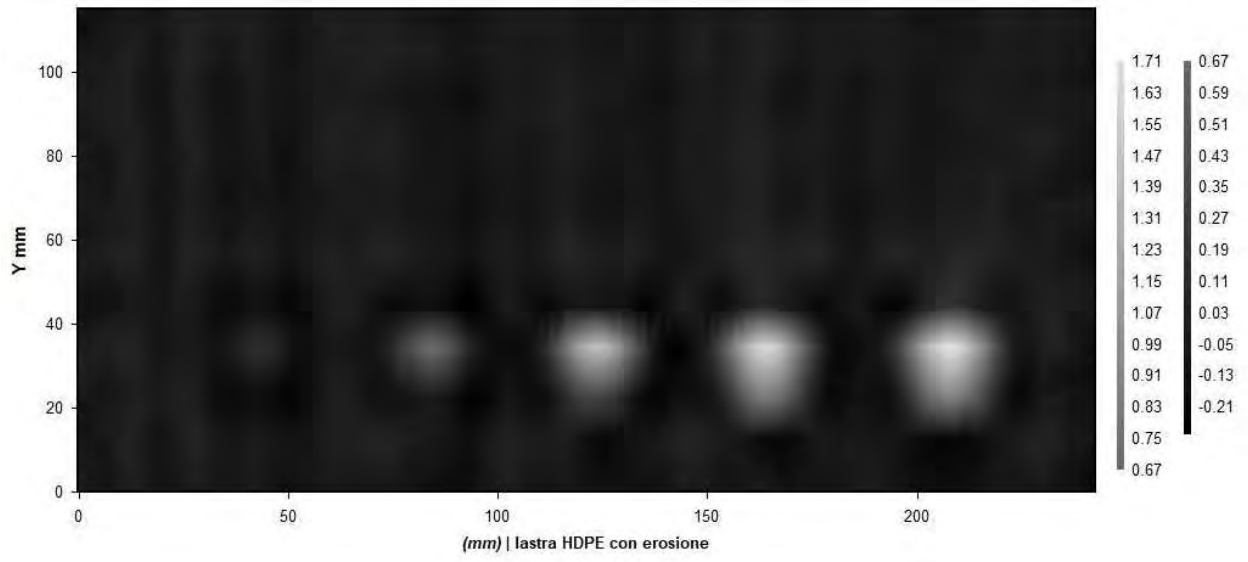


Figura 7. Risultati del controllo tramite microonde

6. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato uno studio preliminare di una metodologia di realizzazione di curve POD tramite simulazione di difetti artificiali in tubazioni di polietilene ad alta densità. In particolare, è stato realizzato un blocco campione con difetti standard sul quale sono state effettuate delle prove sperimentali con sonda piana i cui risultati sono stati quindi utilizzati per validare le simulazioni effettuate con il software CIVANDE. Le simulazioni effettuate hanno permesso la costruzione delle curve POD e quindi la valutazione della Probabilità di Detezione delle discontinuità al

variare della loro morfologia e dimensione. A partire da questi risultati, è stata verificata la capacità del metodo Ut e microonde di individuare dei difetti di grandi dimensioni realizzati con fresa a testa piatta su una piastra di HDPE di spessore si 12 mm. Per questa tipologia di spessori e di difettosità, entrambi i metodi individuano correttamente i difetti realizzati.
Il prosieguo del lavoro verrà effettuato realizzando difetti di diametri variabili, sempre più piccoli, per studiare la sensibilità dei metodi UT e microonde.

Bibliografia

[1] G. Augugliaro, F. Brini, L. Bruzzo, C. Mennuti, P. Quaresima– "Detezione di difetti artificiali in tubazioni in polietilene ad alta densità" - SAFAP 2023

[2] J.S. Knopp, J.C. Aldrin, E. Lindgren, C. Annis, "Investigation of a model-assisted approach to probability of detection evaluation", AFRL-ML-WP-TP-2006-494 Report, AIR FORCE RESEARCH LABORATORY, 2006.

[3] "Comparison of â Versus a and Hit/Miss POD-Estimation Methods: A European Viewpoint", Iikka Virkkunen, Tuomas Koskinen, Suvi Papula, Teemu Sarikka, Hannu Hänninen, Journal of Nondestructive Evaluation (2019) 38:89

[4] MIL-HDBK-1823A – Nondestructive evaluation system reliability assessment, US Dept of Defense, 2009.

[5] C. De Petris, C. Mennuti, "L'affidabilità dei sistemi NDE: problematiche ed esempi applicativi". Giornata di studio Fitness for service (FFS), "Valutazione d'idoneità al servizio di componenti eserciti" Centro CESI - Milano 2022

[6] C. Mennuti, G. Augugliaro, C. De Petris, F. Brini, P. Quaresima, "Approccio alla modellazione del controllo dei giunti saldati a sovrapposizione con tecnica basata sul metodo ad ultrasuoni". XIII Conferenza Nazionale AIPND – Roma 2009.

[7] Evaluation of POD Curves Based on Simulation Results, F. Jenson, E. Iakovleva and C. Reboud, CEA, France, 2009, https://www.ndt.net/article/jrc-nde2009/papers/27.pdf

Uso sicuro, rischi, manutenzione e defettologia dei recipienti di trasporto (bombole di gas disciolti e liquefatti, compressi)

A. Casillo[1], G. Giavarini[2]

[1]INAIL – Uot di Bergamo
[2]IUTENGAS INDUSTRIE SRL

Sommario
Le bombole per trasporto di gas disciolti, liquefatti e compressi costituiscono strumenti fondamentali nel settore dell'industria, della sanità e in numerosi settori produttivi, ma richiedono un utilizzo attento e conforme alle norme di sicurezza. Il loro impego sicuro si basa sulla deferenza di procedure di movimentazione, stoccaggio e utilizzo che evitano urti, cadute ed esposizioni a fonti di calore. Un uso scorretto può comportare danni significativi. Tra i principali rischi vi sono esplosioni, incendi, avvelenamento o asfissie dovute a fughe di gas, oltre a danni fisici derivanti dalla proiezione incontrollata delle bombole in caso di rottura delle valvole. La manutenzione preventiva costituisce un aspetto inderogabile: controlli periodici delle valvole, verifica delle date di controllo e ispezione visive delle superfici consentono di ridurre il rischio di perdite e malfunzionamenti. Inoltre, la formazione del personale e l'adozione di DPI garantiscono un ulteriore livello di sicurezza. I recipienti per il trasporto di gas disciolti e liquefatti possono presentare defettologie critiche che ne compromettono la sicurezza. Tra i principali difetti si annoverano: corrosione interna ed esterna, cricche dovute a fatica meccanica o urti, deformazioni da sovrappressione, danneggiamenti alle filettature e difetti delle valvole. In conclusione, la gestione corretta delle bombole di gas richiede consapevolezza, manutenzione costante e meticoloso rispetto delle regole di sicurezza, elementi questi indispensabili per tutelare operatori, ambiente e infrastrutture.

1. Introduzione

Il presente elaborato affronta il tema dell'uso sicuro, dei rischi, della manutenzione e delle principali defettologie associate ai recipienti per il trasporto di gas compressi, liquefatti e disciolti. Tali dispositivi rivestono un ruolo fondamentale in numerosi settori industriali, sanitari e produttivi, ma comportano al contempo rilevanti criticità in termini di sicurezza, dovute alla presenza di gas ad alta pressione e alle loro proprietà fisico-chimiche. L'analisi si sviluppa nel quadro normativo vigente, con particolare riferimento alla disciplina Europea e agli accordi internazionali sul trasporto di merci pericolose, evidenziando le implicazioni tecniche e operative connesse alla gestione di tali attrezzature. L'elaborato si propone di perseguire i seguenti obiettivi:

- ✓ Analizzare il quadro normativo di riferimento relativo ai recipienti a pressione trasportabili;

- ✓ Esaminare i principali rischi connessi all'utilizzo e alla movimentazione delle bombole di gas;
- ✓ Descrivere il principio di funzionamento e i componenti fondamentali dei recipienti;
- ✓ Approfondire le procedure di manutenzione e revisione previste dalla normativa;
- ✓ Individuare le principali defettologie e le cause di degrado dei recipienti;
- ✓ Evidenziare le misure di prevenzione e protezione finalizzate alla sicurezza degli operatori e dell'ambiente.

2. Sviluppo Normativo

Ad oggi l'impiego principale delle attrezzature a pressione è concentrato essenzialmente in due settori industriali quello degli impianti a pressione fissi e trasportabili. Attualmente la commercializzazione di tali attrezzature è gestita con due Direttive di prodotto che sono la: ***Direttiva 2014/68/UE (PED)*** per attrezzature fisse e ***Direttiva 2010/35/UE (T-PED)*** per attrezzature trasportabili. Le Direttive di prodotto vengono recepite dagli Stati membri dell'UE attraverso la ratifica delle stesse con appositi provvedimenti di legislazione dello stato membro, in particolare in Italia abbiamo il ***D. Lgs. n° 26 del 15/02/2016 per la PED e il D. Lgs. n° 78 del 12/06/2012 per la T-PED***. La Direttiva di interesse di questa memoria è la T-PED essa si occupa della progettazione, fabbricazione e valutazione di conformità delle attrezzature a pressione ***TRASPORTABILI***, al fine di migliorare la loro sicurezza e garantirne la libera circolazione nel mercato comunitario. Tutte le Direttive di prodotto garantiscono la libera circolazione dei propri prodotti all'interno del territorio UE, ma con approcci e logiche di pericolosità differenti, derivante sia dal fluido che l'attrezzatura contiene sia dall'esercizio della stessa. A tal riguardo nel caso della Direttiva PED l'esercizio dell'attrezzature è regolato da norme Nazionali, mentre nel caso della direttiva TPED l'esercizio dell'attrezzature è regolata da specifici accordi, chiamati regolamenti, sottoscritto con gli stati membri e cogenti per tutti i membri dell'UE all'atto della pubblicazione in Gazzetta Ufficiale. Il ***Regolamento ADR 2025*** recepito con DM del 13/02/2025 rende le nuove norme obbligatorie dal **1° luglio 2025.** La normativa ADR 2025 è un accordo internazionale relativo al trasporto di merci e ha come obiettivo quello di armonizzare le norme di sicurezza attinenti ai trasporti internazionali di merci su strada, nonché di garantire per tali trasporti un livello accettabile di sicurezza.

La gestione delle bombole di gas compressi, liquefatti e disciolti è disciplinata dal D.Lgs. 81/2008, dall'ADR 2025 e dalle norme tecniche UNI/EN. È vietato l'uso di bombole non identificabili o con collaudo scaduto. Devono essere movimentate in sicurezza e utilizzate secondo le istruzioni e le regole di buona tecnica.

2.1 Principio di funzionamento e componenti principali

Nelle bombole di gas viene stoccato il gas compresso, liquefatto o disciolto sotto pressione. I gas compressi (es Azoto) restano gassosi ad alta pressione, quelli liquefatti (es. GPL, Ammoniaca, CO_2) diventano liquidi occupando meno spazio, mentre quelli disciolti (es Acetilene) sono sciolti in un solvente all'interno di un materiale poroso per la stabilità dello stesso. Si precisa quanto segue:

- ✓ Bombole di gas compressi (non liquefatti): Il gas è immagazzinato allo stato gassoso ad alta pressione. La pressione diminuisce proporzionalmente all'uso del gas;
- ✓ Bombole di gas liquefatti: Il gas è mantenuto allo stato liquido ad alta pressione a temperature ambiente, all'interno la fase liquida è in equilibrio con la fase gassosa (vapore nella parte superiore. Quando il gas viene prelevato una parte del liquido evapora per mantenere la pressione costante finché il liquido non si esaurisce;
- ✓ Bombole di gas disciolti: Il gas è disciolto in un solvente (solitamente acetone o DMF) assorbito da una massa porosa solida all'interno della bombola. Questo sistema è necessario per evitare esplosioni o instabilità del gas, premettendone lo stoccaggio in sicurezza.

Le bombole gas compressi, liquefatti o disciolti sono normalmente costituite dai seguenti componenti (Figura n° 1):

- ✓ un'ogiva (parte superiore rastremata);
- ✓ una valvola posta sopra l'ogiva;
- ✓ un collare filettato (sull'ogiva);
- ✓ un cappellotto di protezione avvitabile sul collare filettato;
- ✓ un corpo cilindrico;
- ✓ un fondo;
- ✓ un piede d'appoggio o zoccolo (che circonda il fondo).



Figura 1. Componenti principali di una bombola

2.2 Identificazione ed etichettatura

L' ***ADR 2025*** divide le merci trasportabili in 9 classi (Figura n° 2) di pericolosità. La Classe 2 comprende gas compressi, liquefatti o disciolti con caratteristiche

infiammabili, comburenti, asfissianti, tossiche o corrosive, trasportabili attraverso bombole oggetto della memoria.



Figura 2. Classi di pericolosità delle merci trasportabili

Un altro aspetto di notevole interesse oltre alla classificazione di merce che viene trasportata con le bombole è la colorazione presente sull'ogiva della stessa, essa è basata su un codice chiamato **codice RAL** che rappresenta un sistema di codifica standard utilizzato prevalentemente in Europa così che siano omologati in vari settori come ad esempio, verniciatura, industria e edilizia. Il sistema RAL è stato sviluppato dall'Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (Istituto per la garanzia di qualità e l'etichettatura) in Germania negli anni '20 e '30 del secolo scorso, ed è ancora in vigore. RAL è l'acronimo di "***R**eichs-**A**usschuß für **L**ieferbedingungen und Güte-sicherung*" che in italiano si traduce in "Commissione nazionale per i termini di consegna e la garanzia di qualità".
La norma ***UNI EN 1089-3*** prevede un sistema di identificazione delle bombole con codici di colorazione delle ogive (Figura n° 3), non si applica alle bombole di GPL (gas di petrolio liquefatti) e agli estintori. In generale la colorazione dell'ogiva della bombola non identifica il gas, ma solo il rischio principale associato al gas.

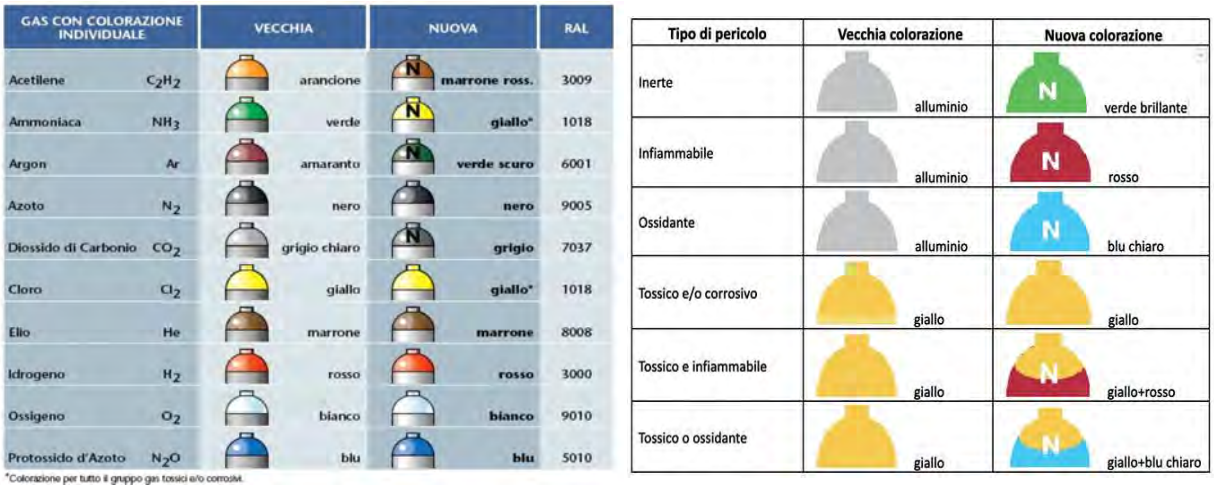


Figura 3. Codici di colorazione (UNI 1089-3)

In base al contenuto della bombola sull'ogiva della stessa sono indicate una serie di informazioni in modo permanente attraverso punzonatura. La normativa vigente con il termine punzonatura intende una qualsiasi marchiatura permanente applicata alle bombole mediante stampaggio con metallo duro, incisione, fusione o altri metodi simili. Le informazioni punzonate sull'ogiva sono:

- ✓ Pressione di riempimento e Pressione di prova in barg;
- ✓ Capacità in litri;
- ✓ Peso della bombola in kg;
- ✓ Fabbricante e numero di fabbrica;
- ✓ Data della prova idraulica o delle revisioni periodiche con vicino il punzone dell'ente che effettua le prove.

Il regolamento ADR 2025 specifica anche le disposizioni per la corretta etichettatura e marcatura degli imballi. Si tratta di simboli e segnali di pericolo con lo scopo di indicare agli operatori la presenza di merci pericolose e fornire informazioni sul tipo di pericolo associato a tali merci, in modo che sappiano come maneggiarla, trasportarla e stivarla per non causare possibili danni o incidenti. Una bombola è provvista di un'etichetta (Figura n° 4) in cui figurano una serie di informazioni, essa deve essere conforme alla norma ***UNI EN ISO 7225: 2012*** a titolo di esemplificativo di seguito si riporta un esempio di etichettatura:

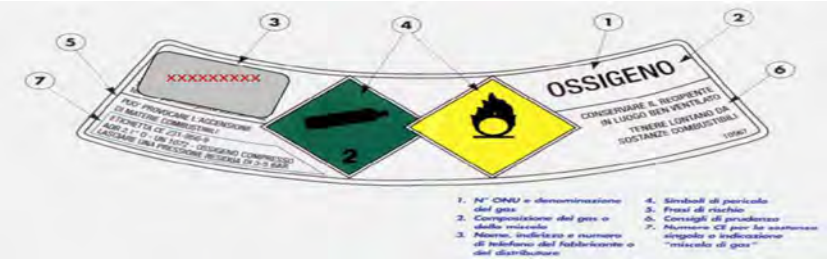


Figura 4. Etichettatura bombola (UNI 1089-3)

3. Manutenzione

La manutenzione principale delle bombole di gas (compresso, disciolto, liquefatto) prevede ispezioni visive periodiche, il controllo delle valvole e, obbligatoriamente, il controllo periodico (revisione periodica) a seconda dei gas contenuti nella bombola effettuato da enti autorizzati. Include sabbiatura, controllo corrosione e verniciatura.

3.1 Revisione periodica

La revisione periodica è prevista dalle norme vigenti (ADR 2025) per accertare l'integrità e l'idoneità al proseguimento dell'utilizzo del recipiente. La periodicità è stabilita dall'ADR, per la maggior parte dei gas è dieci anni. La revisione periodica viene effettuata secondo quanto previsto dalla ***UNI EN ISO 18119*** e prevede:

- ✓ controllo del peso e del filetto;
- ✓ ispezione visiva;
- ✓ la prova di pressione (test idraulico).

Inoltre, nella stessa norma già menzionata (UNI EN 18119) è stato introdotto la possibilità di sostituire l'ispezione visiva e prova idraulica con controllo UT. Nella figura n° 5 è rappresentata una rampa per l'esecuzione della prova idraulica a 6 postazioni, mentre nella figura n° 6 è riportata una rottura nella parte inferiore di una bombola di acciaio nel corso della prova idrostatica.



Figura 5. Rampa per esecuzione di prove idrostatiche

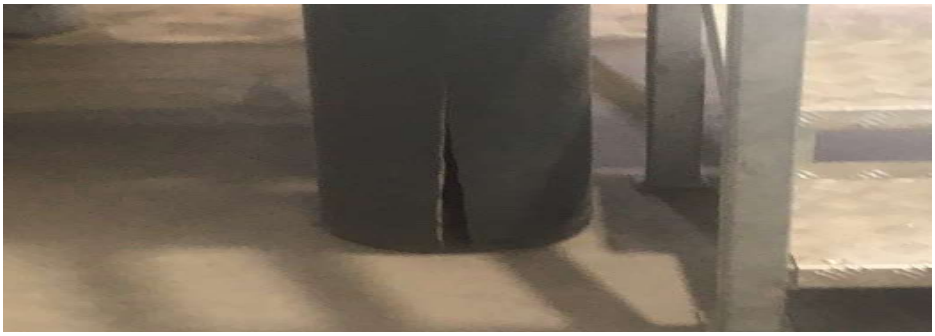


Figura 6. Rottura bombola

Nella figura n° 7 sono indicati degli esempi di periodicità, tratti dall'ADR 2025 a seconda del gas contenuto nella bombola.

P200 *Istruzione di imballaggio* P200

Tabella 1: Gas compressi

N° ONU	Nome e descrizione	Codice di classificazione	CL_{50} (in ml/m³)	Bombole	Tubi	Fusti a pressione	Pacchi di bombole	Periodicità delle prove (in anni) [4]	Pressione di prova (in bar) [3]	Pressione massima di servizio (in bar) [3]	Disposizioni speciali di imballaggio
1002	ARIA COMPRESSA	1A		x	x	x	x	10			
1006	ARGON COMPRESSO	1A		x	x	x	x	10			
1016	MONOSSIDO DI CARBONIO COMPRESSO	1TF	3760	x	x	x	x	5			u
1023	GAS DI CARBONE COMPRESSO	1TF		x	x	x	x	5			
1045	FLUORO COMPRESSO	1TOC	185	x			x	5	200	30	a,k,n,o
1046	ELIO COMPRESSO	1A		x	x	x	x	10			
1049	IDROGENO COMPRESSO	1F		x	x	x	x	10			d
1056	CRIPTO COMPRESSO	1A		x	x	x	x	10			
1065	NEON COMPRESSO	1A		x	x	x	x	10			
1066	AZOTO COMPRESSO	1A		x	x	x	x	10			
1071	GAS DI PETROLIO COMPRESSO	1TF		x	x	x	x	5			
1072	OSSIGENO COMPRESSO	1O		x	x	x	x	10			s

Figura 7. Estratto istruzione di imballaggio P200 dell'ADR 2025

3.2 Pericoli principali e precauzioni nell'utilizzo delle bombole

In generale il pericolo maggiore che accomuna tutte le bombole è l'elevata energia di compressione del gas contenuto che, se liberata a causa di urti, cadute, o al

cedimento del materiale del contenitore, può provocare danni a cose o persone. Per tale ragione le bombole sono costruite in modo da essere molto robuste, di contro il loro peso risulta essere spesso elevato, per cui anche se il contenitore resiste all'urto, sussiste comunque il pericolo che un operatore investito da una bombola possa riportare dei danni rilevanti. Le bombole devono essere sempre ancorate stabilmente sia nel trasporto (eseguito su appositi carrelli dotati di catena), sia nei depositi d'uso o di stoccaggio. Altre fonti di pericolo sono dovute alle proprietà intrinseche del gas contenuto, per es. caso di rilascio accidentale, il gas può generare atmosfere infiammabili, esplosive, tossiche o asfissianti. Inoltre, poiché il punto più vulnerabile di una bombola è la sua valvola, questa deve essere sempre protetta da un cappellotto avvitato al collare filettato dell'ogiva quando non è connessa a una linea di distribuzione del gas. Oltre al pericolo di urti o cadute, altri possibili danni alle bombole possono essere provocati dalla corrosione e dalla esposizione ad alte o basse temperature. In generale, le bombole devono essere protette dall'irraggiamento solare e da altre fonti di calore quali radiatori (termosifoni), forni ecc. Per ciò che riguarda le basse temperature il pericolo maggiore è quello dell'infragilimento del recipiente che ne facilita la rottura. A fini di un corretto utilizzo di una bombola si devono considerare le seguenti accortezze:

- ✓ Il contenuto della bombola deve essere sempre chiaramente identificabile.
- ✓ Non cancellare le scritte, non asportare le etichette, non ridipingere le bombole.
- ✓ È vietato oliare o ingrassare le valvole e tentare di fare riparazioni.
- ✓ Non utilizzare attrezzi per aprire e chiudere le valvole.
- ✓ È vietato utilizzare raccordi intermedi fra la valvola ed il riduttore o collettore.
- ✓ Non sottoporre le bombole a urti, non usarle come rulli e non farle cadere dall'alto.

3.3 Trasporto di bombole

I recipienti devono essere trasportati possibilmente in posizione verticale e, se sdraiati, devono essere disposti perpendicolarmente rispetto alla direzione di marcia. L'area di carico delle bombole e del furgone devono essere adeguatamente ventilate (Figura n° 8). Sarebbe necessario realizzare una ventilazione in diagonale per es. mediante aperture poste davanti e dietro, rispettivamente in alto e in basso. Si suggerisce l'impiego di aperture fisse, ad esempio quelle con i dispositivi ad alette, facendo sempre attenzione che siano aperte (Figura n° 9). In effetti può risultare difficile ventilare un furgone; nella maggior parte dei casi è sufficiente che la superficie totale delle aperture sia di circa 100 cm^2. Solo in via eccezionale si possono tenere i finestrini aperti per garantire la ventilazione necessaria - ma non devono essere chiusi nemmeno quando il veicolo è parcheggiato. L'allestimento dei furgoni deve essere idoneo con quanto richiesto dalla normativa ADR e dalla scheda di sicurezza del gas che si sta trasportando.



Figura 8. Trasporto bombole su furgone



Figura 9. Ventilazione furgone

La Linee Guida EIGA e le linee guida Nazionali, quest'ultime spesso pubblicate da Associazioni come Assogastecnici o CIG, danno una possibile ed utile configurazione per l'areazione dei furgoni (Figura n° 10).

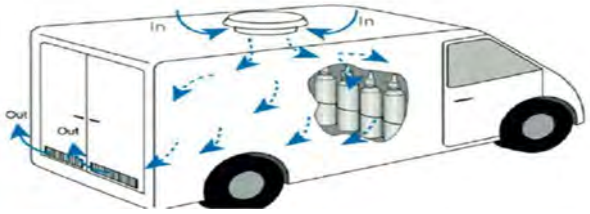


Figura 10. Possibile configurazione di areazione indicata dalla guida

3.4 Deposito, utilizzo e movimentazione

La collocazione ideale per una bombola è in un deposito esterno asciutto, ben ventilato e fresco (protetto dalle radiazioni solari o altre fonti di calore). Per alcuni tipi di bombole, questa è la sola collocazione ammessa: es. bombole di gas tossici e quelle di gas esplosivi. Le altre bombole possono essere collocate sia in depositi all'aperto sia in laboratori (chiusi); tuttavia, quelle collocabili all'interno dei laboratori devono comunque rispettare una serie di restrizioni (gas infiammabili, comburenti e nocivi devono essere poste in armadi per bombole tipo G90 conformi alla norma europea ***UNI EN 14470-2***) Ai fini della movimentazione è bene seguire le seguenti accortezze:

- Tenere separate le bombole piene da quelle vuote (Figura n° 11);
- Depositare e manipolare solo bombole munite di cappellotto di protezione della valvola (Figura n° 12);
- Evitare di immagazzinare in uno stesso luogo bombole contenenti gas tra loro incompatibili (es. infiammabili e comburenti);
- Non stoccare bombole in luoghi vicini a combustibili o a sostanze infiammabili;
- Non esporre le bombole all'azione diretta dei raggi del sole e comunque tenerle in ambienti ove la temperatura non superi i 50 °C non esporle a fiamme libere, al gelo, agenti chimici e umidità (Figura n° 13);
- Mantenere le bombole in posizione verticale.



Figura 11. Corretta separazione



Figura 12. Corretta manipolazione



Figura 13. Scorretta conservazione

4. Le maggiori defettologie che si possono presentare su una bombola

In questa tabella sono riportati le maggiori problematiche che si riscontrano nell'ispezione periodica delle bombole, mentre di seguito sono riportate alcune figure (n° 14, n° 15, n° 16 e n° 17) relative a immagini afferenti ai difetti di maggiore interesse.

TOTALE BOMBOLE PROCESSATE		**101.230**	
DESCRIZIONE CODICI DI SCARTO			
CORROSIONE ESTERNA	n°	403	18,74%
CORROSIONE INTERNA	n°	455	21,16%
AMMACCATURA	n°	49	2,28%
ARCO SALDATURA	n°	49	2,28%
SFIAMMATURA	n°	32	1,49%
CALO PESO	n°	55	2,56%
ROTTURA PIEDE	n°	55	2,56%
RIGONFIAMENTO	n°	28	1,30%
CRICCA	n°	11	0,51%
FILETTATURA BOCCHELLO ROVINATA	n°	926	43,07%
TAGLIO O INCISIONE	n°	26	1,21%
COLLARE DANNEGGIATO	n°	6	0,28%
POROSITA' SUL FONDO	n°	20	0,93%
MOLATURA	n°	35	1,63%
TOTALE	n°	2150	100%



Figura 14. Difetti di corrosione



Figura 15. Difetti da CO_2



Figura 16. Difetti di Laminazione



Figura 17. Arco di saldatura

5. Conclusioni

Le analisi condotte evidenziano come la gestione dei recipienti per il trasporto di gas richieda un approccio sistematico e rigoroso, fondato sulla piena integrazione tra normativa tecnica, procedure operative e formazione del personale. I rischi associati a tali attrezzature, legati sia all'energia di compressione sia alle caratteristiche dei gas contenuti, rendono imprescindibile l'adozione di adeguate misure di prevenzione, nonché l'esecuzione puntuale delle attività di manutenzione e controllo. La presenza di defettologie, quali corrosione, cricche e danneggiamenti strutturali, sottolinea l'importanza delle ispezioni periodiche e della tracciabilità delle condizioni di esercizio. In conclusione, il rispetto delle disposizioni normative e delle buone pratiche tecniche rappresenta un elemento essenziale per garantire elevati standard di sicurezza, contribuendo alla tutela degli operatori, delle infrastrutture e dell'ambiente.

Bibliografia

[1] Direttiva 2010/35/UE (T-PED);
[2] Direttiva 2014/68/UE (PED);
[3] ADR 2025;
[4] Norma UNI EN 1089-3 e UNI EN18119;
[5] Norma UNI EN 14470-2;
[6] D.Lgs. 81/2008;
[7] Linee Guida Tecnica EIGA (European Industrial Gases Association);
[8] Linee Guida Tecnica Nazionale (Pubblicazione guida alla gestione delle bombole gas compressi di Asso Frigoristi).

Caso studio sulla valutazione dell'integrità di un'autoclave per il trattamento di manufatti industriali

G. De Gennaro[1], D. Sallustio[1], M. Vincitorio[2], L. Rosati[2]

[1]Inail – Uot di Bari
[2]SAIPEX S.r.l.

Sommario
Col presente lavoro si propone il caso studio di un'autoclave da 232.000 litri, pressione di progetto 13 bar, anno di costruzione 1979, materiale acciaio al carbonio, diametro interno 4 metri circa, adibita al trattamento di componenti aeronautici a base di fibre e resine particolari per la polimerizzazione delle stesse; il trattamento consiste in cicli di riscaldamento-permanenza-raffreddamento grazie all'ausilio di due serpentini interni adibiti alle fasi di riscaldamento e raffrescamento della camera.
L'autoclave è stata oggetto di verifica di messa in servizio a causa di una nuova installazione nell'ambito della medesima attività industriale; in tale circostanza l'INAIL ha chiesto una valutazione a fatica, ad integrazione della documentazione di rito presentata dall'utilizzatore e dalla ditta consulente coautrice della presente memoria.
Valutare l'integrità strutturale di componenti eserciti da decine di anni è, come noto, complesso a causa dei molteplici fattori coinvolti: assunzioni progettuali e codici di calcolo adottati, dettagli costruttivi, storia e modalità d'esercizio etc. di cui spesso ci sono difficoltà nel reperire la documentazione.
Il caso studio propone una metodologia per valutare potenziali danneggiamenti dovuti principalmente ai numerosi cicli di fatica termo-meccanica. L'approccio adotta principalmente le norme UNI/TS 11325-11 [1] e UNI 11706 [3] per l'approccio metodologico, e la norma armonizzata UNI EN 13445-3 [2] per le valutazioni analitiche.

1. Descrizione dell'autoclave e modalità di funzionamento

Il ciclo in autoclave consiste nella preliminare pressurizzazione dell'autoclave con azoto di rete secondo un gradiente di salita, mantenimento e discesa della pressione; all'interno del periodo di mantenimento si svolge il ciclo di temperatura grazie a due distinti serpentini all'interno del fasciame, uno attraversato da olio diatermico a circa 200°C per la fase di riscaldamento, mentre il secondo contenente acqua a temperatura ambiente per la fase di raffreddamento.
I materiali da trattare sono racchiusi all'interno di sacche sottovuoto che hanno il compito di evitare l'introduzione di aria o azoto nella struttura del materiale composito. La diffusione della temperatura, sia in fase di riscaldamento che in fase

di raffreddamento, è favorita da ventilatori, posizionati sul fondo posteriore opposto al sistema di chiusura autoclave con dispositivo a manovra unica.

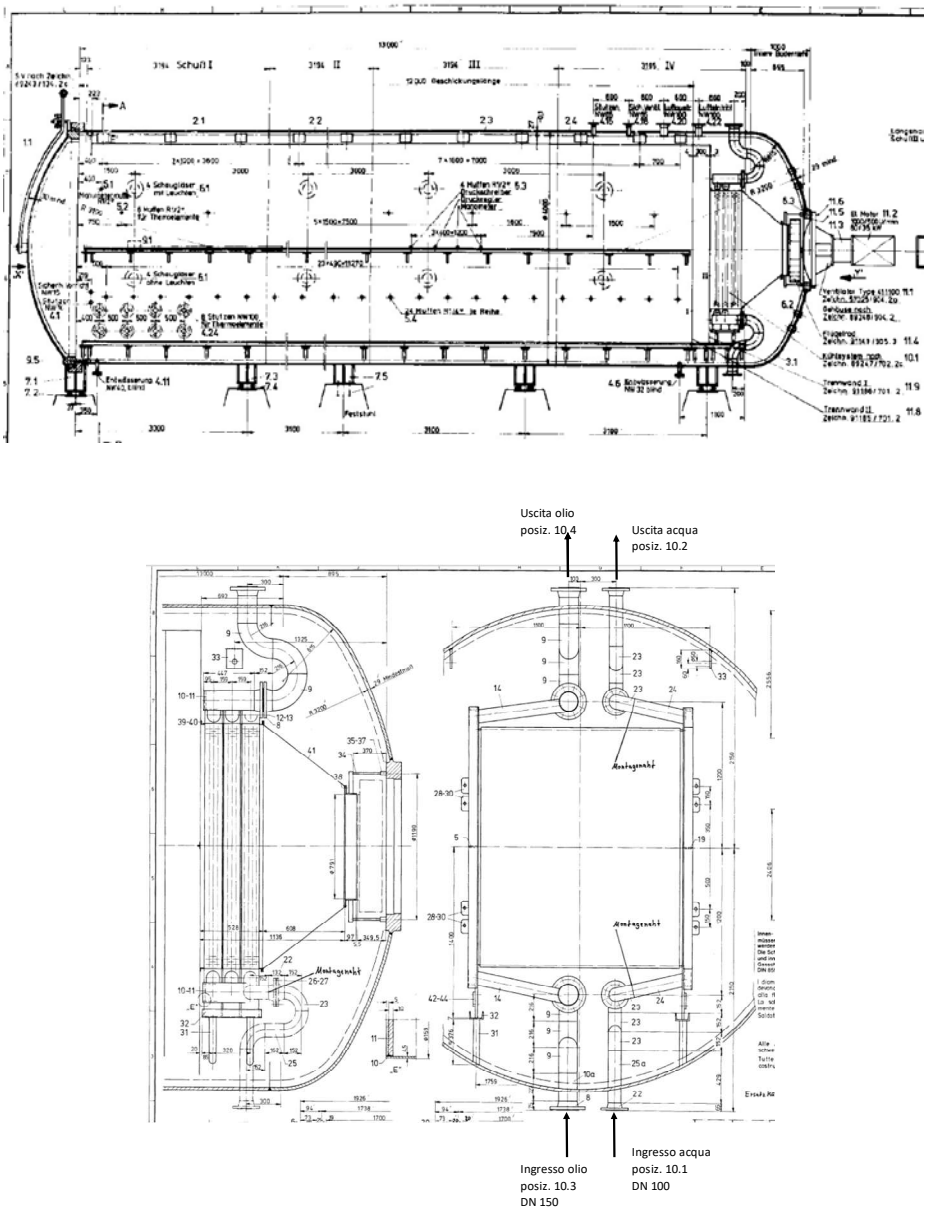


Figura 1. Stralcio del disegno costruttivo originario

L'apparecchiatura è stata originariamente progettata con le specifiche tecniche raccolta VSR, M ed S edizioni 1972. Di seguito le caratteristiche:

Dati di progetto			
Autoclave		**Serpentino di riscaldamento**	
Pressione di progetto	1,37 Mpa	Pressione di progetto	0,29 Ma
Temperatura di progetto	250°C	Temperatura di progetto	300 °C
Modulo di efficienza giunti saldati	0,85		
Spessore nominale fasciame	27 mm		

Tabella 1:Dati di progetto autoclave

Di seguito si riportano le ampiezze dei cicli cui è interessata l'autoclave, in funzione del ciclo tipo più critico ai fini dell'analisi in oggetto (l'utilizzatore adotta diversi cicli di trattamento a seconda del tipo di fibre, delle caratteristiche finali che si vogliono raggiungere etc.):

Ciclo termo-meccanico	
Range di pressione durante il ciclo	0,60 Mpa
Temperatura minima	20 °C
Temperatura massima durante il ciclo	180 °C

Tabella 2. Ciclo termo-meccanico autoclave

Il ciclo si ripete 3 volte al giorno (ciascun ciclo di durata 8 ore) durante la settimana, e nel weekend si ha 1 solo ciclo. Pertanto, in un anno si realizzano n° 16 cicli/settimana per 52 settimane/anno = 832 cicli/anno. Considerando come anno di inizio attività il 1979, e considerando che l'obiettivo è traguardare altri 10 anni di vita utile, si hanno i seguenti parametri:
• Cicli compiuti dall'inizio attività ad oggi 2025, momento della verifica, considerando i periodi di non esercizio desunte da registrazioni interne aziendali: ~37440 cicli;
• Cicli richiesti per traguardare la vita per i prossimi 10 anni, ossia raggiungere tra 10 anni un numero di cicli approssimativamente pari a 45.760 .
La valutazione è stata implementata al fine di verificare se l'autoclave, stante i cicli ad oggi effettuati in numero pari a 37.440 e sulla base dei cicli ammissibili rinveniente dall'analisi, possa ancora funzionare per ulteriori 10 anni, quindi compiere altri 8300 cicli circa entro la vita utile a fatica.

2. Approccio alla valutazione a fatica secondo la UNI/TS 11325-11 [1]

La UNI/TS11325-11 fornisce la procedura per valutare l'idoneità al servizio di attrezzature e insiemi a pressione, o loro componenti esenti da difetti e soggetti a fatica di natura termica e/o meccanica, sia ad alto sia a basso numero di cicli. Inoltre, consente di determinare la frazione di vita spesa a fatica in funzione delle modalità di esercizio con indicazioni sulle possibili azioni da intraprendere per prevenire l'insorgenza di difetti in particolare la nucleazione di cricche.
La valutazione della vita teorica a fatica di un'attrezzatura a pressione viene effettuata sulla base degli esiti delle seguenti azioni da eseguire nell'ordine:

- Analisi preliminare che tiene conto del progetto, della storia di esercizio dell'apparecchio, dei dati di ispezioni precedenti, di incidenti, riparazioni e/o modifiche;
- Individuazione di ulteriori eventuali meccanismi di danneggiamento, ad esempio la corrosione, che possano influire sull'analisi; a tal proposito si può far riferimento alla UNI 11706:2018;
- Calcolo della vita teorica a fatica**:** la norma UNI/TS 11325-11, per il caso studio in esame, suggerisce la EN 13445-3 capitolo 17 oppure capitolo 18, a seconda

se si vuol adottare il metodo semplificato oppure un'analisi approfondita supportata da una FEM. A tal proposito si ritiene precisare che la suddetta norma armonizzata citata è una norma di progettazione quindi applicabile per apparecchi realizzati con le moderne tecnologie di materiali e procedimenti di fabbricazione, in particolare per i processi di saldatura. Pertanto, i risultati dovrebbero essere presi con opportuna cautela e a dovuta "distanza", seppur è anche vero che le curve di fatica e le formulazioni adottate dalla norma EN 13445-3 capitolo 17 sono caratterizzate da uno spiccato approccio conservativo dell'intero metodo semplificato;

- Eventuali azioni correttive da intraprendere (sostituzioni, riparazioni, etc.);
- Definizione dell'intervallo di ulteriore esercizio dell'attrezzatura e dell'eventuale nuovo regime di esercizio;
- Definizione del Piano dei controlli non distruttivi con le relative periodicità, durante il proseguo dell'esercizio.

3. Considerazioni di tipo qualitativo, preliminari al calcolo

È ben noto che tipicamente il danneggiamento da fatica si verifica nelle zone di membrature particolarmente sollecitate, interessate da concentrazione di sforzi ad esempio in corrispondenza degli intorni delle aperture sul mantello a partire dalla giunzione saldata fasciame bocchello e per una certa distanza all'incirca pari a $1{,}75\sqrt{(D \cdot e)}$ in direzioni longitudinale e/o circonferenziale (D ed e, rispettivamente diametro esterno e spessore del mantello). Per il caso in esame, preliminarmente, sono da attenzionare i bocchelli posizione 10.3 e 10.4 corrispondenti all'ingresso/uscita olio diatermico, sia per il maggior diametro delle aperture, sia per i cicli termici cui sono interessati. In tali zone, infatti, influiscono anche le sollecitazioni denominate "secondarie", dovute alla differenza di temperatura ΔT lungo lo spessore e/o lungo una direzione della membratura; sono sollecitazioni autolimitanti, cioè non devono equilibrare un carico esterno ma insorgono per l'esistenza di un vincolo tra le membrature adiacenti per l' imposizione della congruenza delle deformazioni dovute alla variazione di temperatura. Tali sollecitazioni "secondarie" possono essere scovate solo con un'analisi FEM a cui segue la loro caratterizzazione per "confrontarle" con le sollecitazioni ammissibili; il medoto by formula, secondo EN 13445-3 o ASME né tanto meno la raccolta VSR, non "indaga" su questa tipologia di sollecitazioni definite secondarie, seppur le stesse influiscono in certi casi pesantemente nel danneggiamento per fatica.

Influiscono infine sul danneggiamento a fatica le cosidette "zone di intaglio", quali la tipologia di saldatura fasciame – bocchello (se a piena penetrazione o parziale penetrazione), i raggi di raccordo del tronchetto col fasciame quest'ultime responsabili dell'insorgenza di sollecitazioni di "picco"; infine, ovviamente, la presenza di difetti in saldatura (originatisi durante la fabbricazione oppure sviluppatisi durante l'esercizio) e le eventuali riparazioni effettuate durante l'arco di vita d'esercizio.

4. Procedimento di calcolo semplificato, secondo EN 13445-3 cap. 17 [2]
La norma europea EN 13445-3 per gli apparecchi a pressione non soggetti a fiamma riporta al capitolo 17 un metodo semplificato per il calcolo del numero di cicli ammissibile in apparecchi soggetti a fatica. La variazione di sollecitazione convenzionale necessaria per la valutazione del numero di cicli ammissibile, viene calcolata con i parametri e le formulazioni di seguito riportate sia per le variazioni di pressione $\Delta\sigma_p$ che per le variazioni di temperatura $\Delta\sigma_T$. Viene inoltre fornita una serie di curve di fatica differenziate in base alla cosiddetta "classe di saldatura": per saldature a piena penetrazione e aventi maggior controllo NDT (classe di saldatura elevata) vengono fornite curve con valori elevati del $\Delta\sigma$ convenzionale, mentre per saldature a penetrazione parziale e con pochi o nessun controllo (classe di saldatura bassa) le curve sono caratterizzate, a parità di numero di cicli, da valori più bassi del $\Delta\sigma$. Il metodo semplificato adotta una semplice somma degli effetti, sul danneggiamento a fatica, dovuti ai Δp ed ai ΔT, in termini di variazioni di sollecitazioni convenzionali $\Delta\sigma_p$ e $\Delta\sigma_T$. Ciò ovviamente in caso di simultaneità del verificarsi dei ΔP e dei ΔT, quest'ultimi riferiti alle variazioni di temperatura nel metallo della membratura in punti adiacenti e non del processo termico che si svolge nell'attrezzatura; di tale aspetto dell'analisi si parlerà più specificatamente in avanti. Il $\Delta\sigma$ convenzionale dovuto ai soli cicli di pressione è dato dalla formula 17.6-1a della EN 13445-3 (per il significato dei singoli parametri, si parlerà nel successivo paragrafo 4.1):

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{P_{max}} \cdot \eta \cdot f \qquad (1)$$

il $\Delta\sigma$ convenzionale dovuto ai soli cicli di temperatura è dato dalla formula 17.6-1b:

$$\Delta\sigma = \kappa \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T_{diff} \qquad (2)$$

Essendo

K il fattore convenzionale di sollecitazione derivante da stress termico (vedasi paragrafo 4.1)

E il Modulo di Young del materiale alla temperatura di calcolo T^*, in MPa

α il coefficiente di dilatazione termica del materiale alla temperatura di calcolo T^*, in $°C^{-1}$

Dal valore sopraripportato $\Delta\sigma$ (dato dalla somma dei due contributi in caso di simultaneità dei cicli oppure presi separatamente nel caso contrario) si calcola $\Delta\sigma^*$ (variazione convenzionale di sollecitazione da inserire nella curva di fatica) da inserire nel calcolo dei cicli ammissibili attraverso la formula 17.6-9 della EN 13445-3; è ottenuto dividendo $\Delta\sigma$ per i fattori correttivi Ce e CT (entrambi ≤1), il primo rappresentativo dello spessore della membratura (diminuisce all'aumentare dello spessore, quindi rappresenta l'incidenza dello spessore della membratura), il

secondo rappresenta la temperatura *T** ossia la temperatura media convenzionale durante il ciclo.

4.1 Simultaneità dei cicli di pressione e temperatura

Al fine di stabilire se i cicli di pressione e i cicli termici agiscano simultaneamente o no, deve essere considerata la storia di carico (variazione nel tempo) di entrambi i carichi; qui è stato necessario un attento approfondimento dell'analisi, con la sinergia di tutte le figure aziendali che intervengono nel processo di trattamento materiali in autoclave. La camera dell'autoclave in questione viene preliminarmente pressurizzata con azoto e dopo il raggiungimento della pressione di regime inizia il ciclo termico; la depressurizzazione della camera (scarico dell'azoto), inizia dopo il termine del raffreddamento della camera e dei componenti da trattare ad opera di un serpentino contenente acqua a temperatura ambiente. A questa conclusione si è giunti mediante approfonditi confronti con gli addetti aziendali alle macchine autoclavi e visionando attentamente le registrazioni dei diagrammi dei cicli per i diversi materiali trattati.

4.2 Parametri che intervengono nel calcolo semplificato secondo cap. 17 della EN 13445-3 [2]

Come già accennato, l'analisi semplificata a fatica dipende da una serie di parametri, alcuni rinvenienti dai particolari costruttivi desumibili dal disegno originario dell'apparecchio, altri ancora dall'analisi storica dell'esercizio; questi parametri assunti vengono comunque impregnati del conservatorismo che vuol adottare l'incaricato dell'analisi, in funzione delle incertezze legate al fatto che molto spesso si hanno pochi elementi documentali a disposizione, trattandosi di apparecchi di costruzione ultra decennale quale è il caso oggetto di studio.

Al fine di entrare nel vivo del metodo ex cap. 17, si elencano i parametri significativi coinvolti nell'analisi a fatica termo–meccanica:

Pmax: maximum permissible pressure del componente che si sta studiando, più precisamente relativa all'apertura sul componente;

Tmin: temperatura minima di esercizio durante il ciclo;

Tmax: temperatura massima di esercizio durante il ciclo;

***T**:** temperatura media convenzionale durante il ciclo;

f: tensione ammissibile del materiale alla temperatura media del ciclo T* (Mpa), nel caso in esame pari a 137 MPa;

η: stress factor, fattore convenzionale di sollecitazione di un componente, ricavabile dalla tabella 17.2, nel caso in esame assunto pari a 3; questo fattore è rappresentativo della concentrazione degli sforzi, dovuto alla tipologia ed alla geometria del giunto saldato. È dato dal rapporto tra il valore max di stress nella membratura in corrispondenza alla Pmax e il valore della tensione ammissibile alla temperatura di calcolo;

Detail description			Detail No.	Maximum permissible pressure P_{max}	Conditions	η
Openings in shells (with	without a nozzle		OS1	equation (9.5-10) or (9.5-12)	$d_i / D_i \leq 0,6$	3,0
	Nozzle (with thickness e_n), without reinforcing plate	with full penetration welds	OS2.1	equation (9.5-10) or (9.5-12)	$0,7 \leq e_n / e_s \leq 1,5$ and $d_i / D_i \leq 0,6$	3,0
		with fillet or partial penetration welds with throat $\geq 0,8 e_{min}$	OS2.3			3,0
		with fillet or partial penetration welds with throat $< 0,8 e_{min}$ [8)]	OS2.4	equation (9.5-10) or (9.5-12)		3,0 with Class acc. Table 17-4
				P_{max} of component of thickness e_{min} (unpierced shell or nozzle)		1,8 with Class 32

Figura 2. Stress factor η, secondo la tabella 17.2 della EN 13445-3

ΔP: variazione di pressione durante un ciclo, calcolato come differenza algebrica tra la pressione massima e la pressione minima, Mpa;
Δσ: variazione convenzionale di sollecitazione durante un ciclo MPa;
$\Delta\sigma_p$*: variazione convenzionale di sollecitazione, da inserire nelle curve di fatica, dovuta alla variazione di pressione ciclica, Mpa;
$\Delta\sigma_T$*: variazione convenzionale di sollecitazione, da inserire nelle curve di fatica dovuta alla variazione di temperatura ciclica, Mpa;
C: classe di saldatura; è uno dei parametri fondamentali dell'analisi a fatica, rappresentativo della tipologia di giunto e del "testing group" dell'apparecchio assunto in fase di progettazione, quindi della tipologia ed estensione di CND effettuati ed il conseguente modulo di efficienza delle saldature assunto;

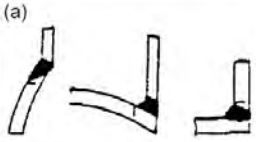
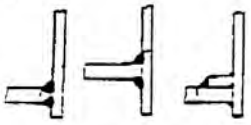
Detail No.	Joint type	Sketch of detail	Class		Comments
			testing group 1 or 2	testing group 3	
3	All types	(a) 	71 80	63	Full penetration welds: — as welded — if weld toes dressed — in all cases
		(b) 	63 71	63	Partial penetration welds, with weld throat ≥ 0,8 x thinner thickness of connected walls: — as welded — if weld toes dressed — in all cases

Figura 3. Coefficiente C "classe di saldatura" secondo la tabella 17.3 della EN 13445-3

Tdiff: differenza di temperatura tra punti adiacenti della membratura sulla quale si stanno valutando gli sforzi derivanti dai *ΔT*; possono riguardare il gradiente attraverso lo spessore, oppure lungo la superficie del mantello entro una distanza pari a $1,75 \sqrt{(D \cdot e)}$ in direzioni longitudinale e/o circonferenziale (*D* ed *e,* rispettivamente diametro esterno e spessore del mantello). Nella fattispecie del caso in esame, da valutazioni fatte, del tutto qualitative, *Tdiff* riguarda la fase di incipiente immissione dell'olio diatermico ad una temperatura di circa 200°C

attraverso il bocchello di ingresso posizione 10.3; il *Tdiff* significativo si verifica a partire dalla giunzione bocchello–fasciame ed estendendosi in un intorno del bocchello di ampiezza pari a $1{,}75\sqrt{(D \cdot e)}$, piuttosto che lungo lo spessore del mantello essendo quest'ultimo esiguo e pari a 27 mm. Tale valore dipenderebbe dai fenomeni di trasmissione di calore fluido-membratura (coefficiente di scambio termico tra parete e olio diatermico, conducibilità del metallo, coefficiente di dilatazione, etc.); bisognerebbe misurarlo in campo con l'ausilio di termocoppie. Valutazioni e stime effettuate dalla ditta proponente, hanno portato ad un risultato trascurabile rispetto al contributo dovuto al *ΔP*;
K: fattore convenzionale di sollecitazione derivante da stress termico; questo fattore, di cui alla tabella seguente, dipende dalle modalità del verificarsi del gradiente termico.

Thermal gradient type	***K***
Linear gradient through thickness o Linear gradient along surface direction in shell	0,75
Linear gradient along surface direction in flat end	1
Thermal shock	1,5

Tabella 3: Valori di K secondo la tabella 17-1

5. Analisi dei risultati

L'analisi svolta porta a dire che tutte le membrature oggetto di analisi traguardano la vita ulteriore di 10 anni che ci si era prefissati inizialmente, ad eccezione delle aperture sulle quali sono saldati i bocchelli posizione 10.3 e 10.4 relativi all'ingresso/uscita serpentino olio diatermico, come ci si aspettava (cfr. paragrafo 5) essendo le connessioni di maggior diametro sull'autoclave e quelle direttamente interessate dai maggiori *ΔT*. Le aperture DN 100, posizione 10.1.e 10.2, in corrispondenza dell'ingresso /uscita del serpentino di raffreddamento contenente acqua a temperatura ambiente, considerata la modalità di raffreddamento durante il ciclo, sono risultate meno critiche in termini di indice di danno a fatica.
Relativamente alle aperture bocchelli posizione 10.3 e 10.4 e alle due condizioni di carico *ΔP e Tdiff*, come gia detto valutate separatamente considerata la modalità di svolgimento del ciclo in autoclave, risulta più gravosa quella relativa ai *ΔP*. La vita residua dell'attrezzatura risulta pertanto limitata da questi componenti per effetto dei *ΔP*, ed è pari a 3123 cicli, corrispondente a circa 3 anni e 9 mesi di esercizio; quindi, minore dagli ulteriori dieci anni che è il target prefissato dall'utilizzatore; in altri termini l'indice di danno, dato dal rapporto cicli prefissati dall'utilizzatore pari a 50.000/cicli ammissibili, risulta maggiore di 1.
A questo punto la società incarica per la valutazione, ha proposto un approccio a parere degli scriventi in linea con l'appendice M della EN 13445-3, laddove si dice che quando la vita a fatica ammissibile calcolata per un componente è stata

raggiunta (ossia quando è stato raggiunto il numero di cicli ammissibili, in altri termini quando l'indice totale di danneggiamento a fatica ≥1), devono essere eseguite prove non distruttive nel modo più completo possibile, con particolare attenzione alle zone soggette alle maggiori sollecitazioni. A tal fine sono stati previamente eseguiti i controlli magnetoscopici e ad ultrasuoni al 100% sulle saldature dei bocchelli interessati (posizioni 10.3 e 10.4 ingresso e uscita olio diatermico) e sulla saldatura longitudinale della virola IV sulla quale insistono i citati bocchelli, in conformità alla tabella 6.6.1-1 della EN 13445-5 corrispondentemente al testing group 1b.
Con ben noto un'analisi secondo cap. 18 della EN 13445-3, supportata da un calcolo FEM, avrebbe dato quasi sicuramente risultati meno restrittivi; l'adozione di un metodo più approfondito, quale è l'applicazione del cap. 18, è ovviamente decisione dell'incaricato alla valutazione, in accordo alla parte aziendale in merito alle risorse da impiegare nella fattispecie.



Figura 4. Controlli non distruttivi

Dopo l'accertamento dell'assenza di difetti con l'esito dei su citati CND, sono stati assunti nel calcolo a fatica i parametri tipici del testing group 1b anziché quelli relativi al testing group 3b (corrispondente a z=0,85 modulo di efficienza delle saldature adottato dal fabbricante originario); pertanto il valore C della "classe di saldatura" è salito da 63 a 71 secondo la tabella 17.3 della EN 13445-3, fermo restando il medesimo valore di η=3.
La tabella che segue riporta i risultati dell'analisi, sulla base dei cicli ad oggi effettuati e sulla base dei cicli medi annui previsti (832 cicli/anno), con le due classi di saldatura assunte:

Componente	**Servizio**	*Cicli complessivi dal 1979 al 2025*	*Ulteriori Cicli da traguardare dal 2025 al 2035*	*Cicli totali da traguardare al 2035*	*Cicli ammessi adottando C=63*	*Indice di danno, adottando C=63*	*Cicli ammessi adottando C=71*	*Indice di danno, adottando C=71*
Posiz. 10.3 bocchello DN150	Ingresso olio caldo	37.440	8.320	45.750	40.563	1,23	58.061	0,86
Posiz. 10.4 bocchello DN150	Uscita olio freddo	37.440	8.320	45.750	40.563	1,23	58.061	0,86

Tabella 4. Risultati analisi

6. Successive valutazioni secondo UNI/TS 11325-11 e EN 13445-3 annex M [1], [2]

Secondo la UNI/TS 11325-11 la prima valutazione di frazione di vita spesa a fatica deve essere eseguita dopo un numero di cicli pari a quelli di progetto indicati dal fabbricante. In assenza di tale informazione la prima valutazione deve essere eseguita dopo 1000 cicli; ovviamente per il caso in esame non è applicabile tale indicazione. Sempre secondo la UNI/TS 11325-11 le successive valutazioni devono essere eseguite quando l'ulteriore esercizio introduce un danneggiamento pari al 50% del danno residuo calcolato alla valutazione precedente. A tal fine si deve fare riferimento alla frazione di vita spesa a fatica per ciascun tipo di transitorio. Se la valutazione attuale fornisce una frazione di vita spesa a fatica D e una frazione di vita residua residuo DR=1–D, la valutazione successiva deve essere svolta quando l'esercizio introdurrà un danneggiamento ulteriore pari a 0,5 DR. Unitamente al calcolo di vita residua teorica a fatica, si deve predisporre un piano di controlli per il monitoraggio dell'efficacia della valutazione effettuata e indicazioni su eventuali azioni correttive da intraprendere (ove necessarie).

L'appendice M della EN 13445-3 intitolata "*Monitoraggio di vessels operanti in regime di fatica*" afferma che le ispezioni in esercizio rivestono particolare importanza ai fini dell'individuazione precoce di danni incipienti. Le ispezioni visive interne devono essere integrate con ulteriori prove non distruttive nelle zone maggiormente sollecitate, in particolare mediante CND per individuare eventuali cricche superficiali. La prima ispezione deve essere effettuata dopo un periodo corrispondente ad al massimo il 50% della vita a fatica ammissibile calcolata. Le ispezioni successive devono essere effettuate dopo ulteriori periodi non superiori al 50% della vita a fatica ammissibile calcolata. Le registrazioni dei cicli di carico possono indicare la necessità di effettuare ispezioni anticipate rispetto a quelle pianificate. Qualora le condizioni di esercizio si discostino da quelle assunte nel calcolo di progetto ai sensi dei Capitoli 17 o 18 e siano tali da provocare un maggiore danneggiamento a fatica, oppure qualora siano prevedibili altri tipi di danneggiamento che intervengono prima della fine dell'intervallo di ispezione,

l'intervallo di ispezione deve essere ridotto al 25% del numero di cicli ammissibili oppure deve corrispondere a un indice totale di danneggiamento a fatica pari a 0,25. Quando la vita a fatica ammissibile calcolata per un componente è stata raggiunta (ossia quando è stato raggiunto il numero di cicli ammissibili, oppure quando l'indice totale di danneggiamento a fatica, secondo quanto definito nei Capitoli 17 o 18, ha raggiunto il valore 1), devono essere eseguite prove non distruttive nel modo più completo possibile, con particolare attenzione alle zone soggette alle maggiori sollecitazioni: controlli superficiali (magnetoscopici o LP) al 100% e volumetrici (ultrasuoni a sonde angolate) se l'accessibilità all'interno non è consentita o è disagevole per l'effettuazione di controlli superficiali. Se non vengono rilevate cricche nelle prove non distruttive effettuate agli intervalli di ispezione pianificati, può essere consentita la prosecuzione dell'esercizio. I successivi intervalli di ispezione dovranno essere ridotti in modo da corrispondere al minore tra:

- il 25% del numero di cicli ammissibili calcolati, oppure
- a un incremento dell'indice totale di danneggiamento a fatica pari a 0,25.

Per il caso studio in esame, sono state proposte le suddette indicazioni contenute nell'allegato M della EN 13445-3, con un piano dei CND al raggiungimento dei nuovi cicli ammissibili (corrispondenti all'assunzione della classe di saldatura C=71); in particolare controlli magnetoscopici delle giunzioni saldate bocchelli fasciame lato esterno ed interno, e controlli ad ultrasuoni specie se non fosse possibile l'accessibilità all'interno dell'autoclave. Se non verranno rilevate cricche nelle prove, gli intervalli di ispezione saranno effettuati al raggiungimento dell'ulteriore incremento del 25% del numero di cicli ammissibili calcolati, oppure all'incremento do 0,25 dell'indice di danno
Ovviamente quanto sopra si applica man mano ai vari componenti/membrature, quando si raggiunge la relativa vita utile.

7. Conclusioni

La valutazione a fatica dell'autoclave oggetto di studio ha inizialmente rilevato un indice di danneggiamento a fatica maggiore di uno, ossia un numero di cicli ammissibili inferiore al target di esercizio prefissato dall'utilizzatore per l'ulteriore esercibilità prevista pari a dieci anni; ciò in corrispondenza delle connessioni relative al serpentino di riscaldamento contenete olio diatermico, posizioni 10.3 e 10.4, praticate sulla virola IV del mantello.
Si ritiene condivisibile l'approccio adottato dalla ditta, descritto al paragrafo 5, per il superamento della suddetta criticità; ciò a valle di tutte le considerazioni fatte circa la conservatività della metodologia semplificata del capitolo 17 e a patto che venga pedissequamente implementato il citato piano dei CND al raggiungimento del nuovo numero di cicli ammissibili ed alle successive periodicità, il tutto secondo le

indicazioni dell’allegato M della EN 13445-3 ed in linea con il percorso generale della valutazione a fatica indicato nella UNI/TS 11325-11.

Bibliografia

[1] UNI/TS 11325-11:2015: Attrezzature a pressione-Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione-Parte 11: Procedura di valutazione dell'idoneità al servizio di attrezzature e insiemi a pressione soggetti a fatica

[2] UNI EN 13445-3:2026: Recipienti a pressione non esposti a fiamma-Parte 3: Progettazione

[3] UNI 11706:2018: Attrezzature a pressione - valutazione dello stato di conservazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione, a seguito del degrado strutturale e metallurgico dei materiali.

Riparazione di reattore smaltato: applicazione di piastre in tantalio e valutazione FEM su effetto intaglio localizzato a fatica oligociclica in corrispondenza dei punti di intervento.

R. Ciancio[1], M. Agnello[2], G. Iacino[3], A. Nappo[3], D. Chinellato[4]

[1]Inail – UOT di Genova
[2]Infineum Italia S.r.l.,
[3]Expertise S.r.l.
[4]Pfaudler Italia S.r.l.

Sommario
Il presente lavoro descrive gli interventi di riparazione eseguiti su un reattore smaltato da 38.000 litri, costruito nel 1989 secondo il codice ASME [1] (temperatura di progetto 300°C, pressione di progetto 12 barg), destinato alla produzione di cloro-disperdenti presso lo stabilimento Infineum Italia di Vado Ligure (SV). Il reattore, dopo un lungo periodo di inutilizzo, è stato reinserito in una nuova linea produttiva dedicata alla sintesi di additivi disperdenti mediante processo termico. L'intervento ha riguardato il ripristino del layer di smalto interno, danneggiato dal distacco di una pala dell'agitatore durante le operazioni di dismissione, e la verifica dell'integrità meccanica e della vita residua dell'attrezzatura. Dopo l'ispezione interna, che ha evidenziato 12 aree danneggiate sul fondo inferiore del reattore, Pfaudler ha eseguito la riparazione mediante applicazione di piastre di tantalio avvitate. Sono state condotte prove non distruttive estese e calcoli a fatica oligociclica secondo l'annesso V del codice ASME VIII-2, oltre a verifiche di integrità meccanica secondo le VSR. L'intervento ha ripristinato la protezione contro attacchi acidi e certificato, tramite analisi agli elementi finiti, una vita residua di 53,2 anni, confermando l'idoneità degli spessori residui del mantello.

1. Introduzione
Il reattore oggetto dell'intervento è un'attrezzatura a pressione costruita nel 1989 secondo il codice ASME [1] Section VIII Division 1, con capacità di 38.000 litri, temperatura di progetto 300°C e pressione di progetto 12 barg. L'attrezzatura, denominata R108, era stata originariamente installata presso lo stabilimento Infineum Italia S.r.l. di Vado Ligure per la produzione di additivi per oli lubrificanti e successivamente dismessa e posta in conservazione per diversi anni.
Lo stabilimento di Vado Ligure produce additivi ed ausiliari per l'industria dei lubrificanti, dei combustibili e per l'industria in generale, mediante processi di condensazione, esterificazione, alogenazione, fabbricazione di derivati fosforati, distillazione, solubilizzazione e miscelazione. I prodotti sono essenzialmente costituiti da preparati liquidi ad alta viscosità, classificabili come composti organici neutri o

composti polimerici modificati a medio peso molecolare, raggruppabili nelle categorie principali di disperdenti, miglioratori di viscosità e antiossidanti/antiusura.
Nel contesto della realizzazione di una nuova linea produttiva, che replica funzionalmente quella esistente, è stato deciso di reinserire il reattore R108. Durante le operazioni di movimentazione e preparazione al reinstallo, è stato rilevato un danneggiamento significativo del rivestimento smaltato interno, causato dal distacco accidentale di una pala dell'agitatore che ha impattato contro il fondo inferiore del reattore. La presenza di estese aree di smalto danneggiato ha reso necessario un intervento di riparazione specialistico, unitamente a una verifica completa dell'integrità strutturale dell'attrezzatura, considerando sia l'età dell'impianto sia le nuove condizioni operative previste.

2. Condizioni operative e criticità rilevate

Il reattore R108 è destinato a operare in condizioni di servizio severo, con esposizione a fluidi corrosivi acidi a temperature elevate durante le reazioni di sintesi degli additivi disperdenti. Il rivestimento smaltato interno svolge una funzione critica di protezione del substrato metallico contro l'attacco chimico. La perdita di integrità del rivestimento in zone estese rappresenta quindi una condizione inaccettabile per l’esercizio dell'attrezzatura.
Durante l'ispezione preliminare, sono state identificate 12 aree distinte di danneggiamento sul fondo inferiore del reattore, con dimensioni variabili e con esposizione del substrato metallico sottostante. La distribuzione delle aree danneggiate e l'estensione del danno hanno richiesto una valutazione approfondita delle opzioni di riparazione disponibili, considerando sia l'aspetto della protezione dalla corrosione sia la necessità di minimizzare i tempi di intervento per il rispetto dei programmi di avviamento della nuova linea produttiva.
Oltre al danneggiamento del rivestimento, l'età dell'attrezzatura e il suo precedente utilizzo hanno reso necessaria una verifica completa dell'integrità strutturale, con particolare attenzione ai fenomeni di fatica legati ai cicli termici e pressori previsti nel nuovo processo produttivo.

3. Metodo di riparazione adottato

3.1 Ispezione e valutazione del danneggiamento

Prima di procedere alla riparazione, è stata effettuata un’accurata ispezione della superficie interna dell’apparecchiatura, al fine di valutare l’integrità del rivestimento smaltato e definire la strategia di intervento più idonea. L’ispezione è stata condotta dai tecnici Pfaudler secondo le prescrizioni della norma **UNI EN ISO 28721-1:2019**[4], utilizzando tre metodi complementari:

- **Controllo visivo**, per individuare difetti superficiali quali pori, scaglie, cricche e sfogliature;

- **Controllo dielettrico (Spark test)**, per rilevare porosità e carenze di spessore del rivestimento;
- **Controllo con polveri elettrostatiche (Statiflux)**, per evidenziare cricche e microfessure non visibili ad occhio nudo.

L'analisi visiva è stata eseguita suddividendo la superficie in aree di circa un metro quadro e ispezionandole con luce radente.
Il controllo dielettrico (Spark Test) è rivolto alla ricerca di difetti tipo crepature, scalfitture, distacchi, difetti di laminazione, fori, bolle ed in genere ogni difetto che metta in continuità elettrica la superficie esterna del rivestimento con quella del metallo sottostante. La tensione applicata è pari a 5kV. Preventivamente all'ispezione viene verificata la capacità di scarica dell'apparecchiatura su una zona "nuda". La superficie da controllare viene esplorata al 100% attraverso l'utilizzo di apposite spazzole metalliche che vengono fatte scorrere con movimento circolare sulla superficie da esaminare. Nelle aree interessate da danneggiamento del rivestimento si innesca un arco elettrico che viene, oltreché rilevato visivamente, anche segnalato attraverso un avvisatore acustico.
Il controllo Statiflux consiste invece nell'applicazione di una polvere a base talco caricata elettricamente e spruzzata sulla superficie del rivestimento per verificare l'estensione di eventuali cricche non visibili ad occhio nudo o identificate con lo Spark Test.
L'esito dei controlli ha evidenziato la presenza di criccature sul fondo inferiore dell'apparecchio, in corrispondenza della sbocchellatura del boccaporto DN800, con metallo scoperto. Considerata l'entità del danneggiamento, si è deciso di procedere con una riparazione mediante **piastre in tantalio**, materiale scelto per la sua elevata resistenza chimica e compatibilità termica con lo smalto. Tale scelta è in accordo al Parere CTAIP: "Applicazione di chiodi o toppe di tantalio su smaltature" [5].

3.2 Tecnica di riparazione con piastre di tantalio

Le zone danneggiate sono state pulite e sgrassate con un solvente non infiammabile né tossico. Successivamente, con una mola portatile ad aria compressa ad alta velocità (circa 20.000 giri/min), sono state eliminate tutte le schegge di smalto e levigati i bordi della parte danneggiata, in modo da rimuovere ogni possibile punto di innesco per ulteriori scheggiature. Dopo aver determinato l'estensione della riparazione, sono state rilevate le dimensioni esatte delle piastre, che dovevano sporgere di 12-15 mm oltre la zona molata su ciascun lato.
Le piastre sono state tagliate seguendo la sagoma del danneggiamento rilevato e forate lungo il contorno. Successivamente, le piastre sono state sagomate per adattarsi alla superficie da riparare. È stata poi segnata la posizione di ciascuna piastra sulla superficie smaltata, per consentire un corretto riposizionamento. L'aderenza è stata verificata con uno spessimetro e, se necessario, sono stati effettuati adattamenti con lima o mola. Utilizzando la piastra come dima, è stata tagliata la guarnizione in PTFE, lasciandola sporgere di 2-3 mm oltre i bordi. I fori della

guarnizione sono stati realizzati con una fustella (diametro 6 mm) per garantire attrito con le viti. Sono state inoltre preparate piccole guarnizioni in PTFE, una per ogni vite. Infine, sono stati ricavati dischetti metallici dello stesso materiale della piastra, con diametro esterno di 15 mm e foro interno adeguato all'inserimento sulla vite.
La zona da riparare è stata pulita nuovamente con solvente, la piastra posizionata per segnare i fori e poi rimossa. Lo smalto è stato molato fino al metallo nei punti di foratura, quindi sono stati eseguiti i fori, puliti, filettati e avvitate le prime viti. Dopo aver ripetuto le operazioni per tutti i fori e verificato l'allineamento, la superficie interna alla marcatura è stata resa ruvida e, dopo una pulizia finale, sono state applicate tutte le viti. È stato preparato il cemento antiacido e applicato nelle zone corrose, oltre che in uno strato sottile sulla superficie da coprire. La guarnizione in PTFE è stata infilata sulle viti e premuta per distribuire il cemento ed eliminare sacche d'aria. Dopo aver applicato uno strato di cemento sulla guarnizione, la piastra pulita è stata posizionata e premuta, consentendo la fuoriuscita dell'eccedenza dai fori. Su ciascuna vite è stata avvitata la guarnizione in PTFE, seguita da uno strato di cemento, dai dischetti metallici e dai dadi, serrati fino a far incidere la guarnizione senza eccessi che potessero danneggiarla. L'eccedenza di cemento è stata rimossa e l'aderenza verificata con spessimetro.
Infine, le parti eccedenti delle viti sono state tagliate con seghetto, spianate con lima e il filetto cianfrinato per evitare allentamenti. Il cemento è stato lasciato essiccare secondo le prescrizioni prima di rimettere in servizio l'apparecchio.



Figura 1: Particolare intervento di riparazione nella zona di sbocchellatura boccaporto DN 800

In totale sono state eseguite 12 riparazioni con piastre in tantalio
L'intervento di riparazione è stato eseguito con successo, ripristinando l'integrità del rivestimento smaltato e garantendo la protezione anticorrosiva dell'apparecchiatura.

L’utilizzo di piastre in tantalio, opportunamente fissate e sigillate con cemento antiacido e guarnizioni in PTFE, assicura una resistenza chimica e meccanica adeguata alle condizioni operative previste.

4. Verifiche di integrità strutturale

Expertise S.r.l., in qualità di società di ingegneria incaricata della progettazione dell'intera nuova linea produttiva, ha commissionato le analisi necessarie per certificare l'integrità meccanica e la vita residua del reattore.

4.1 Prove preliminari non distruttive

Sono state eseguite prove non distruttive estese sull'intera attrezzatura per verificare l'assenza di difetti nel materiale base e nelle saldature. Il programma di controlli ha incluso esami visivi, esami con liquidi penetranti sulle superfici accessibili e misure di spessore mediante tecniche ultrasoniche in punti significativi del mantello e dei fondi. I controlli hanno confermato l'assenza di difetti significativi e hanno fornito i dati necessari per le successive analisi di vita residua. Gli spessori rilevati sono risultati in linea con quelli di progetto, con riduzioni limitate dovute all'esercizio pregresso.

5. Iter Autorizzativo della Riparazione

La proposta di riparazione è stata presentata ad INAIL al fine di ottenere un parere preventivo ed autorizzativo alla realizzazione degli interventi specificati al par. 3.2. Analizzata la documentazione presentata è stato richiesto di fornire maggiori elementi di dettaglio sugli spessori delle membrature e sulla profondità di infissione delle viti in tantalio. L’approvazione è stata inoltre condizionata all’esecuzione delle seguenti valutazioni integrative prescritte:

- Verifica di stabilità reattore R108 in accordo a Raccolta I.S.P.E.S.L. VSR[2] nelle condizioni ipotizzate con determinazione dello spessore minimo di calcolo
- Valutazione agli elementi finiti su effetto intaglio localizzato a fatica oligociclica in corrispondenza dei punti di intervento
- Piano dei controlli ulteriori sul Reattore prima della rimessa in esercizio.

È stato inoltre concordato su richiesta specifica dell’utilizzatore di non procedere a prova idraulica per non sollecitare le membrature e la struttura in considerazione dell’elevato volume. All’atto della verifica finale è stato eseguito un esame visivo interno volto alla verifica dimensionale delle riparazioni e alla verifica generale dello smalto di rivestimento del Reattore, nonché un esame visivo esterno. Il riavvio dell’attrezzatura è stato infine condizionato al rispetto dell’art.7 del DM 329/04 [3] prevedendo una verifica di integrità con i relativi controlli ed una successiva verifica di funzionamento.

5.1 Verifiche secondo le VSR

Sull’attrezzatura è stata eseguita anche verifica di stabilità in accordo al codice originario Raccolta I.S.P.E.S.L. VSR [2], aggiornato con le disposizioni Uni PdR-55:2019,

risultando i margini di corrosione previsti dal progetto originario ancora integri, per cui l'attrezzatura si conferma stabile sia a fatica che a pressione interna.

5.2 Analisi a fatica oligociclica

Per l'applicazione delle piastre di protezione in tantalio, come descritto al par. 3.2, la ditta Pfaudler ha dovuto effettuare dei fori filettati da 5mmx12mm sulla membratura da riparare, per l'inserimento di viti M6x25. Essendo il reattore soggetto a cicli termici, si è voluto valutare la resistenza a fatica dopo gli interventi, con particolare riferimento alla zona forata, eseguendo una analisi a fatica in accordo al codice ASME VIII div. 2, in cui gli stress vengono determinati e valutati con metodo ad elementi finiti.

Per l'analisi dell'andamento a fatica si fa riferimento alla curva tipica per acciaio al carbonio dal codice ASME VIII-2:

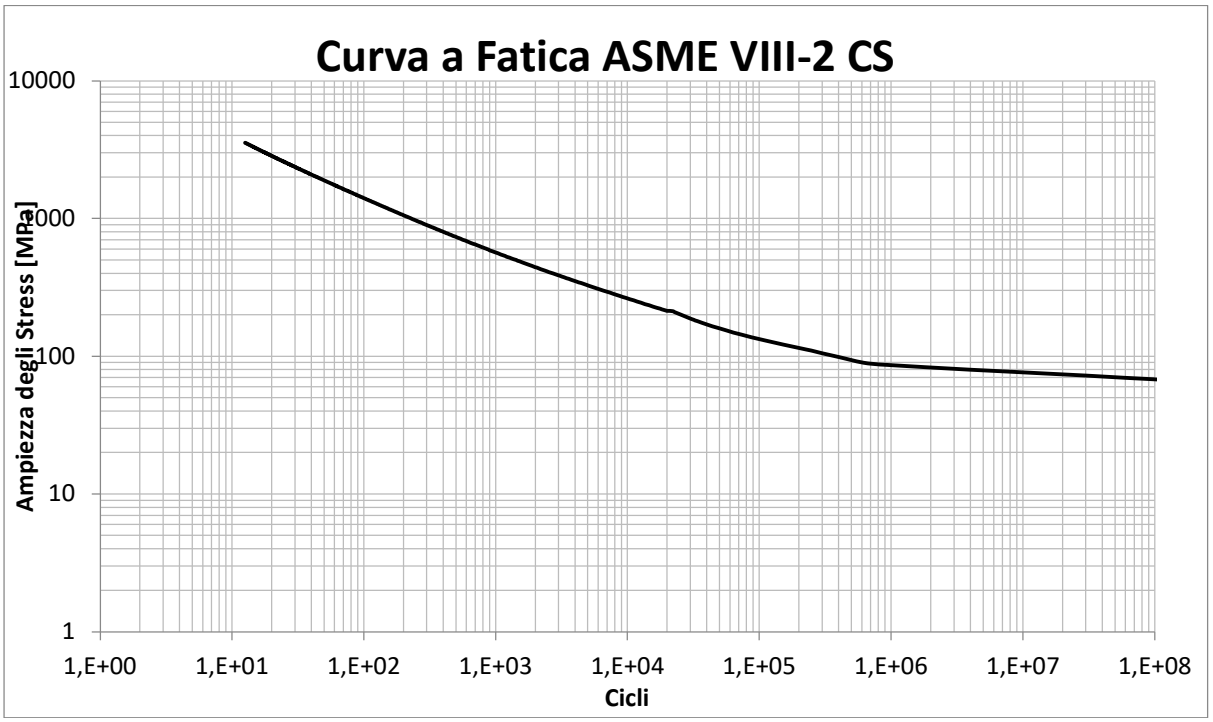


Figura 2. Diagramma Curva a Fatica ASME VIII-2 CS

Il reattore ha lavorato dal 1990 al 2023 con due cicli termici al giorno (350 giorni/anno) il che significa che ha consumato approssimativamente **23100 cicli**, assumendo conservativamente che le riparazioni siano state presenti sin dal primo giorno.

Per determinare la vita residua nelle condizioni dopo riparazione, bisogna determinare l'ampiezza degli stress che si vengono a generare localmente sui fori per poi ricavare i cicli ammissibili dalla curva.

Si realizza dunque un modello con elementi 3D della parte interessata, con condizioni di simmetria, inserendo tre righe di fori da 5mm con un passo di 25mm, che è una modellazione conservativa delle varie riparazioni effettuate. Si include nel modello anche il semitubo camicia prossimo ai fori, la parte restante non influenza gli stress sulla zona forata.

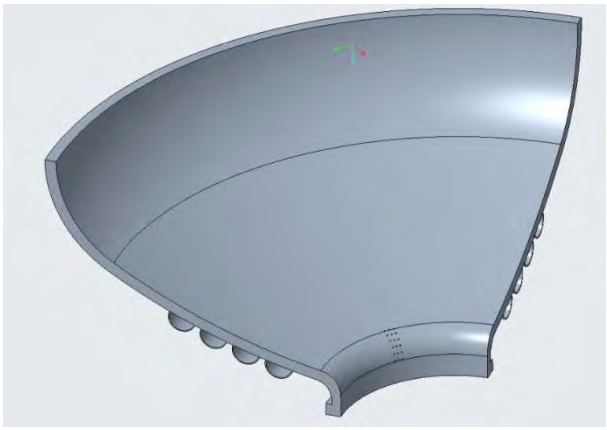


Figura 3. Modellazione agli elementi finiti fondo inferiore

Poiché non ci sono fluttuazioni di pressione, la valutazione della fatica per i fori viene effettuata solo per variazioni di temperatura, considerando in maniera conservativa un ΔT del fluido di 125°C (vedere la sezione 3). La valutazione viene eseguita per l'intervallo di temperatura (tra camicia e fluido del reattore) da 0 °C a 125 °C.
Di seguito il risultato dell'analisi termica:

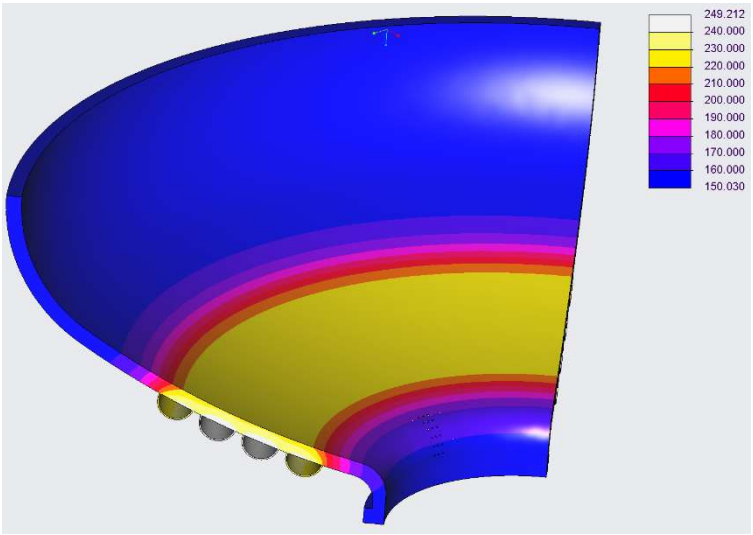


Figura 4. Risultato dell'analisi termica [°C]

Con tale distribuzione di temperatura si determinano gli stress range alla posizione dei fori con analisi ad elementi finiti:

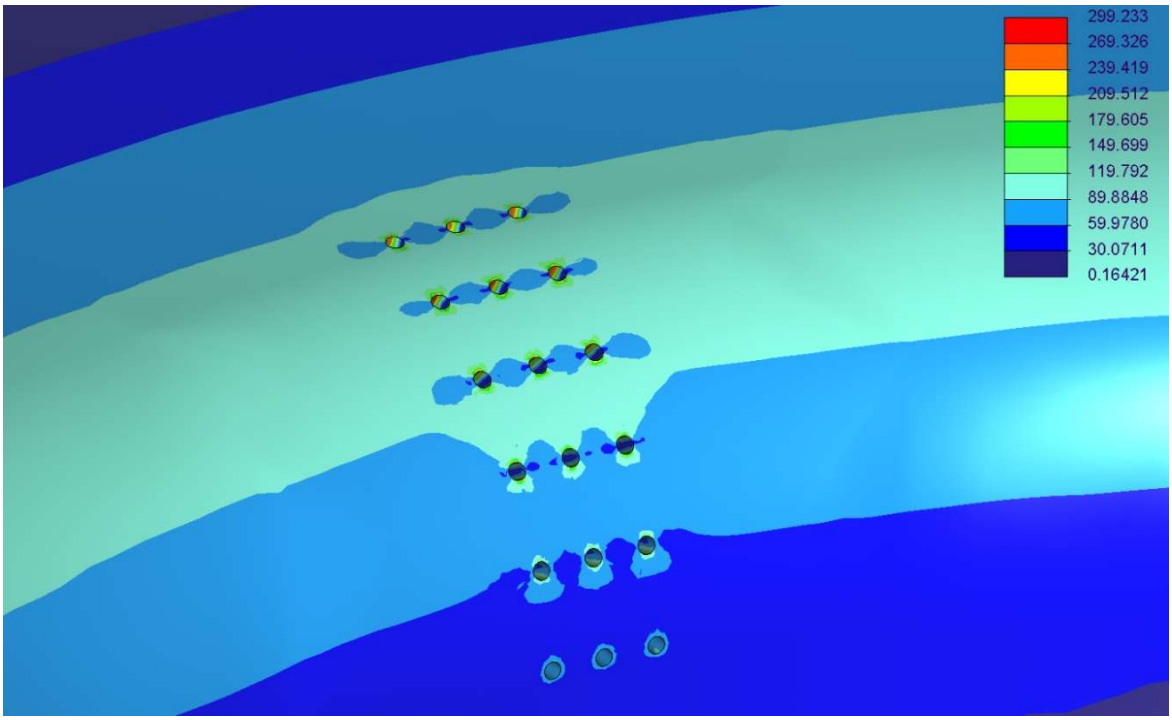


Figura 5. Stress range alla posizione dei fori [MPa]

il valore massimo risulta: **300MPa** – l'ampiezza è pertanto 300/2 = **150MPa**

ASME VIII DIV2 Part 3, ANNEX 3-F, Smooth Bar Method				
Design E-modulus	E_{FC}	MPa	195000	
Conversion Factor	C_{us}	-	6.895	3-F.3
Table			Table 3-F.1 - 1	
Curve applicable UTS			UTS=<552MPa	
Max. Curve Temperature		°C	371	
Curve OK based on temperature			OK	
Min. Curve Stress amplitude	Min. S_a	MPa	48	
Max. Curve Stress amplitude	Max. S_a	MPa	214	
ASME Stress Amplitude (Smooth bar)	S_a	MPa	150	
Curve OK based on Sa			OK	
	Y	-	22	3-F.3
	X	-	5	3-F.2
Allowed number of cycles	***N***	-	**61944**	3-F.1

Figura 6. Esito verifica a fatica oligociclica

La vita a fatica all'ampiezza degli stress di 150MPa è pari a **61944** cicli, che è molto più ampia della vita spesa fino ad oggi dall'apparecchiatura di 23100 cicli. Considerando che sono state effettuate assunzioni conservative, la vita reale nella zona delle forature è anche più ampia.
Il numero dei cicli ammissibili derivanti dall'analisi è 61944, quelli consumati 23100, dunque 38844 cicli residui, ovvero di **53,2 anni**, considerando 2 cicli/giorno per 365 giorni in un anno.

6. Risultati e validazione dell'intervento

L'intervento di riparazione ha ripristinato completamente la protezione contro gli attacchi chimici acidi nelle aree danneggiate. Le piastre di tantalio applicate

garantiscono una resistenza alla corrosione superiore a quella dello smalto originale e una durabilità nel tempo adeguata alle condizioni operative previste.
Le verifiche strutturali hanno confermato l'integrità meccanica dell'attrezzatura e hanno certificato una vita residua di 53,2 anni, ampiamente superiore alle necessità operative di Infineum. La verifica di stabilità ha confermato l'idoneità degli spessori residui del mantello, escludendo gli elementi di giunzione delle piastre di riparazione dal calcolo strutturale in quanto non sollecitati dalla pressione interna.
Il reattore è stato successivamente sottoposto a prova idraulica con esito positivo e, dopo il completamento dell'iter autorizzativo con INAIL, reinstallato nella nuova linea produttiva.

7. Conclusioni

L'intervento descritto ha dimostrato la fattibilità tecnica ed economica della riparazione di reattori smaltati mediante applicazione di piastre di tantalio, evitando la rismaltatura, o la sostituzione dell'attrezzatura con significativi risparmi economici e riduzione dei tempi di fermo impianto.
L'approccio integrato, che ha combinato riparazioni specialistiche con analisi strutturali avanzate e un efficace coordinamento con l'ente di verifica, ha permesso di certificare la conformità dell'attrezzatura riparata rispetto ai requisiti normativi vigenti e di garantire standard di sicurezza elevati per il successivo esercizio. L'esperienza maturata in questo intervento fornisce indicazioni utili per la gestione di situazioni analoghe su altre attrezzature a pressione con rivestimenti protettivi, evidenziando l'importanza di una corretta valutazione preliminare del danneggiamento, della scelta di tecniche di riparazione appropriate e di un dialogo costruttivo con gli enti di verifica.

Bibliografia

[1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division 2, Alternative Rules for Construction of Pressure Vessels, American Society of Mechanical Engineers, ultima edizione
[2] Raccolta ISPESL VSR "Specificazioni tecniche applicative del decreto ministeriale 21 novembre 1972 per la verifica della stabilità dei recipienti a pressione" Edizione 1995
[3] DECRETO 1dicembre 2004, n. 329 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.
[4] UNI EN ISO 28721-1:2019 - Vitreous and porcelain enamels — Glass-lined apparatus for process plants — Part 1: Quality requirements for apparatus, components, appliances and accessories
[5] Parere CTAIP: Applicazione di chiodi o toppe di tantalio su smaltature

Valutazioni meccaniche e metallurgiche post esercizio su materiali in acciaio inossidabile austenitico HP grade

A. Alvino[2], A. Antonini[2], G. De Domenico[3,] F. Giacobbe[1], C. Grazioli[1], S. Guarnaccia[3], E. Pichini[2]

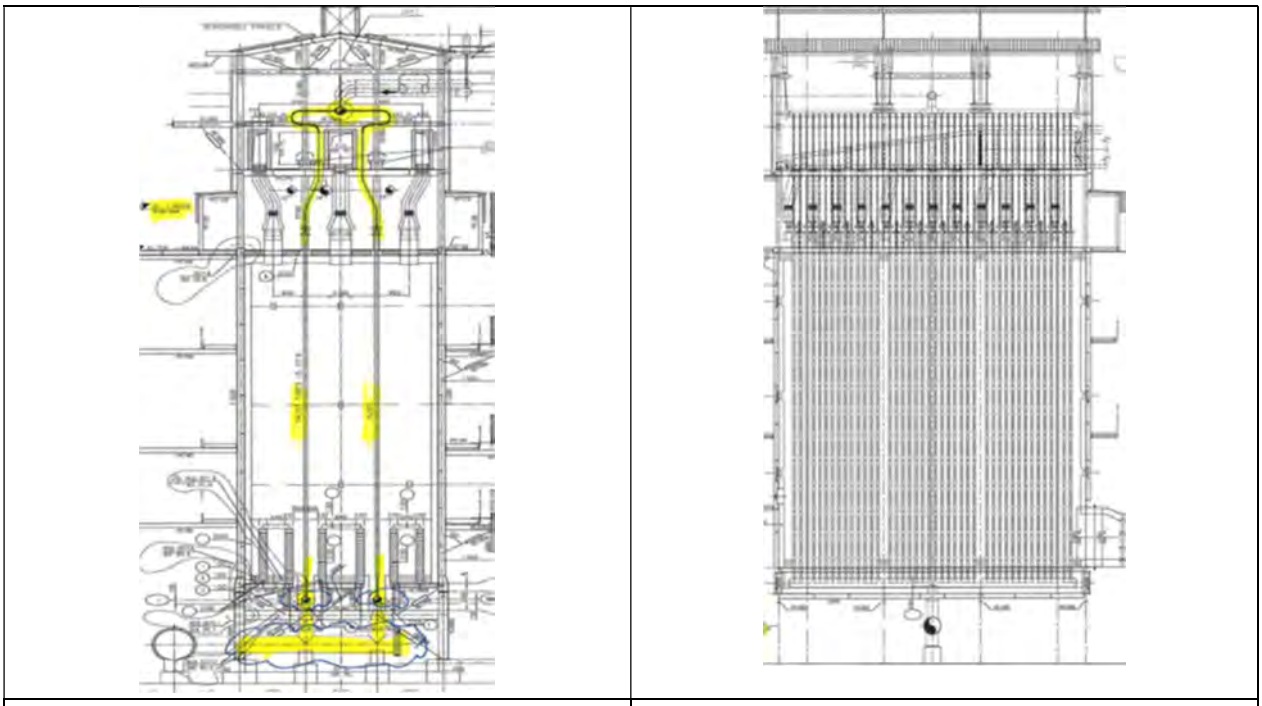
[1]Inail – Uot di Messina
[2]Inail – Dit
[3]Raffineria di Milazzo s.c.p.a. - Milazzo (ME)

Sommario
Gli acciai inossidabili austenitici HP grade sono impiegati in impianti di processo operanti ad alta temperatura, date le caratteristiche di stabilità strutturale, resistenza a ossidazione e corrosione, e buona tenacità dopo prolungato esercizio. Trovano utilizzo, per esempio, nei forni di cracking/reforming, sottoposti a temperature elevate e cicli termici ripetuti.
Diversi studi scientifici, nel corso degli ultimi anni, hanno evidenziato la necessità di approfondire l'evoluzione delle prestazioni di questi materiali, in correlazione alle sollecitazioni nelle fasi di esercizio ed alle modalità di conduzione.
Nella memoria vengono presentati i risultati di una campagna di valutazione, meccanica e metallurgica, post-esercizio su campioni prelevati da componenti dismessi, i collettori di un forno Steam Reformer, caratterizzati da cicli prolungati di funzionamento, pregresso esercizio di circa 85.000h, temperature prossime a 800 °C, fluido miscela di idrocarburi.
Durante l'esercizio, sono state condotte indagini non distruttive, controlli spessimetrici e superficiali ed esami metallografici, per monitorare l'eventuale insorgenza di difetti aventi influenza sul comportamento a creep. Sono quindi stati esaminati provini prelevati su diverse zone dei componenti, in funzione dei livelli di sollecitazione, e condotte prove di laboratorio, comprendenti analisi microstrutturali al microscopio ottico ed elettronico, misure di durezza, prove di trazione a temperatura ambiente.
Le risultanze hanno evidenziato una variazione delle caratteristiche, che restano tuttavia compatibili con le specifiche di sicurezza, consentendo di definire scenari affidabili per l'esercizio residuo e di proporre linee guida per la manutenzione programmata. Ulteriori approfondimenti potranno essere sviluppati con lo studio puntuale a livello microstrutturale dei fenomeni di precipitazione secondaria delle fasi intermetalliche.

1. Introduzione

La campagna di indagine si inquadra all'interno di uno stabilimento industriale, di tipo petrolchimico, dove la produzione di idrogeno è un processo essenziale. Il forno reforming (figura 1) è alimentato da una miscela di idrocarburi e vapore che viene

riscaldata ad elevata temperatura (800°C), per consentire le reazioni necessarie in presenza di un catalizzatore. Dalla reazione si ottiene in uscita un composto gassoso ricco in idrogeno; a valle di questo, successivi livelli di reazione, consentono una produzione ulteriore di idrogeno. Nel processo, la temperatura non risulta uniformemente distribuita, poiché la reazione endotermica avviene in quantità superiore nella parte alta del forno e via via in quantità minore verso la parte bassa; ciò determina temperature maggiori nella parte inferiore, in corrispondenza dei collettori di uscita [20].



a	b

Figura1. schema di impianto reforming catalitico; a) sezione longitudinale; b) sezione trasversale;

I parametri di funzionamento di questo impianto, entrato in esercizio nel 2014, sono elencati in tabella 1.

Temperatura di progetto 890°C	Temperatura di esercizio 800°C
Pressione di progetto 36 bar	Pressione di esercizio 30 bar
Fluido di processo metano/vapore	Ore di esercizio 85000

Tabella 1. Parametri di funzionamento dell'impianto in esame

Nel processo di *steam reforming* all'aumentare della temperatura aumenta la produzione di idrogeno, ma si riduce drasticamente il tempo di vita dei componenti: ecco perché viene prestata particolare attenzione alla scelta del materiale, puntando su un acciaio ad alte prestazioni, capace di offrire una migliore resistenza alla rottura per scorrimento viscoso ed alla corrosione rispetto agli acciai tradizionali [21].

2. Ambito dello studio

I componenti del forno soggetti a condizioni critiche quali tubi catalitici, collettori, ecc. sono realizzati in leghe Fe-Ni-Cr classificate come ASTM A 297 [1-4]. Sebbene per tali materiali venga stimato un ciclo di vita nominale di circa 100.000 h [5], l'esperienza operativa mostra che la durata media effettiva varia a seconda delle condizioni di esercizio, e diventa critica già intorno alle 40000 h [6-7-16].

Questo perché il meccanismo di formazione e propagazione del creep non è stato ancora del tutto definito per questo tipo di leghe metalliche e non è stata ancora sviluppata una metodica universale per la valutazione del danno. Da letteratura si evince che il meccanismo nasce nella parte interna del tubo, ma non proprio a ridosso della sua superficie, per poi propagarsi, in maniera omogenea, sia verso la parete esterna che verso la stessa parete interna [8-11].

L'esame microstrutturale condotto con la metodica della replica metallografica risente di una forte limitazione, poiché i segni di danneggiamento sulla superficie esterna (l'unica raggiungibile) compaiono soltanto quando il componente è giunto quasi a fine vita [22]. Per questa ragione, risulta utile effettuare altri tipi di indagini, che implicano però necessariamente un approccio distruttivo, poiché necessitano di provini massivi: tra essi sono annoverati l'esame metallografico e le prove di trazione, da cui è possibile avere un quadro affidabile dello stato del materiale ed evidenziare danni da creep, carburizzazione o invecchiamento [16-21].

In occasione di una recente fermata di manutenzione programmata, è stata effettuata la sostituzione delle membrature del forno: si è scelto quindi di destinare uno dei componenti sostituiti ad un esame approfondito in laboratorio, per eseguire analisi ed osservazioni microscopiche, al fine di valutare le condizioni del materiale.

2.1 Caratteristiche geometriche e metallurgiche

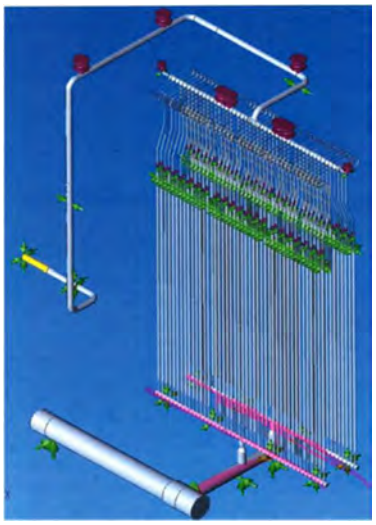


Figura 2. vista assonometrica dei componenti del forno. Il collettore è l'elemento cilindrico in basso

Il componente oggetto di questo studio è il collettore di uscita (figura 2), denominato "collettore est". Trattasi di un tubo orizzontale, prodotto mediante colata centrifuga, realizzato in 4 tratti longitudinali + 2 fondi bombati + 1 pezzo a T centrale; presenta 6 saldature circonferenziali e, sulla parte superiore, n.42 weldolet, necessari al raccordo dei tubi catalitici.

La designazione del materiale di composizione è 1.4859 (norme EN 10213 ed EN 10295), classificazione chimica GX10NiCrSiNb33-20 [23]. Questa lega è dotata di eccellenti proprietà meccaniche alle alte temperature, quali alta resistenza al calore, buona resistenza alla corrosione, stabilità microstrutturale e bassa fragilità [22]. È sostanzialmente classificata nel

novero delle ASTM A297 grado HP, a basso tenore di carbonio, stabilizzata con niobio per migliorare la resistenza a creep e la duttilità alla rottura. La sua composizione è illustrata in tabella 2 [23-24].

C	Sì	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Nb	Cu
0.05 - 0.15	0.5 - 1.5	Max 2	31 - 33	max 0,04	max 0,03	19 - 21	max 0,5	0.5 - 1.5	max 0,5

Tabella 2. Composizione chimica percentuale dell'acciaio GX10NiCrSiNb32-20 (1,4859).

Presenta inoltre un elevato tenore di nichel e cromo, il primo per garantire stabilità alla fase austenitica e resistenza al calore, il secondo per la resistenza alla corrosione ed all'ossidazione [12-15]. Il campo di applicazione è in modo specifico quello dei forni per industrie petrolchimiche: è compatibile con l'uso di gas di gruppo 1 e 2 ed è progettata per operare con temperature di esercizio fino a 1000°C [24]. Le principali proprietà meccaniche e tecnologiche sono raccolte in tabella 3.

Carico di snervamento Rp0,2 [Mpa]	Carico di rottura Rm [Mpa]	Allungamento alla frattura A [%] min	Peso specifico [kg/dm3]	Calore specifico [J/ (kg*K)]	Conduttività termica [W/(m*K)]
180	440	20	8,0	500	12,8 (20°C) 13 (100°C)

Tabella 3. proprietà meccaniche dell'acciaio GX10NiCrSiNb32-20 (1,4859).

3. Estrazione dei provini

Durante la fermata programmata sono stati eseguiti CND sul collettore, in particolare liquidi penetranti e repliche metallografiche al fine di effettuare una mappatura estesa del componente su tutta la lunghezza [26], come riportato nelle figure 3 e 4.

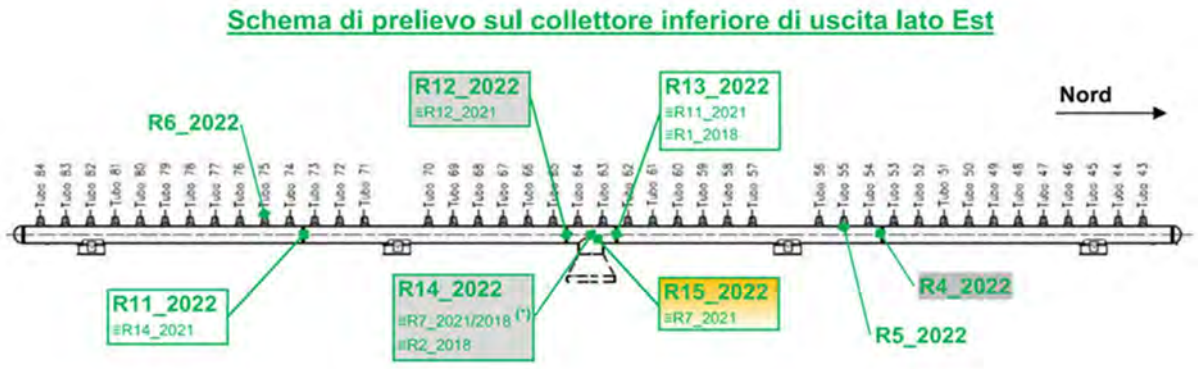


Figura 3. schema di prelievo delle repliche metallografiche.

Con riferimento alle indicazioni ottenute, sono state selezionate le sezioni più significative per gli aspetti che si volevano approfondire in laboratorio. I provini per

l'esame della microstruttura sono stati ricavati da quattro diverse zone di campionamento, su indicazione del gestore dell'impianto, nominate A, B, C e D rispettivamente. La zona B presenta solo materiale base, mentre le restanti tre sono interessate da saldature. Da ciascun sito di campionamento è stato estratto (figura 5) uno spezzone cilindrico della lunghezza di 160 mm circa e spessore pari allo spessore del tubo, ossia 30 mm; in officina, utilizzando macchine a controllo numerico, sono stati estratti i saggi e fabbricati i provini per i successivi esami.
Nello specifico, i provini per trazione sono stati estratti seguendo la direzione longitudinale del tubo: in totale 16 provini di forma cilindrica (4 da ogni spezzone), dimensionati secondo UNI-EN-ISO 6892-1 [25] (figure 6 e 7).
Per gli esami metallografici, invece, sono stati estratti dei saggi non lavorati a macchina, per un totale di 4 (1 da ogni spezzone), della larghezza di 16/20 mm circa e spessore sempre pari a 30 mm.
Da ogni saggio sono stati ricavati almeno due provini in sezione radiale, in modo da osservare il materiale nell'intero spessore del pezzo.

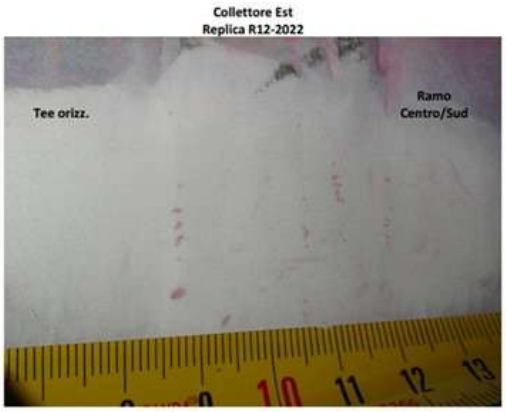
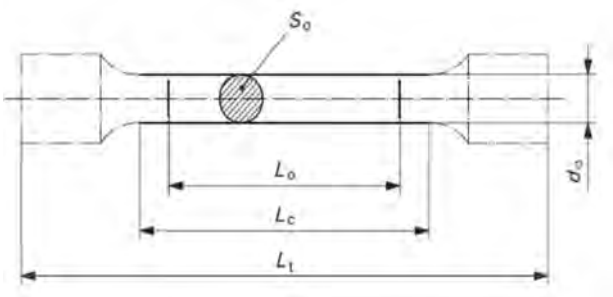


Figura 4. sito di ispezione esaminato con test dei liquidi penetranti


Figura 5. spezzone cilindrico per estrazione dei provini.



d_0 = 4 mm; **L_0** = 40 mm; **L_c** = 45 mm **L_t** ≥ 105 mm;
Figura 6. dimensioni standard dei provini per trazione.


Figura 7. alcuni dei provini preparati

È stato inoltre esaminato un provino di materiale non esercito, campionato da una colata differente e già in dotazione al Laboratorio III, avente la medesima

classificazione di quello prelevato dal collettore, così da avere anche la caratterizzazione al tempo zero.
La caratterizzazione della microstruttura ha riguardato sia il materiale base che le saldature. Si è dato priorità all'esame del materiale prelevato in corrispondenza del lato interno del collettore, dato che per questo tipo di leghe il danno si origina e accresce nelle zone a ridosso della superficie interna, sebbene non esattamente su di essa, e si propaga poi in maniera omogenea, sia verso la parete esterna che verso la stessa parete interna [8, 10]. Sono quindi stati esaminati anche i provini di materiale prelevato dal lato esterno del collettore.

4. Prove ed esami di laboratorio

Le indagini di laboratorio hanno riguardato principalmente le proprietà a trazione e la microstruttura. Le prove di trazione sono state condotte con una macchina Zwick-Roell Z050; le osservazioni metallografiche sono state effettuate con un microscopio ottico Nikon Eclipse ME600 e con un microscopio FEG-SEM Zeiss Ultra-Plus. Sono state infine eseguite analisi EDS con sonda EDS X-MAX 506480 Oxford Instruments.

4.1 Prove di trazione

Le prove di trazione hanno fornito risultati che evidenziano un peggioramento delle proprietà meccaniche del materiale, rispetto al tempo zero, in ogni sito di prelievo. Come evidenziato dalla tabella 4, sia il carico di rottura che l'allungamento alla frattura presentano valori assai inferiori a quelli tabellari del materiale *as cast*: il primo mostra un abbassamento compreso tra il 30 e il 35%, mentre per il secondo si registra una riduzione ancora più marcata, con valori che non raggiungono neppure la metà di quelli tabellari. Anche l'aspetto stesso della frattura mostra un comportamento per lo più fragile, privo di strizione e senza significativa deformazione (figura 8).

	A	B	C	D	As cast
Carico di rottura (Mpa)	297	294	279	285	440
Allungamento a frattura	7%	7%	6%	5%	20%

Tabella 4. valori del carico di rottura e dell'allungamento a frattura misurati, a confronto con i valori tabellari forniti dal costruttore.



Figura 8. provini di trazione dopo la rottura. Si notino la mancanza di strizione e l'aspetto fragile delle fratture.

4.2 Analisi della microstruttura

La microstruttura del materiale non esercito (figura 9) è descrivibile come una matrice austenitica in cui sono presenti precipitati interdendritici a struttura fine, formanti una sorta di reticolo a maglie comunque aperte. Non si registra la presenza di altre seconde fasi. L'esame al SEM-EDS rivela che le seconde fasi sono costituite esclusivamente da carburo di Nb.

L'esame al microscopio ottico dei provini di materiale esercito rivela (figura 10) un aspetto abbastanza simile per tutti e quattro i siti di campionamento. Dove è presente una saldatura si nota un netto cambiamento di aspetto tra zona fusa e materiale base, con una zona termicamente alterata assente o limitata a una fascia di pochi µm.

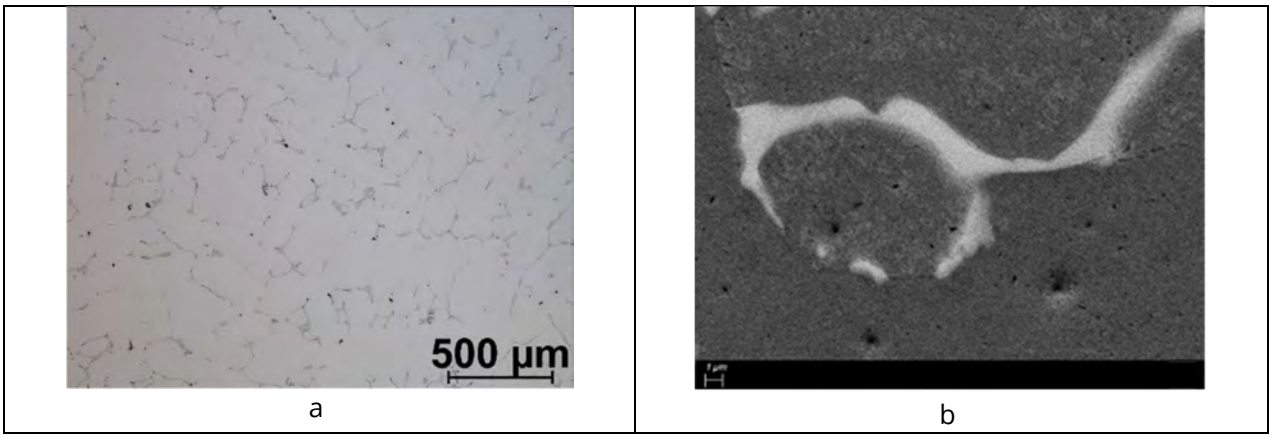


Figura 9. microstruttura del materiale non esercito, osservata a differenti ingrandimenti; a) micrografia LOM; b) micrografia SEM

Tutti i provini esaminati presentano un gran numero di cavità, posizionate sia lungo le direttrici dei precipitati interdendritici, sia all'interno della matrice austenitica.

È importante notare, tuttavia, che il danno non sembra interessare le saldature: in zona fusa, infatti, sono osservabili pochissime cavità, localizzate per lo più nella porzione di saldatura vicino al materiale base. Le cavità sono invece presenti in

numero molto elevato nel materiale base, dove, in alcuni casi, appaiono allineate e ravvicinate a formare una sorta di cricca.

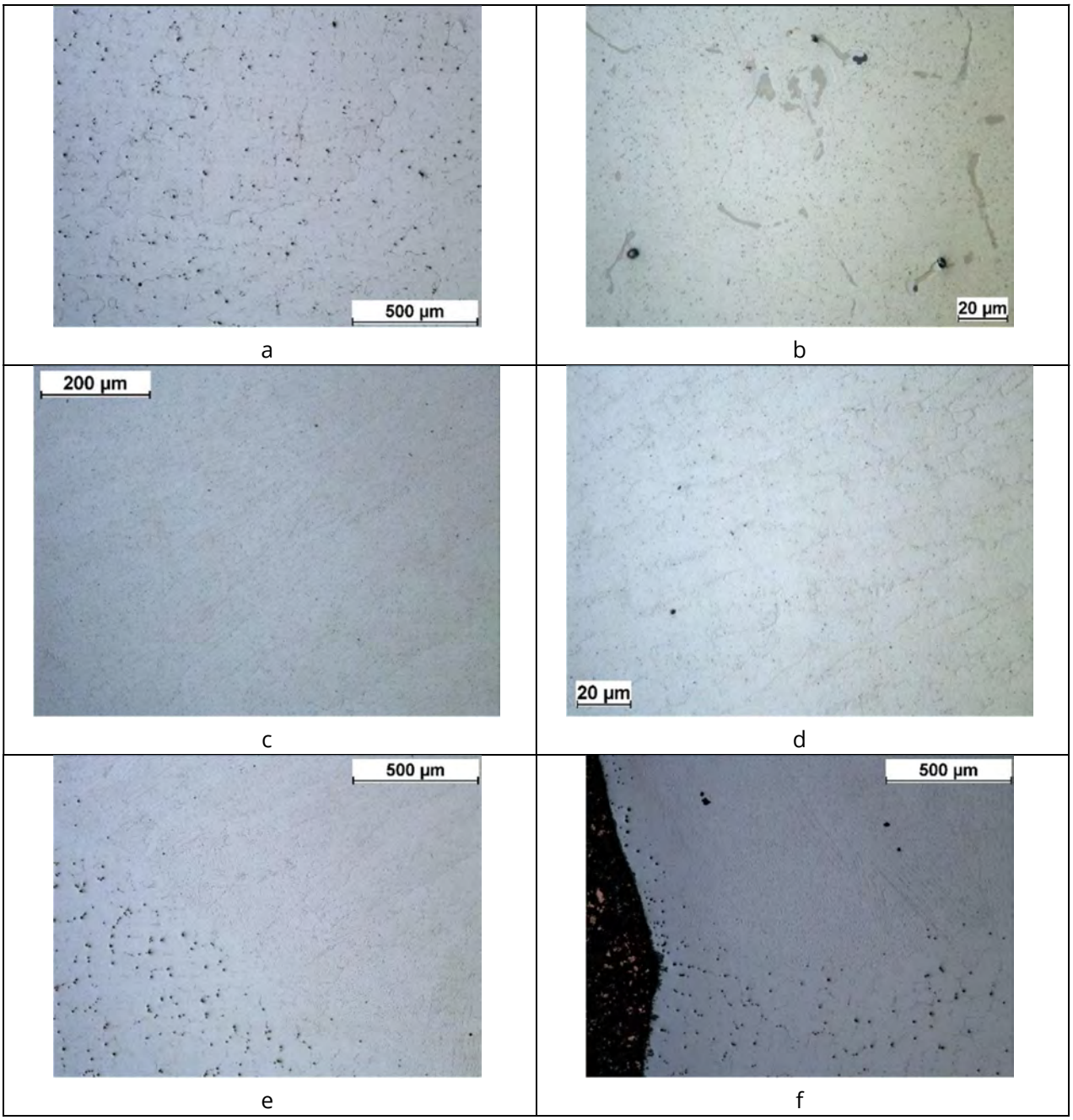


Figura 10. micrografie LOM del materiale esercito: a) b) materiale base; c) d) zona fusa; e) f) panoramiche dell'interfaccia zona fusa/materiale base.

Per quanto riguarda la microstruttura, sia il materiale base che la saldatura mostrano precipitati interdendritici ingrossati rispetto a un materiale non esercito, con tratti in cui si presentano saldati tra loro in un pattern più o meno continuo (meno accentuato in zona fusa). Si nota anche una massiccia precipitazione di seconde fasi all'interno della matrice austenitica.

L’esame al SEM (figura 11) fornisce ulteriori elementi per caratterizzare il danno. Oltre alle numerose cavità osservate in corrispondenza dei precipitati interdendritici, sono infatti evidenti, su alcune particelle, fessurazioni e microcricche, mentre altre cavità si riscontrano nei precipitati all’interno della matrice, solitamente di dimensioni inferiori.

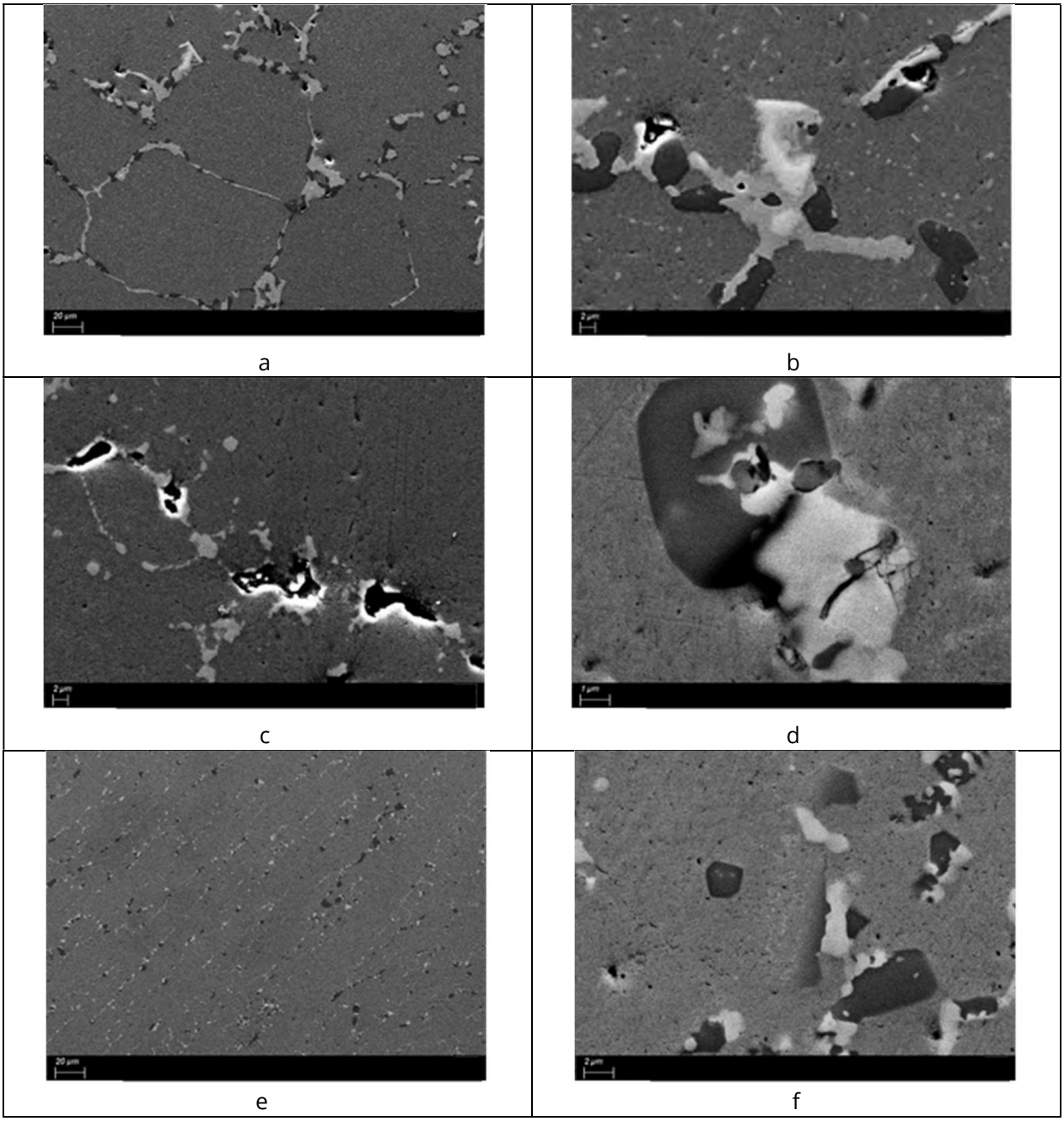


Figura 11. micrografie SEM del materiale esercito: a) b) materiale base; c) d) particolari del danno a livello dei precipitati; e) f) zona fusa

L’analisi EDS (figura 12) rivela che il materiale ha subito una notevole evoluzione microstrutturale durante la vita in servizio: i carburi interdendritici di Nb, originariamente presenti nel materiale a tempo zero, si sono ingrossati e trasformati

in G-phase, un intermetallico contenente Ni, Nb e Si, seguendo un meccanismo di reazione ben noto in letteratura e già individuato anche in precedenti esami su materiali della stessa classe [16-19]. La trasformazione è quasi del tutto completa, anche se i precipitati più grandi presentano talvolta un nucleo di carburo di Nb non ancora del tutto convertito; sui precipitati interdendritici pre-esistenti si sono formate nuove particelle, identificate come carburi contenenti prevalentemente Cr e in misura minore Mn.

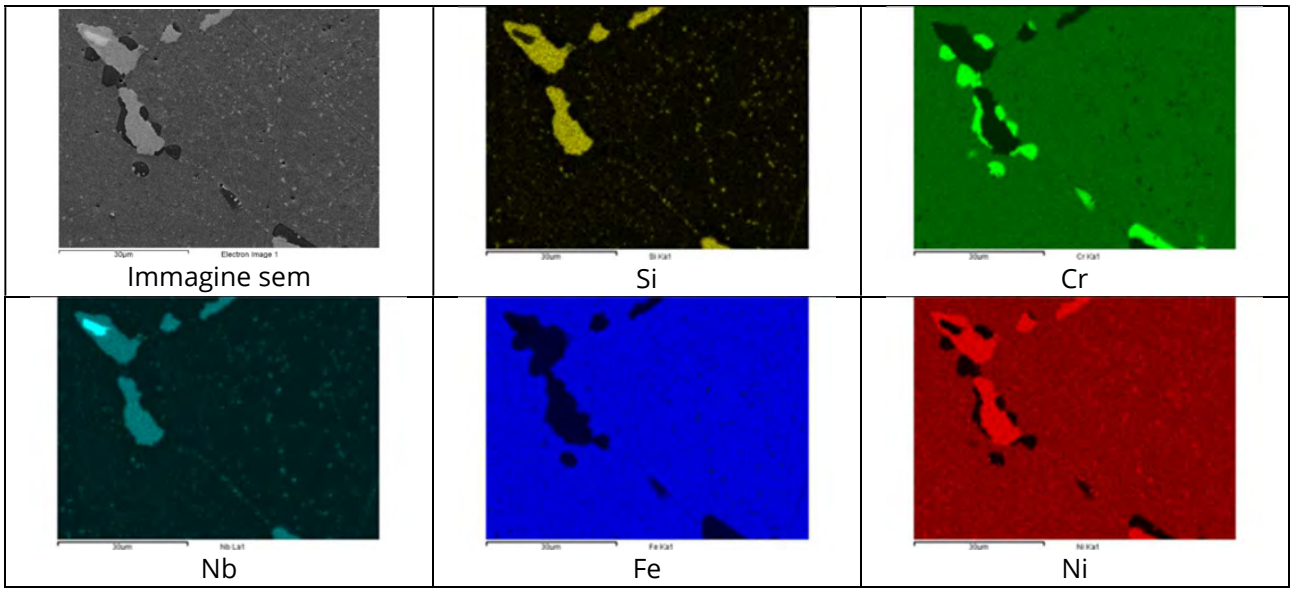


Figura 12. Distribuzione degli elementi ottenuta tramite spettroscopia EDS. Si noti la migrazione di Si e Ni all'interno delle particelle contenenti Nb e la formazione di precipitati ricchi di Cr, entrambi indici di avanzata evoluzione microstrutturale.

5. Conclusioni

Le procedure indicate nella circ. ISPESL n. 48/2003 e nella norma UNI TS 11325-2 richiedono la valutazione dello stato del materiale soggetto a scorrimento viscoso a partire da un esercizio pari a 100.000 ore. Nel caso in esame il componente è stato già sostituito a 85.000 ore, senza aver raggiunto quindi l'adempimento previsto [27].
Sono comunque stati eseguiti sullo stesso i CND, in quanto utili come strumento di monitoraggio dello stato di degrado, e facilmente eseguibili sui componenti in esercizio.
Una diversa caratterizzazione è possibile attraverso indagini di tipo distruttivo, così come è stato fatto in questo studio, che forniscono indicazioni non rilevabili con i controlli previsti dalla stessa norma UNI TS 11325-2 [26].
A seguito dell'esame metallografico è stata riscontrata una microstruttura piuttosto differente da quella di un identico materiale a tempo zero: questo aspetto, legato alle condizioni di esercizio, ha influito sulle prestazioni del materiale stesso, riducendole per via della precipitazione di seconde fasi. È stato inoltre osservato un danno da scorrimento viscoso caratterizzato da cavità in corrispondenza dei precipitati, sovente ravvicinate, raccolte in cluster o lungo le direttrici dei precipitati

interdendritici originari. Il danno sembra essere uniformemente distribuito nello spessore, pur essendo state riscontrate differenze apprezzabili tra materiale base, dov'è presente in forma più marcata, e saldatura, in cui le cavità sono piuttosto rare. La presenza delle cavità in tutto lo spessore, comunque, induce a pensare che il materiale abbia subito un degrado che si è diffuso fino alla superficie esterna.
Questa situazione sembra essere stata colta anche dalle prove di trazione effettuate, che mostrano, rispetto ai valori forniti dal fabbricante per il materiale as cast, una resistenza meccanica diminuita di circa il 30-35%, un allungamento estremamente contenuto ed infine un aspetto fragile delle fratture che lascia ipotizzare una perdita di duttilità a carico del materiale durante la vita in servizio. Tali cali delle prestazioni meccaniche sono comunque contenute nei margini di sicurezza imposti dal codice di progettazione e non hanno pregiudicato le condizioni di stabilità.
Alla luce di quanto descritto, le indicazioni fornite dalle indagini distruttive, effettuate sul componente dismesso, costituiscono una fonte di ulteriori conoscenze e di dati che il gestore potrà utilizzare per approfondire le dinamiche di degrado cui sono soggetti questi materiali. Lo studio costituisce un input per esaminare in particolar modo componenti omologhi presenti nell'impianto, al fine di migliorare la gestione e l'esercizio.

Bibliografia

[1] ASM Handbook N° 9 "Metallography and Microstructures" 2004 ASM International

[2] Schillmoller, C.M. "Solving high temperature problems in oil refineries and petrochemical plants" *Chemical Engineering*, 1986 vol. 93. p 83-87.

[3] Schillmoller, C.M; Van Der Bruck, U.W. "Furnace alloys update" *Hydrocarbon Proc*. 1984 vol. 63 p. 55-59.

[4] Parks, S.B.; Schillmoller, C.M "Use alloys to improve ethylene production" *Hydrocarbon Proc*. 1996 vol. 75 p. 53-60.

[5] "Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries", API Recommended Practice 530, 3rd Edition, American Petroleum Institute, Washington, DC, 1988.

[6] Le May, I.; Da Silveira, T.L.; Vianna, C.H. "Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes". *Int. J. Pres. Ves. & Piping.* 1996 vol. 66 p. 233-241.

[7] Fiodo, A.; Alvino, A.; Di Ponzio, E.; Lega, D.; Antonini, A. "Le principali forme di danno nei forni di steam reforming: caratterizzazione e metodologie diagnostiche" SAFAP 2023 Sicurezza e Affidabilità delle Attrezzature a Pressione e degli Impianti di Processo, Brescia 22-24 novembre 2023.

[8] Le May, I.; Da Silveira, T.L.; Vianna, C.H. "Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes". *Int. J. Pres. Ves. & Piping.* 1996 vol. 66 p. 233-241.

[9] Gommans, R.J. “Life Assessment and Inspection Techniques in Reformer Furnaces”. 6th Schmidt + Clemens Group Symposium Bali 2002.
[10] Mateša, B.; Bodenberger, R.; Sachs, B.P.; Pecić, V. “Non-destructive testing in predicting of processing furnace remaining life” *NDT for Safety* 2007, 7-9 November, Prague (CZ)
[11] Jaske, C.E.; Simonen, F.A.; Roach, D.B. “Predict reformer furnace tube life” *Hydrocarbon Proc*. 1983, January, p. 63-66.
[12] De Almeida, L.H.; Ribeiro, A.F.; Le May, I. “Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes” *Mater. Charact.* 2003 vol. 49 p. 219-229.
[13] Barbabela, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. “Role of Nb in modifying the microstructure of heat-resistant cast HP steel” *Mater. char.* 1991; vol. 26 p. 193-197.
[14] De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Da Silveira, T.L.; Le May, I. “Niobium addition in HP heat resistant cast stainless steels” *Mater. Charact.* 1992 vol. 29 p. 387-396.
[15] Ibañez, R.A.P.; De Almeida Soares, G.D.; De Almeida, L.H.; Le May, I. “Effects of Si content on the microstructure of modified-HP austenitic steels” *Mater. Charact.* 1993 vol. 30 p. 243-249.
[16] Voicu, R.; Andrieu, E.; Poquillon, D.; Furtado, J. ; Lacaze, J. “Microstructure evolution of HP40-Nb alloys during aging under air at 1000 °C” *Mater. Charact.* 2009 vol. 60 p. 1020-1027.
[17] Ribeiro, A.F.; Tavares Borges, R.M.; De Almeida, L.H. “Phase transformation in heat resistant steels observed by Stem. (NbTi)C – NiNbSi (G-Phase)” *Acta Microscopica* 2002 vol. 11 p. 59-63.
[18] Alvino, A.; Lega, D.; Giacobbe, F.; Mazzocchi, V.; Rinaldi, A. “Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions” *Eng. Fail. Anal.* 2010, vol. 17, p. 1526-1541.
[19] Alvino, A.; Ramires, D.; Tonti, A.; Lega, D. “Influence of chemical composition on microstructure and phase evolution of two HP heat resistant stainless steels after long term plant-service aging” *Mater. High Temp.* 2014 *31* 2-11.
[20] A. Alvino, V. Mazzocchi, C. Delle Site, F. Giacobbe, Influenza delle condizioni di esercizio sul degrado di tubi in acciaio per impieghi ad alte temperature nell’industria petrolchimica, Conference: Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione, 2009
[21] Kazempour-Liasi H., Z. Lalegani, M. Rayatpour. Life Assessment of HP-40Nb Reformer Furnace Tube of a Petrochemical Plant. Strength of Materials, 2021, vol.53 pp. 364-375
[22] M. Giuffrida, C. Grazioli, M. Platania, Forni regorming catalitico: fenomeni di degrado su tubazioni in acciaio HP grade, SAFAP 2023 Sicurezza e Affidabilità

delle Attrezzature a Pressione e degli Impianti di Processo, Brescia 22-24 novembre 2023
[23] Norma UNI EN 10213:2016, Getti di acciaio per impieghi a pressione
[24] Norma UNI EN 10295:2003, Getti di acciaio resistenti al calore
[25] Norma UNI-EN-ISO 6892-1: 2020, Materiali metallici – Prova di trazione
[26] Norma UNI/TS 11325-2:2013, Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 2: Procedura di valutazione dell'idoneità all'ulteriore esercizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione soggetti a scorrimento viscoso
[27] Circolare ISPESL n.48/2003 “Procedura tecnica su verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale”

Prove di indentazione strumentata a supporto delle valutazioni di vita residua e integrità di attrezzature a pressione

L. Casiraghi[1], A. Staffolani[1], G. Merckling[1]

[1]RTM Breda s.r.l.

Sommario
Nelle valutazioni di integrità, di vita residua o analisi Fitness for Service, uno dei problemi principali è la scelta delle proprietà dei materiali da utilizzare nell'esecuzione dei calcoli.
In questo lavoro viene illustrato come, attraverso prove di indentazione strumentata (IIT), è possibile ricavare le proprietà meccaniche di componenti in esercizio, senza prelievo di materiale. La prova di indentazione strumentata, classificabile come esame non distruttivo, è eseguita tramite un apposito strumento e consiste nell'applicare una forza gradualmente crescente ad un indentatore con punta di raggio 1mm, registrando la curva della forza applicata in funzione della profondità di indentazione. L'elaborazione della curva forza-profondità permette di ricavare la curva σ-ε del materiale, i valori del carico di rottura, di snervamento, e la tenacità a frattura.
Sono presentati in questo lavoro alcuni esempi di esecuzione della prova su attrezzature a pressione in esercizio, ai fini di determinare le proprietà del materiale e di valutarne la vita residua e l'esercibilità futura.

1. Introduzione

In questo lavoro viene presentata l'esecuzione della prova di indentazione strumentata (*Instrumented Indentation Test*, IIT). La prova è assimilabile a un test di durezza Brinell, eseguita con uno strumento in grado di registrare la curva di applicazione del carico e della profondità di indentazione. La prova ha lo scopo di determinare le proprietà meccaniche locali dell'area soggetta a indagine e offre possibilità interessanti nella valutazione di componenti in esercizio.
Nei capitoli seguenti viene data descrizione dell'esecuzione della prova, dell'elaborazione dei risultati e loro finalità, e viene presentata una possibile applicazione della prova alla valutazione di componenti reali in esercizio.

2. Descrizione ed esecuzione della prova

La prova IIT è una prova classificabile come non distruttiva, derivata dalla prova di durezza Brinell convenzionale (UNI EN ISO 6506), in cui, in luogo della misura dell'impronta sferica lasciata dal penetratore, viene misurata la profondità dell'indentazione (UNI EN ISO 14577). Il carico viene applicato progressivamente fino al raggiungimento della profondità di indentazione di 150 μm. Ad ogni incremento predefinito di profondità h, segue uno scarico fino al 60% del valore di forza F, per

poi procedere con l'incremento di carico successivo. Una descrizione più dettagliata del metodo è disponibile nel rapporto ISO/TR 29381.
Il fine della prova è ottenere, dalla curva forza-profondità, coppie di valori (h, F) da cui derivare una predizione delle proprietà meccaniche del materiale analizzato, evitando la distruzione del pezzo o un prelievo di campione a piena scala.

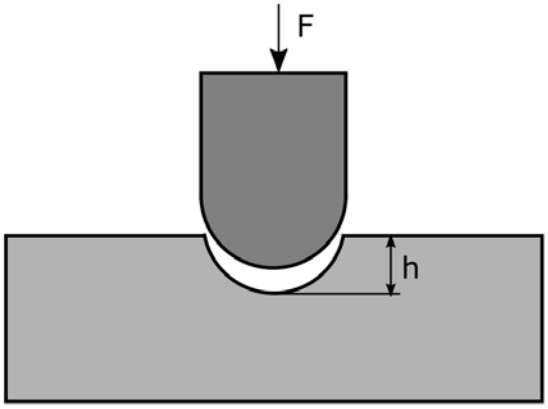


Figura 1. Rappresentazione schematica della prova e delle variabili caratteristiche

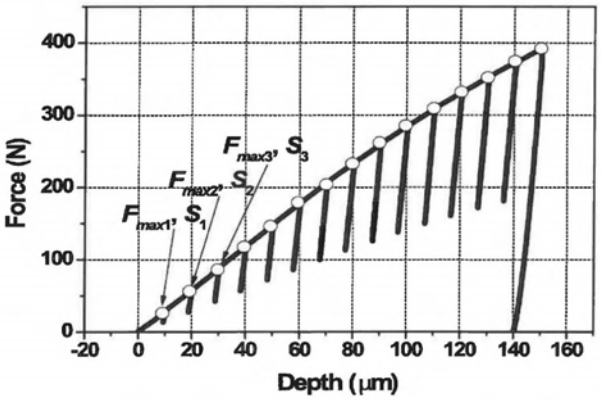


Figura 2. Esempio di curva forza-profondità [1]

È stato recentemente acquisito uno strumento per prove di IIT (Figura 3) che si compone della macchina di prova vera e propria (a sinistra nella figura) composta da



Figura 3. Strumento per prove di indentazione strumentata con unità di controllo, nella configurazione su telaio per prove in laboratorio

unità motore e testa con penetratore sferico, ed un'unità di controllo dotata di pc, contenente i software che controllano la macchina ed elaborano i risultati della prova. Analogamente alle prove di durezza, prima dell'esecuzione della prova di indentazione è necessaria una preparazione della superficie. Considerati gli scopi della prova e la sensibilità a piccole variazioni locali della resistenza del materiale, è

opportuno eseguire una preparazione della superficie con finitura pari almeno ad una carta con grana 500. È inoltre consigliabile eseguire più indentazioni, in modo da ottenere multiple curve $F-h$ per ciascun campione o posizione da analizzare. Migliore è la preparazione della superficie, minore sarà la dispersione dei risultati della prova (differenza tra le curve acquisite) e minore la differenza tra i valori predetti delle proprietà meccaniche.



Figura 4. Sistemi per l'esecuzione di prove in campo: sistema a cinghie per tubi o virole di diametro medio e sistema magnetico per superfici piane o tubi di grande diametro

Lo strumento non è pensato solo per l'esecuzione di prove in laboratorio, ma soprattutto su componenti di impianti. Il metodo si presta quindi alla valutazione di proprietà meccaniche di componenti in esercizio. Sono disponibili attrezzature apposite per il fissaggio dell'unità a componenti di impianto (Figura 4): un sistema a cinghie, adatto a tubi o virole di diametro medio-grande, e un sistema a magneti più versatile, adatto sia a tubi, grandi o piccoli, sia a superfici piane.

Nella seguente Figura 5 è rappresentata una schermata del software della macchina in cui sono rappresentate 7 curve misurate nella stessa posizione: pur apprezzandosi una leggera differenza tra una curva e l'altra, le curve sono sostanzialmente sovrapposte, ad indicare una buona preparazione della superficie, che ha minimizzato gli effetti locali.

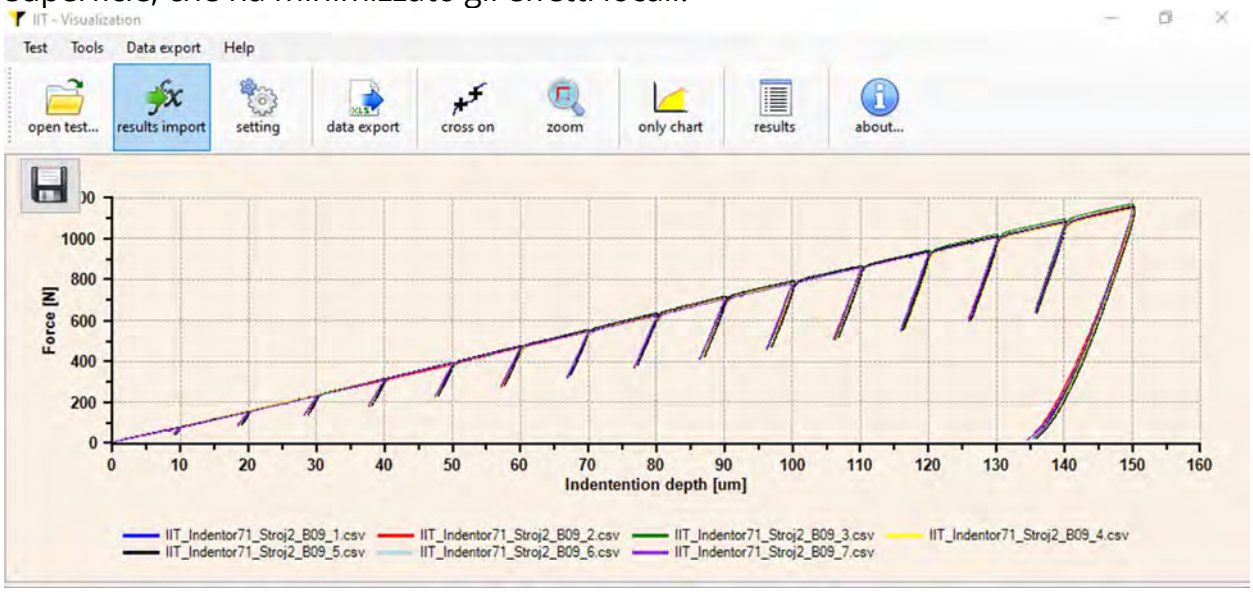


Figura 5. Schermata del software di controllo con la raccolta delle curve F-h su una posizione

3. Predizione delle proprietà del materiale

a. Proprietà tensili

Per la predizione delle proprietà tensili sono proposti nella letteratura 3 metodi [1]:

1. Analisi di coppie di valori di sforzo - deformazione ricavabili dalla curva F-h;
2. Analisi inversa, supportata da una base di simulazioni ad elementi finiti;
3. Utilizzo di reti neurali.

In questo lavoro tratteremo esclusivamente il primo metodo, seppur sia importante menzionare che nel software di controllo dello strumento è implementato un modulo di elaborazione basato sul secondo metodo.

A partire dalla famiglia di curve sperimentali F-h, si identificano le coppie di valori di forza e profondità all'inversione di carico (h_{max}, F_{max}) da cui ricavare, secondo lo schema in Figura 9, i parametri geometrici dell'impronta sferica (profondità h, profondità dell'area di contatto h_c, angolo θ, etc.).

$$h_c = h_{max} - \varepsilon(m) \cdot (h_{max} - h_r) \quad (1)$$

- $\varepsilon(m)$ è un parametro geometrico che varia a seconda della forma della punta
- h_r è la profondità di indentazione plastica (Figura 7)

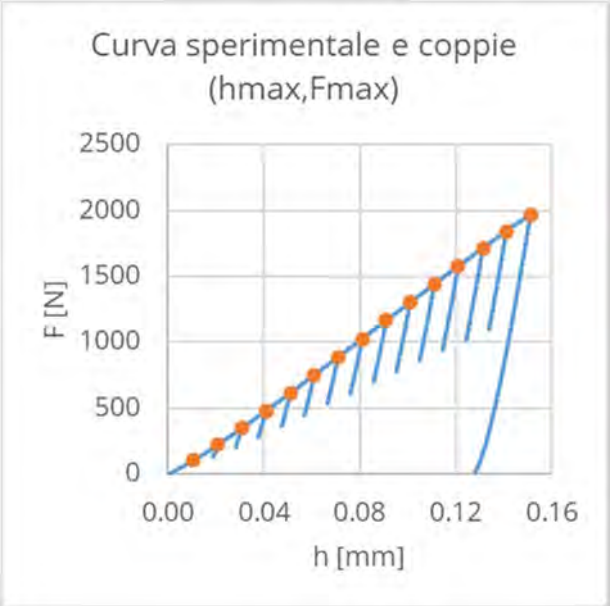


Figura 6. Estrazione dalla curva F-h delle coppie di valori h_{max} e F_{max} allo scarico

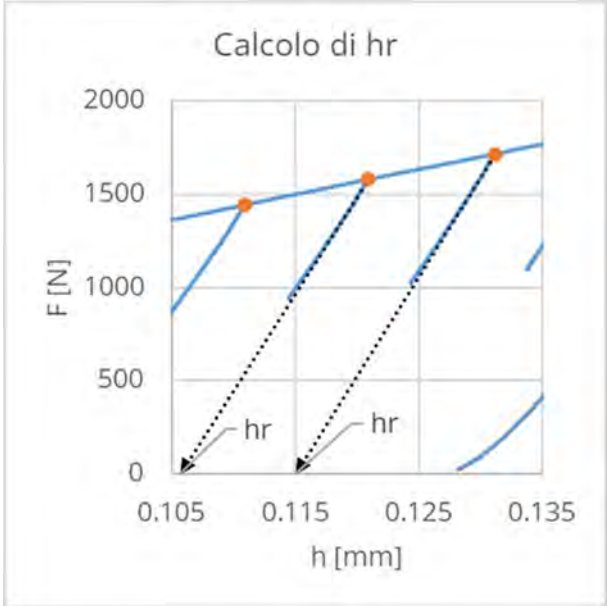


Figura 7. Calcolo della profondità h_r dai punti (h_{max}, F_{max})

Dai valori di forza e profondità di indentazione alle inversioni del carico è possibile determinare dei valori equivalenti di sforzo σ_{IT} e deformazione ε_{IT} di indentazione, secondo le equazioni (2) e (3). In queste ultime compaiono i parametri ξ e ψ, per cui sono rispettivamente raccomandati i valori 0.14 e 3, nel caso di materiali in cui il

tratto plastico della curva segue una legge di potenza. È stato tuttavia osservato che questi sono valori di primo tentativo, da ottimizzare caso per caso.

$$\sigma_{IT} = \frac{1}{\psi}\frac{F}{A_c} \quad (2)$$

- F è il carico
- A_c è la sezione trasversale dell'area di contatto
- ψ è il fattore di vincolo plastico

$$\varepsilon_{IT} = \xi \tan\theta \quad (3)$$

- ξ è una costante
- θ è la semiampiezza dell'area di contatto

Ottenute le coppie di valori σ_{IT} e ε_{IT} dall'elaborazione della curva F-h, si procede all'adattamento dei punti secondo un modello del tipo Ramberg-Osgood o Ludvik – equazione (4), in modo da ricavare la curva σ-ε del materiale (Figura 8). La curva così ottenuta è in termini di sforzi e deformazioni veri, da convertite nelle corrispondenti quantità ingegneristiche, mediante le note relazioni, per il confronto con le proprietà di letteratura del materiale analizzato.

$$\sigma_{IT} = R_{es} + K_{IT}\varepsilon_{IT}{}^{n_{IT}} \quad (4)$$

- R_{es} è il limite elastico
- ε_{IT} è la deformazione vera
- K_{IT} e n_{IT} sono i parametri della parte plastica della curva (modello di Ludvik)

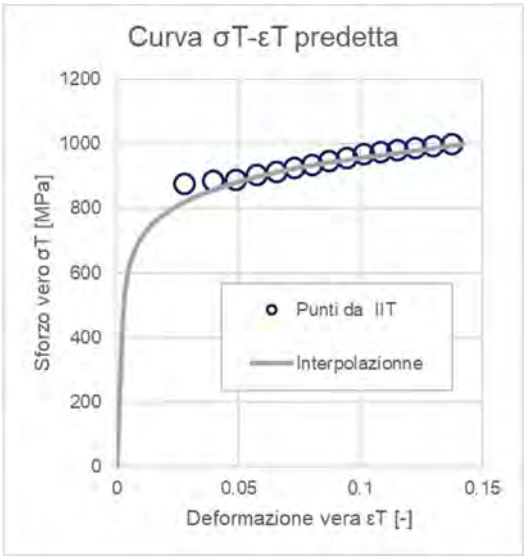


Figura 8. Interpolazione delle coppie σ_{IT} e ε_{IT} derivate da una curva di indentazione su SA335-P91, interpolazione con legge di potenza e definizione della curva della sollecitazione vera in funzione della deformazione totale vera

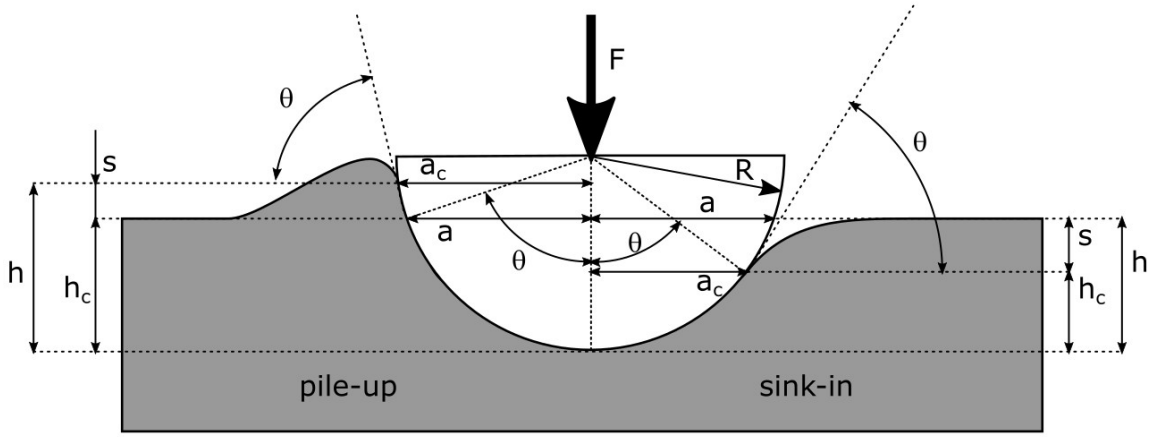


Figura 9. Rappresentazione dei parametri significativi delle equazioni per la predizione delle proprietà tensili

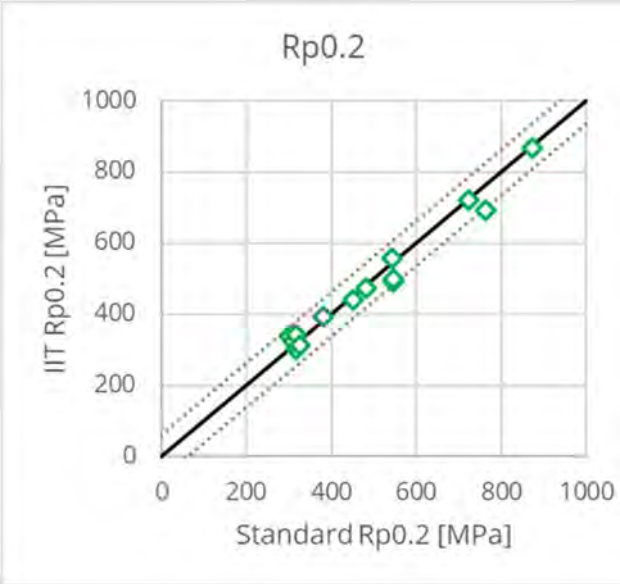


Figura 10. Comparazione tra i valori di Rp0.2 da prove standard e predetti da IIT, e bande per intervallo di confidenza del 95%. Dati interni.

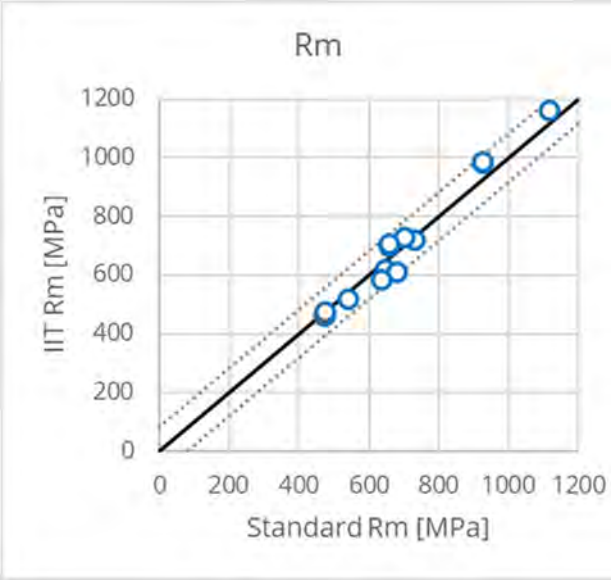


Figura 11. Comparazione tra i valori di Rm da prove standard e predetti da IIT, e bande per intervallo di confidenza del 95%. Dati interni.

Nei grafici in Figura 10 e Figura 11 viene rappresentato, rispettivamente, il confronto tra i valori di Rp0.2 e Rm da prove standard e i valori predetti da IIT. La predizione mostra in generale una buona accuratezza sia per materiali meno resistenti sia per materiali dalle proprietà più elevate. Inoltre, i diagrammi contengono dati di materiali di diverse classi: acciai al carbonio, bassolegati, austenitici e ghise; ciò permette di concludere che il metodo sembra generalmente applicabile con buona confidenza.

b. Tenacità a frattura

L'elaborazione della curva $F - h$ permette di ottenere una predizione della tenacità a frattura a partire dalla relazione tra la pendenza della curva allo scarico E_D –

equazione (5) – e la profondità di indentazione h, che è lineare nel piano doppio logaritmico (Figura 12).

$$E_D = \frac{1-\nu^2}{\left(\frac{1}{E_r} - \frac{1-\nu_i^2}{E_i}\right)} = \frac{1-\nu^2}{\left(\frac{2\sqrt{A_C}}{\sqrt{\pi}S} - \frac{1-\nu_i^2}{E_i}\right)} \quad (5)$$

- ν è il coefficiente di Poisson del materiale
- ν_i è il coefficiente di Poisson del penetratore
- E_r è il modulo elastico ridotto
- E_i è il modulo elastico del penetratore
- A_c è l'area di contatto tra indentatore e materiale
- S è la pendenza della curva $F - h$ allo scarico

La relazione con la tenacità a frattura è data dall'equazione (6), che propone una definizione della tenacità per materiali duttili K_{Jc} in funzione del modulo elastico e di un'energia di indentazione critica $2w_f$ – equazione (7). Quest'ultima è descritta come l'integrale definito, da profondità nulla fino a profondità critica h^*, di una funzione del carico applicato P e della profondità h. L'assunzione di fondo è che alla profondità h^* lo stato di sollecitazione e deformazione locale sia equivalente a ciò che si avrebbe all'apice di cricca al raggiungimento della condizione di frattura.

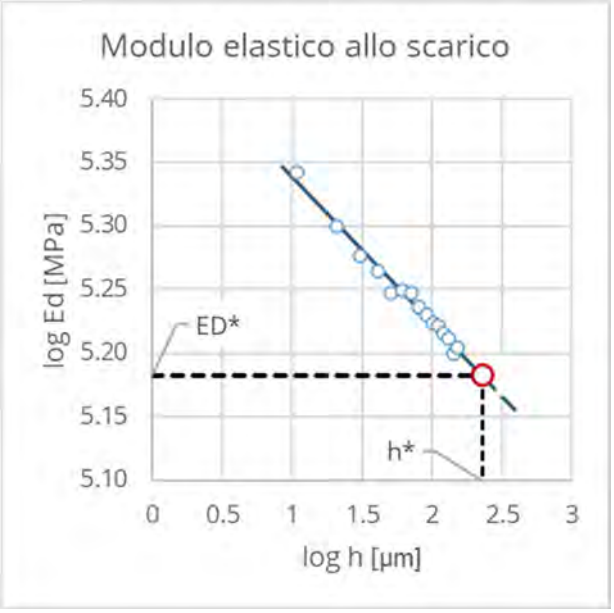


Figura 12. Relazione tra h e E_D

Il valore di profondità critica h^* non è una quantità misurabile sperimentalmente, ma va determinato per via indiretta estrapolando la retta (h^*, E_D^*) al valore critico E_D^*. Quest'ultimo, a sua volta, è determinato come funzione della frazione di danno critica D^*, il cui valore è basato su concetti di meccanica del danno (CDM, Continuum Damage Mechanics) [2] [3] [4].

$$K_{Jc} = \sqrt{2Ew_f} \quad (6)$$

- K_{Jc} è la tenacità a frattura
- $2w_f$ è l'energia di indentazione critica
- E è il modulo elastico

$$2w_f = \lim_{h \to h^*} \int_0^h \frac{4P}{\pi d^2} dh \quad (7)$$

- P è il carico applicato
- d è il diametro dell'impronta
- h^* è la profondità critica di indentazione

Nella Figura 13 è rappresentato il confronto tra i valori di tenacità determinati da prove standard con i valori predetti mediante IIT, con la banda di confidenza al 95%.

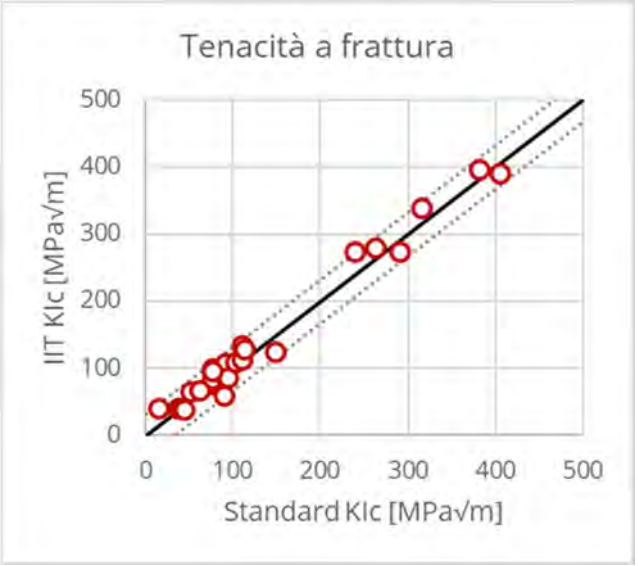


Figura 13. Comparazione tra i valori di tenacità da prove standard e predetti da IIT, e bande per intervallo di confidenza del 95%. Dati di letteratura [2] [3] [4] [5] e dati interni

Si osserva un buon andamento lineare dei dati, a significare che il metodo offre una buona predizione sia per tenacità basse, sia per tenacità alte, senza una deriva legata alla tenacità del materiale.

Sulla base dei dati di letteratura e i risultati di alcune esperienze eseguite nei nostri laboratori, osserviamo che il metodo descritto è in grado di offrire una buona predizione della tenacità a frattura, tenendo conto ovviamente di una certa ampiezza della banda di dispersione, sia per la normale dispersione connessa con la tenacità a frattura del materiale, sia per le incertezze collegate ai metodi di predizione derivati.

Per gli acciai comunemente utilizzati per attrezzature a pressione, con tenacità dell'ordine dei 100MPa√m, il valore predetto da IIT è nell'intervallo 100±32MPa√m (95% conf.).

4. Applicazioni ad analisi Fitness for Service

La possibilità di eseguire la prova anche in campo si presta all'esecuzione di valutazioni di vita residua, di stabilità o Fitness for Service. Il caso più semplice è quello di una verifica Fitness for Service di componenti corrosi che non può essere positivamente conclusa sulla base dei valori minimi di norma del materiale: la conoscenza di un valore meno conservativo della resistenza può permettere un mantenimento in servizio, pur con dovuta cautela, fino a sostituzione o riparazione del componente.

La possibilità di predire la tenacità a frattura offre, invece, possibilità aggiuntive per componenti interessati da cricche da esercizio o per cui è necessario eseguire un'analisi a fatica sulla base di un difetto postulato, come previsto, ad esempio, dalla UNI/TS 11325-11 per quelle attrezzature a pressione per cui il danno teorico in assenza di difetti è maggiore o uguale al 100%.

Sono state svolte le prime applicazioni in campo della tecnica, in cui si è acquisita esperienza riguardo l'applicabilità della prova a componenti di vario tipo, quali: tubazioni, curve di diametri diversi, pezzi speciali (Tee, Y). Inoltre, si è potuto valutare

l'effetto dei fattori di campo sulla qualità dei risultati ottenuti e sulle valutazioni successive, quali orientamento della macchina e planarità e finitura della superficie.
Nelle immagini seguenti sono riportate alcune di queste esperienze, relative a tubazioni di vapore surriscaldato e risurriscaldato in acciaio grado 91.



Figura 14. Applicazione in campo della prova di indentazione a due tubazioni per trasporto del vapore. Nell'immagine a sinistra, lo strumento è fissato alla tubazione mediante catene. Nell'immagine a destra sono stati usati i supporti magnetici.

Le posizioni di prova sono state scelte in corrispondenza delle piazzole di prelievo delle repliche metallografiche, sfruttando la preparazione fine della superficie. Nella Figura 15 è rappresentata una posizione, esemplificativa di quelle soggette a indagine, al termine della prova. Sono visibili le nove impronte corrispondenti a nove singoli test di indentazione (Figura 16).



Figura 15. Superficie del materiale (piazzola per prelievo di replica metallografica) al termine della prova di indentazione

Nella Tabella 1 sono riassunti i valori predetti delle proprietà standard ottenuti dall'elaborazione delle curve. Avendo ottenuto una predizione di R_m, $R_{p0.2}$ e $K_{Ic,}$ si hanno a disposizione le quantità necessarie a impostare un calcolo di stabilità di un difetto attraverso un diagramma FAD (Failure Assessment

Diagram), come descritto nelle procedure applicabili (BS7910 o API 549/ASME FFS-1). Inoltre, l'esecuzione di più prove IIT nella medesima posizione permette anche di avere, oltre al valore medio delle quantità, informazioni sulla distribuzione statistica delle proprietà e di calcolarne lo scarto[1]. È quindi possibile sfruttare tali risultati per calcolare la probabilità di rottura di un difetto, reale o postulato che sia, sulla base di un'analisi probabilistica eseguita con metodo Monte Carlo.

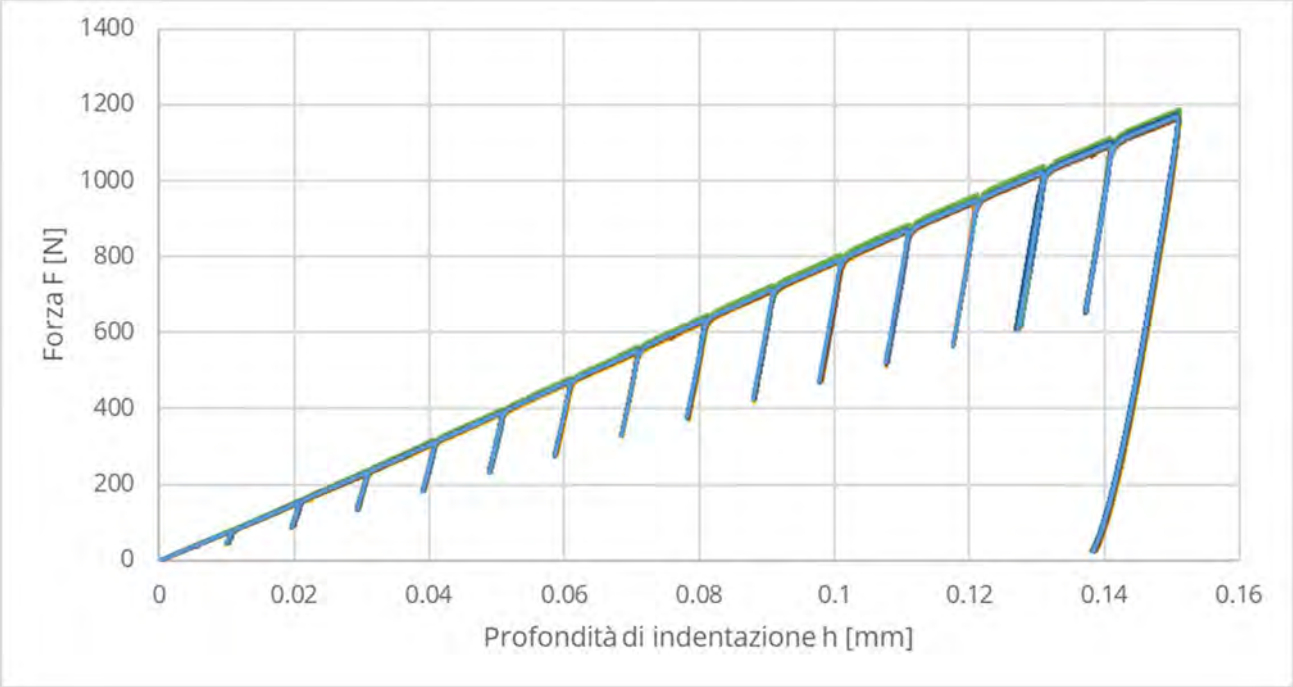


Figura 16. Curve F-h misurate nella posizione di prova in Figura 15. Le curve sono sostanzialmente sovrapposte, ad indicare un'omogeneità locale delle proprietà e una buona preparazione superficiale

$R_{m,IIT}$ [MPa]	$R_{p0.2,IIT}$ [MPa]	$K_{Jc,IIT}$ [MPa√m]
710±29	530±35	145±58

Tabella 1. Proprietà meccaniche dell'acciaio grado 91, derivate da IIT nella posizione di Figura 15, valore medio e intervallo di confidenza al 95%

Nel diagramma in Figura 17 è rappresentato il risultato finale di un calcolo della probabilità di rottura di un difetto svolto secondo il metodo Monte Carlo applicato ad un diagramma FAD. La quantità K_r, in ordinata, esprime il pericolo di frattura fragile o instabile ed è definita come il rapporto tra K_I, fattore di intensificazione delle sollecitazioni, e la tenacità a frattura K_{mat} (coincidente ai fini dell'analisi con il K_{Jc}). In ascissa, il parametro L_r esprime il pericolo di collasso plastico ed è il rapporto tra il *reference stress*, sollecitazione di riferimento che tiene conto dell'aumento locale della sollecitazione di parete dovuto alla presenza della cricca, ed il carico di snervamento

[1] Elevati valori di dispersione dei risultati, in particolare della tenacità, sono da ascrivere alla naturale dispersione della proprietà e al fatto che i valori in tabella non sono misure dirette ma quantità derivate

del materiale. Data una combinazione di sollecitazione, dimensione del difetto e proprietà del materiale, si calcola un punto di coordinate (Lr,Kr): se esso giace all'interno del diagramma, tale combinazione è da considerarsi sicura, viceversa la combinazione è non sicura.
Note le distribuzioni statistiche di sollecitazione σ, dimensione del difetto a, carico di rottura R_m, carico di snervamento $R_{p0.2}$ e tenacità a frattura K_{mat}, ogni simbolo rappresenta un singolo calcolo per una combinazione casuale di estrazioni da ciascuna distribuzione.

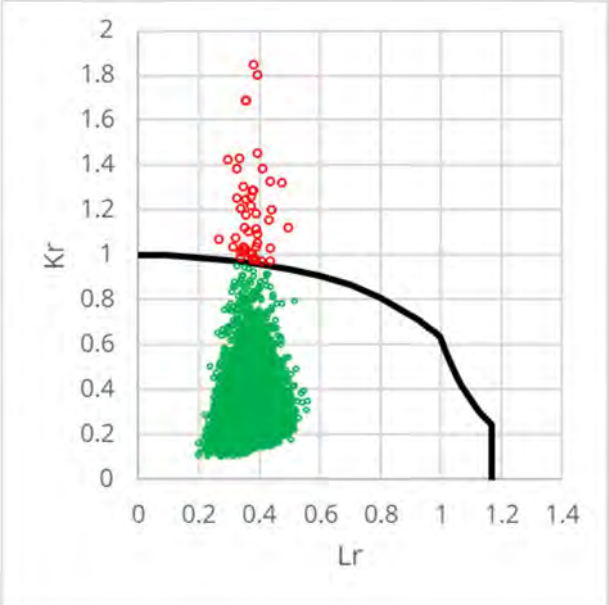


Figura 17. Diagramma FAD secondo BS7910 e applicazione di analisi secondo metodo Monte Carlo per il calcolo della probabilità di rottura di un difetto

La probabilità di rottura finale sarà il rapporto tra i punti esterni al diagramma (rotti) e i punti interni (non rotti).
Che l'analisi tratti di un difetto reale o di un difetto postulato, l'adozione di opportune leggi di accrescimento di cricca in funzione dei cicli di fatica o delle ore di esercizio in regime di scorrimento viscoso, permette di valutare la probabilità di rottura in funzione dell'esercizio futuro.

Il procedimento illustrato offre l'indubbio vantaggio di poter eseguire un'analisi Fitness for Service di un difetto avendo una predizione delle caratteristiche meccaniche locali in modo non distruttivo. Viene eliminata la necessità di assunzioni più o meno conservative basate sulla semplice durezza (per quanto riguarda le proprietà tensili), e valori di tenacità derivati da letteratura o da certificati di prove di resilienza risalenti alla costruzione dell'impianto, quando disponibili.
È importante sottolineare quanto il valore della tenacità a frattura è spesso la scelta più importante nelle valutazioni di stabilità e propagazione di difetto. Infatti, si ha la necessità di bilanciare l'analisi tra un eccessivo grado di conservatività e penalizzazione dei risultati o un'assunzione meno restrittiva, ma con possibili ripercussioni sul grado di sicurezza.
L'esecuzione di un'analisi basata su indentazione può offrire un'indicazione sulle proprietà da considerare, soprattutto quando è possibile il confronto tra una posizione danneggiata e una posizione dello stesso materiale ritenuta esente da danno o alterazione.
Al momento, un aspetto che merita sviluppi ulteriori è la valutazione di componenti eserciti in scorrimento viscoso, per cui la prova di indentazione descritta in questo

lavoro non fornisce risultati direttamente collegati con tale meccanismo di danneggiamento. Di conseguenza, un'analisi probabilistica del tipo descritto in questo capitolo deve per necessità di cose basarsi su dati statistici di letteratura. Una via percorribile per estendere le possibilità di analisi è di integrare le informazioni con prove di small punch test a bassa temperatura, a temperatura ambiente e a creep, con cui si possono, inoltre, eseguire valutazioni incrociate della tenacità a frattura. Tuttavia, è importante considerare il carattere semi-distruttivo, e non più non-distruttivo, della prova.

5. Conclusioni

In questo lavoro è stata presentata l'applicazione della prova di indentazione strumentata (*Instrumented Indentation Test*, IIT) alla predizione delle proprietà meccaniche dei materiali metallici. La prova è assimilabile ad una prova di durezza Brinell ed è eseguita mediante uno strumento in grado di misurare e registrare il carico applicato in funzione della profondità di indentazione. La curva forza-profondità viene poi elaborata per ottenere una predizione dei valori di carico di rottura, snervamento e di tenacità a frattura. Questo permette di ottenere le informazioni necessarie per valutare eventuale degrado delle proprietà del materiale e di costituire la base su cui sviluppare analisi Fitness for Service di attrezzature a pressione interessate da difetti legati all'esercizio, riduzione di spessore o altri tipi di danneggiamento.

Bibliografia

[1] ISO, «ISO/TR 29381:2008(E) "Metallic Materials - Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test - Indentation tensile properties,» 2008

[2] J.-S. Lee, J.-i. Jang, B.-W. Lee, Y. Choi, S. G. Lee e D. Kwon, «An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics,» *Acta Materialia,* n. 54, p. 1101–1109, 2006.

[3] K.-W. Lee, H.-u. Kim, S.-W. Park, J.-s. Lee, K.-H. Kim e D. Kwon, «Nondestructive Estimation of Fracture Toughness Using Instrumented Indentation Technique,» *Key Engineering Materials,* Vol. %1 di %2385-387, pp. 893-896, 2008.

[4] S.-W. Jeon, K.-W. Lee, J. Kim, W. Kim, C.-P. Park e D. Kwon, «Estimation of Fracture Toughness of Metallic Materials Using Instrumented Indentation: Critical Indentation Stress and Strain Model,» *Experimental Mechanics,* 2016.

[5] S. Amiri, N. Lecis, A. Manes e M. Giglio, «A study of a micro-indentation technique for estimating the fracture toughness of Al6061-T6,» *Mechanics Research Communications,* n. 58, pp. 10-16, 2014.

[6] American Petroleum Institute, API 579-1/ASME FFS-1 2021 Fitness-For-Service, December 2021, API Publishing, 2021.

[7] N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Pearson Education Limited, 2013.
[8] B. Taljat e G. Pharr, «Development of pile-up during spherical indentation of elastic–plastic solids,» *International Journal of Solids and Structures,* n. 41, pp. 3891-3904, 2004
[9] UNI, *UNI EN ISO 14577-1 "Prova di penetrazione strumentata per la determinazione della durezza ed altri parametri dei materiali - Parte 1: metodo di prova",* Ottobre 2015

La verifica di integrità di un recipiente gas con la tecnica Phased Array e la gestione dell'esercizio in condizioni di Fitness for Service – un'analisi della sorveglianza del danneggiamento

A. Andolina[1], M. Bartesaghi[2], R. Molica Nardo[3], A. Palumbo[3]

[1]Inail - Uot di Milano
[2]Responsabile Manutenzione - sito di Terranova dei Passerini - SASOL ITALY spa
[3]ADES Consulting & Services s.r.l.

Sommario
La pratica di riparazione delle attrezzature a pressione consente di attuare gli interventi di ripristino dettati dalle norme di prima fabbricazione o dalle norme armonizzate alla direttiva PED per consentire l'efficace rientro in esercizio delle attrezzature a pressione. Tuttavia, la presenza di membrature soggette a danneggiamento sempre della stessa natura e posizione favoriscono la pianificazione di interventi preventivi focalizzati alla ricerca del danno specifico anche in apparecchi apparentemente integri.
Gli autori propongono una lettura critica della campagna di controlli non distruttivi effettuata su un campione di recipienti gas di identico utilizzo, età e fabbricazione, effettuata con tecnica Phased Array secondo la UNI EN ISO 22825. Il conseguente Piano degli interventi di manutenzione programmata sulla totalità dei recipienti in esercizio è stato strutturato per garantire il controllo del danneggiamento in modo da rispettare le fermate periodiche di manutenzione e non incorrere in rotture/riparazioni intempestive. Tale analisi è stata effettuata in coerenza con le indicazioni della norma UNI TS 11325 - 8 2025 "Pianificazione delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI)".
I risultati conseguiti evidenziano come, in alcune condizioni di ispezione, sia possibile sostituire i controlli radiografici con controlli volumetrici Phased Array in grado di assicurare lo stesso livello di affidabilità e riproducibilità dei risultati alle successive fermate di manutenzione con tempi medi di analisi inferiori.

1. Introduzione

La gestione manutentiva delle attrezzature di lavoro fa sempre più spesso riferimento allo standard ISO 55000 -Asset Integrity Management Systems, in particolare risulta di centrale importanza garantire il coordinamento tra le attività di manutenzione - il fermo impianto necessario per lo svolgimento dell'attività-, e le esigenze di produzione[1].
La logica di efficientamento suggerita dallo standard organizza le attività di ispezione nei modi e nei tempi suggeriti dalle attività manutentiva precedente, dove la conoscenza del

meccanismo del danno e della sua capacità di evolvere, consente di garantire l'esercizio sicuro delle attrezzature anche in presenza di difetti in una logica di Fitness for service.
In questa visione appare del tutto coerente l'applicazione del procedimento di deroga descritto al comma 5 dell'art.10 del D.M. 329/ 04, dove la verifica decennale obbligatoria per le attrezzature classificate secondo le tabelle A e B – verifica di integrità- diventa anche occasione per la conduzione della pratica manutentiva.
La UNI TS 11325 8 stabilisce i requisiti del sistema di gestione aziendale che garantisce - in appendice A – tra le procedure operative quelle di manutenzione in grado assicurare il rispetto di questi criteri.
In buona sostanza devono essere esplicitati per ogni componente oggetto di manutenzione e garantire la chiara identificazione di:

- Tipologia di attrezzatura di lavoro e impianto di processo nella quale è inserito
- Specifiche di fabbricazione
- Modalità di esercizio: Pressione, temperatura, portata, tempi di funzionamento
- Tempi di bonifica e manutenzione
- Tipologia di danno atteso
- Conseguenza attesa: scenari di rilascio
- Piano di controlli dell'integrità meccanica e norma di riferimento

Il piano dei controlli dell'integrità meccanica può fare riferimento al prospetto 1 della UNI TS 11325 12 -2018 [2]:

Tecniche di controllo	**Tipologie di danneggiamento**						
	assottigliamento	**Cricche superficiali**	**Cricche sub superficiali**	**Formazione microfessure**	**Cambi metallurgici**	**Cambi dimensionali**	**blistering**
Esame visivo	1,2,3	2,3	x	x	x	1,2,3	1,2,3
UT onde longitudinali	1,2,3	3,x	3,x	2,3	x	x	1,2
magnetoscopico	x	1,2	3,x	x	x	x	x
Liquidi penetranti	x	1,2,3	x	x	x	x	x
radiografia	1,2,3,	3,x	3,x	x	x	1,2	x
repliche	x	2,3	2,3	2,3	1,2	x	x
1: alta efficacia, 2: moderata efficacia, 3: scarsa efficacia, x: non usato normalmente							

Tabella 1. efficacia controlli non distruttivi (UNI TS 11325-12[2])

2. Scopo

L'obiettivo della presente nota è definire un possibile approccio della gestione della manutenzione che prenda a riferimento tutte le osservazioni di natura ispettiva e identifichi le più efficaci anche ricorrendo a metodiche di Controllo non Distruttivo

innovative che consentano di seguire fedelmente la formazione di un eventuale danneggiamento dell'attrezzatura di lavoro.

3. Controlli e verifiche di integrità dei reattori di etossilazione.

3.1 Omologazione e controlli periodici

Oggetto dell'analisi sono i sei reattori dedicati al processo di etossilazione con configurazione:

Attrezzatura a pressione		Fluido/gr.	Stato fluido	PS [barg]	TS [°C]	Volume [lt]	Cat.
Reattore	mantello	ossido di etilene /I	L / V	12	250	16100	IV
	tubi	acqua/ II	L / V	11	187	255	

Tutti i reattori, identici per geometrie, esercizio ed età, sono stati messi in servizio nel 2010 e soggetti alla verifica di integrità alla scadenza dei dieci anni. Tale verifica è stata eseguita puntualmente nel 2020 secondo un piano dei controlli che prevedeva ispezione visiva, controlli spessimetrici, dimensionali UTS, controlli superficiali con i liquidi penetranti LP. I controlli eseguiti non hanno dato luogo a indicazioni di criticità.
La successiva verifica di integrità-dato il buon esito dei controlli- è stata fissata al 2030.

3.2 La pratica di riparazione

Ad aprile 2024 è stata attivato un "near miss" per la fuoriuscita di prodotto e il conseguente fermo del reattore di etossilazione 340 R11 appartenente alla famiglia di reattori già assoggettati nel 2020 a verifica di integrità. Durante l'ispezione visiva attuata prima della realizzazione del batch di lavorazione, era stato evidenziato un percolamento di prodotto dal foro spia della piastra di rinforzo del bocchello T6- uscita dell'acqua di raffreddamento-, dovuta probabilmente a una cricca passante tra mantello e camicia di rinforzo di un bocchello. Si trattava del bocchello T6 che riceve l'uscita delle acque di raffreddamento dal serpentino interno del reattore stesso (figura 1a). Il trafilamento di prodotto dal reattore era riscontrabile solo durante la fase di riscaldamento del reattore, durante l'innesco della reazione dove le temperature superano anche localmente i 140°C. A freddo, durante la fase di batch di controllo di tenuta e poi con la prova idraulica effettuata ai valori di esercizio (3 bar), non si evidenziava nessun nessuna perdita di pressione e conseguente rilascio.
Immediatamente è stato fermato il reattore di etossilazione 304 R11 ed è stata attivata una campagna di ispezione mediante controlli non distruttivi volumetrici con la tecnica Phased Array.

Il controllo interno del serpentino di raffreddamento – eseguito con i liquidi penetranti ha confermato che si trattava di una cricca passante (figura 1b)



1 a) Percolamento di prodotto da foro spia nel rinforzo, fermo del reattore



1 b) Evidenza cricca passante da liquidi penetranti interno reattore

Figura 1. Cricca passante (interno reattore)

È stata attivata una pratica di riparazione per il ripristino della saldatura e il riposizionamento del rinforzo, conclusa con la verifica dello stato di ammaloramento di tutti i rimanenti bocchelli delle serpentine di raffreddamento.
Ancora con la tecnica PAUT sono state evidenziate indicazioni importanti su sei dei sette bocchelli residuali: presenza di scoria, incollamenti e mancata penetrazione della ripresa al rovescio (Tabella 3). Lo stato generale ha quindi richiesto di estendere la riparazione a tutte le saldature tronchetto/virola.

3.3 La campagna di controllo del parco reattori

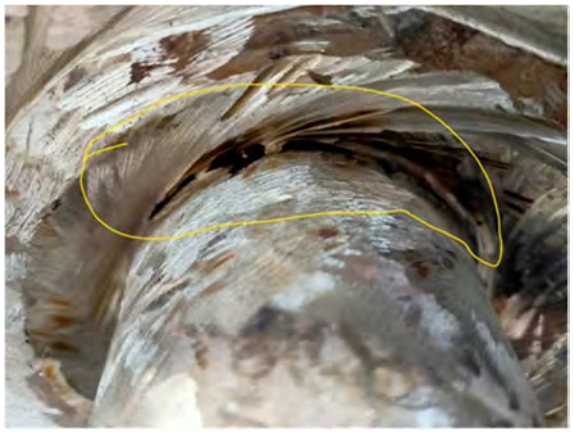
L'evidenza della perdita riscontrata nel reattore R11 ha aperto un focus sulle verifiche di integrità di tutti i reattori e indotto l'azienda a sottoporre nella fermata agosto 2024 tutti i reattori del lotto a una campagna di controlli volumetrici del tipo PAUT indirizzata al controllo delle saldature del serpentino di raffreddamento.
L'ispezione annuale 2024 ha sviluppato secondo il piano di manutenzione SASOL "reattori di etossilazione" due diverse indagini:

1. controllo del mantello prevede ispezioni visive interne ed esterne, controllo degli spessori delle virole, liquidi penetranti interni ed esterni sulle saldature di composizione longitudinali e circonferenziali (tabella 2);
2. controllo del serpentino di raffreddamento con ispezione visiva liquidi penetranti interni ed esterni, controlli volumetrici UT su tutte le saldature esterne virole/tronchetto di tutti i bocchelli (tabella 3).

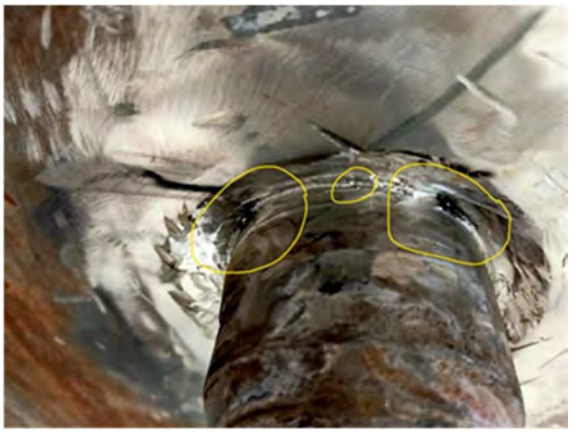
reattore		ispezioni annuali dal 2010 (anno installazione) - 2024		ispezione annuale 2024	
Controlli effettuati sul mantello esterno		*indagine superficiale PT penetrant test UNI EN ISO 3452 VT visual test UNI EN ISO 13018 / UNI EN ISO 17637*	*indagine spessimetrica UTS UNI EN 14127*	*indagine superficiale PT penetrant test UNI EN ISO 3452 ; VT visual prueba norma UNI EN ISO 13018 / UNI EN ISO 17637)*	*indagine spessimetrica UTS UNI EN 14127 PAUT UNI EN ISO 22825 (Phased Array Ultrasonic Testing)*
340R7	mantello (int/est)	PT, VT: nessuna evidenza	a spot: spessori nella norma	PT, VT nessun'evidenza	nessuna indagine prevista
340R8	mantello (int/est)	PT, VT: nessuna evidenza	a spot: spessori nella norma	PT, VT: nessuna evidenza	nessuna indagine prevista
340R9	mantello (int/est)	PT, VT: nessuna evidenza	a spot: spessori nella norma	PT, VT: nessuna evidenza	nessuna indagine prevista
340R10	mantello (int/est)	PT, VT: nessuna evidenza	a spot: spessori nella norma	PT, VT: nessuna evidenza	nessuna indagine prevista
340R11	mantello (int/est)	PT, VT: nessuna evidenza	a spot: spessori nella norma	PT, VT: nessuna evidenza	nessuna indagine prevista
340R12	mantello (int/est)	PT, VT: nessuna evidenza	a spot: spessori nella norma	PT, VT: nessuna evidenza	nessuna indagine prevista

Tabella2. Piano dei Controlli (membratura esterna)

Per questa seconda indagine la tecnica PAUT ha restituito la panoramica dei difetti (tabella 3) e quindi l'esigenza di prevedere il ricontrollo di tutte le attrezzature l'anno successivo-2025- per monitorare l'evoluzione del danno. Dal rapporto PAUT si evince che anche il reattore 340R9 presentava criticità non trascurabili almeno sui bocchelli T4-T6-T8: è stato quindi messo fuori servizio e oggetto di pratica di riparazione nel 2025. Ancora una volta il più critico risultava essere il bocchello T6 che dopo asportazione del cordone di saldatura presentava scoria e incollature nei cordoni di saldatura (figura 2):



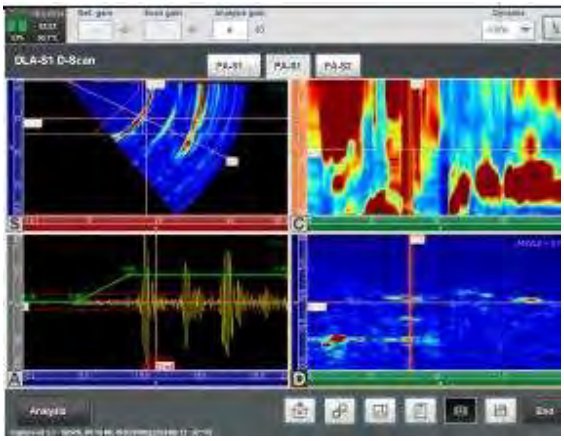
2 a) dettaglio bocchello T6 difetto nord: "scorie estese" su tutto cordone di piena penetrazione lato nord-alto del bocchello



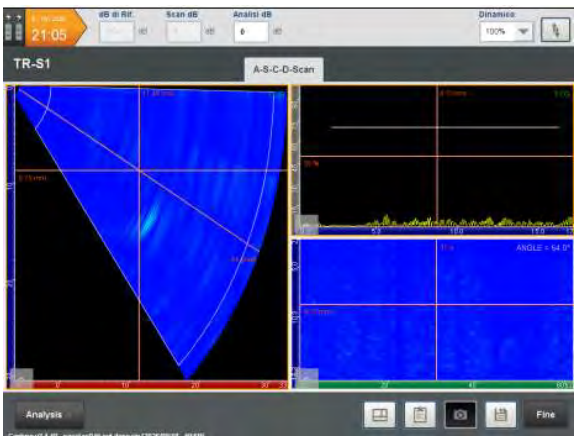
2 b) dettaglio bocchello T6 difetto est: "fusione non perfetta" su tutto cordone di piena penetrazione lato est del bocchello

Figura 2. Evidenza dei difetti dopo asportazione del cordone di saldatura

In evidenza il controllo volumetrico PAUT effettuato prima e dopo la riparazione della saldatura del bocchello T6 (figura 3):



3 a) saldatura virola/tronchetto T6 prima della riparazione



3 b) saldatura virola/tronchetto T6 dopo riparazione

Figura 3. Controlli PAUT (saldatura del bocchello T6)

La scelta è stata di intervenire su tutti i bocchelli del reattore 340R9, anche quelli risultati integri ai controlli, con il ripristino totale delle saldature e delle pad di rinforzo. Sugli altri reattori della stessa campagna 2024 lo stato delle saldature richiede solo di essere monitorato con un piano di controlli PAUT annuale (campagna controlli 2025) per valutare l'evoluzione di alcune indicazioni riscontrate (Tabella3).

reattore		**ispezione annuale 2024**		**ispezione annuale 2025**	
Controlli effettuati sul serpentino di raffreddamento-bocchelli		*indagine superficiale PT penetrant test UNI EN ISO 3452 VT visual test UNI EN ISO 13018 / UNI EN ISO 17637*	*indagine spessimetrica UTS UNI EN 14127 PAUT UNI EN ISO 22825 (Phased Array Ultrasonic Testing)*	*indagine superficiale PT penetrant test UNI EN ISO 3452 ; VT visual test norma UNI EN ISO 13018 / UNI EN ISO 17637)*	*indagine spessimetrica UTS UNI EN 14127 PAUT UNI EN ISO 22825 (Phased Array Ultrasonic Testing)*
340R7	serpentine e bocchelli	PT, VT: nessuna evidenza	T2: incollatura saldatura bocchello T3-T4-T7: incollatura su lembo del cianfrino e indicazione sulla ripresa al rovescio della saldatura	PT, VT: nessuna evidenza	Si confermano le difettosità dell'anno precedente senza evoluzioni rilevanti
340R8	serpentine e bocchelli	PT, VT: nessuna evidenza	T3-T4-T5-T6-T7: incollature su lembi del cianfrino T1-T2: indicazione sulla ripresa al rovescio della saldatura	PT, VT: nessuna evidenza	Si confermano le difettosità dell'anno precedente senza evoluzioni rilevanti
340R9	serpentine e bocchelli	PT, VT: nessuna evidenza	T1: indicazione sulla ripresa al rovescio della saldatura non ammissibile T4-T6 incollatura di entità rilevante su parete bocchello e tra le passate T8: porosità	PT, VT: nessuna evidenza	2025: Intervento di riparazione con ripristino di tutte le saldature

340R10	serpentine e bocchelli	PT, VT: nessuna evidenza	T2-T5: indicazione sulla ripresa al rovescio della saldatura	PT, VT : nessuna evidenza	Si confermano le difettosità dell'anno precedente senza evoluzioni rilevanti
340R11	serpentine e bocchelli	PT, VT: nessuna evidenza	T3-T5-T8: incollature sul lembo del cianfrino T2-T1-T7: indicazione sulla ripresa al rovescio della saldatura non ammissibile T4: incollature su lembi del cianfrino non ammissibile T6: rilascio di prodotto per difetto di saldatura	PT, VT: nessuna evidenza	2024: Intervento di riparazione con ripristino di tutte le saldature
340R12	mantello (int/est)	PT, VT: nessuna evidenza	T3-T5-T7: indicazione sulla ripresa al rovescio della saldatura	PT, VT: nessuna evidenza	Si confermano le difettosità dell'anno precedente senza evoluzioni rilevanti

Tabella 3 - Piano dei Controlli (serpentino di raffreddamento)

4. Metodologia di indagine

4.1 I controlli di fabbricazione

La virola è in ASTM A 240 316 L mentre il tronchetto è A312 316L, gli acciai austenitici possono essere ben indagati con tecniche radiografiche, nel caso specifico però la giunzione tronchetto/virola non consentiva il posizionamento della lastra fotografica per l'ingombro della tubazione di raffreddamento troppo vicina alla virola (figura 4 c):

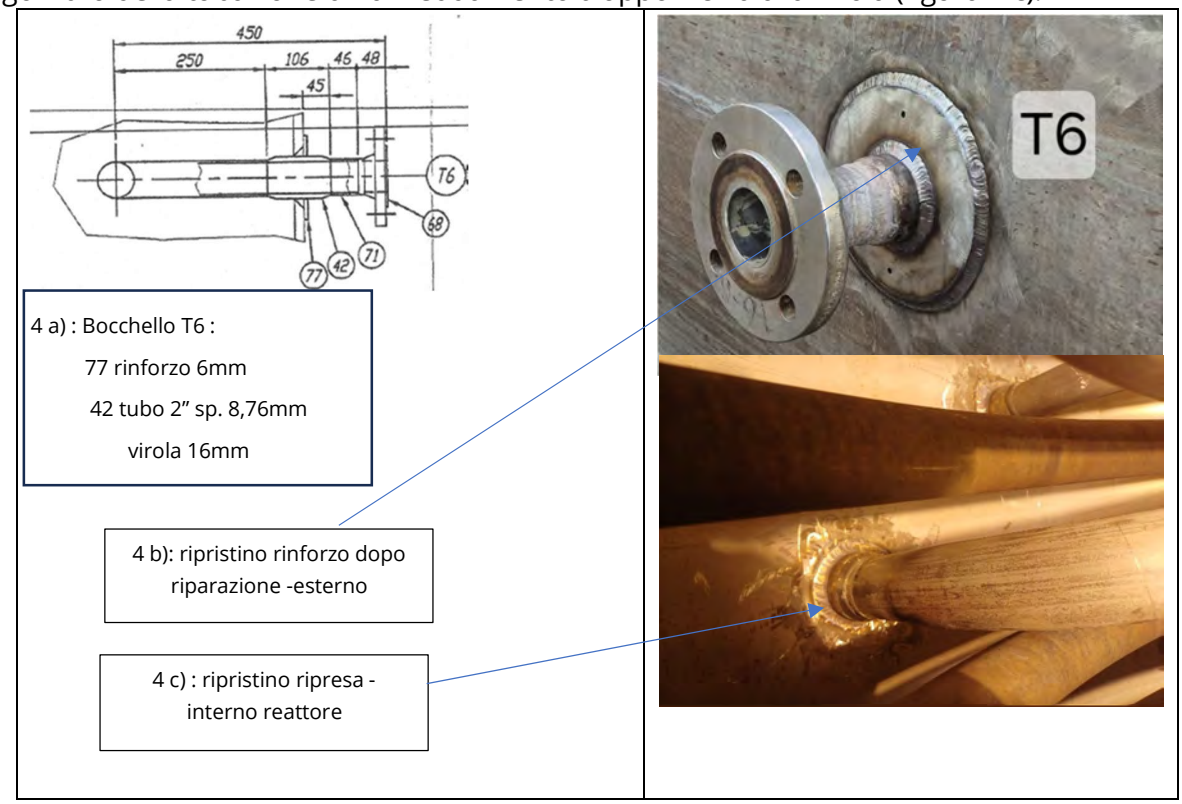


Figura 4. Particolare saldatura di rinforzo (tronchetto T6)

In occasione della prima fabbricazione era stato quindi effettuato solo un controllo con i liquidi penetranti prima del posizionamento dei rinforzi; tale controllo non è specifico per il rilevamento dei difetti sotto cordone dovute alla mancata penetrazione [2]. Inoltre, la presenza della piastra di rinforzo rende l'ispezione volumetrica a ultrasuoni attuabile solo dalla parte interna (figura 4b).

4.2 La tecnica di indagine sui bocchelli- calibrazione

La tecnica Phased Array Ultrasonic Test (PAUT), condotta secondo le norme UNI EN ISO 22825:2017[3] , è largamente impiegata per i controlli non distruttivi e particolarmente efficace per il controllo dei reattori in questione, potendo bypassare la problematica relativa alle curvature dei fondi e delle virole che, con un utilizzo di tecniche tradizionali come i manual UT, avrebbero portato ad una difficile individuazione delle posizioni dei difetti. Inoltre, l'utilizzo del controllo UT non avrebbe consentito la possibilità di analizzare l'intero volume delle saldature a causa delle granulometrie del materiale oltre alla anisotropia tra materiale base e materiale di apporto (banalmente non si può utilizzare la riflessione del fascio ultrasonoro).

Per supplire a quanto sopra descritto, sullo strumento PAUT (GEKKO 64/64) è stata connessa una sonda DLA (Dual Linear Array) a onde longitudinali corredata di zoccolo 70L focalizzato a 20 mm di profondità, di dimensioni estremamente ridotte, utile per operare la scansione delle saldature a ridosso dei cordoni (controllo dall'esterno) o con offset ridotto (controllo dall'interno).

L'utilizzo di onde longitudinali, consente alla tecnica di controllo ultrasonoro di tralasciare l'effetto delle onde di Lamb e pertanto la legge focale predisposto per il controllo in oggetto ha potuto garantire la copertura dell'intero volume di saldatura.

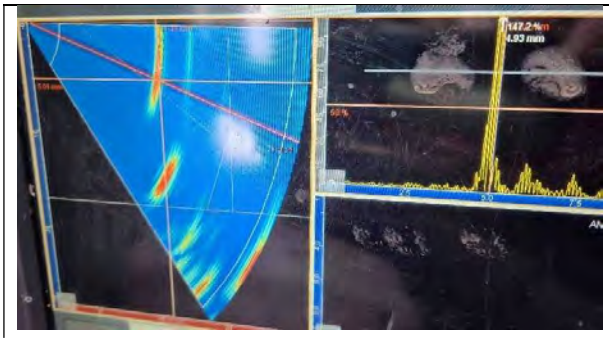
A conferma della validità del metodo, prima di iniziare il controllo vero e proprio, è stato preparato un blocco di calibrazione rappresentativo dell'item da sottoporre al controllo in ASTM A 240 316 L dello stesso materiale della virola ed è stata effettuata una calibrazione del setup. Sul blocco di calibrazione di spessore di 20 mm dello stesso materiale della virola, sono stati realizzati:

- 3 SDH (Side Drilled Holes) a tre profondità differenti di diametro da 2 mm, per simulare difetti volumetrici;
- 2 intagli/Notches (uno sulla superficie e uno sul fondo) di dimensioni 0.2X1 lunghi 20mm, per simulare eventuali incisioni superficiali.

la calibrazione permette di visualizzare tutti e tre i riflettori.

Il setup è stato calibrato con un numero di dB di riferimento utile per vedere il Notch sul fondo all'80% sull'A-scan (sensibilità del controllo molto alta).

In figura 5 il riscontro della calibrazione sul foro longitudinale posto a 5mm:



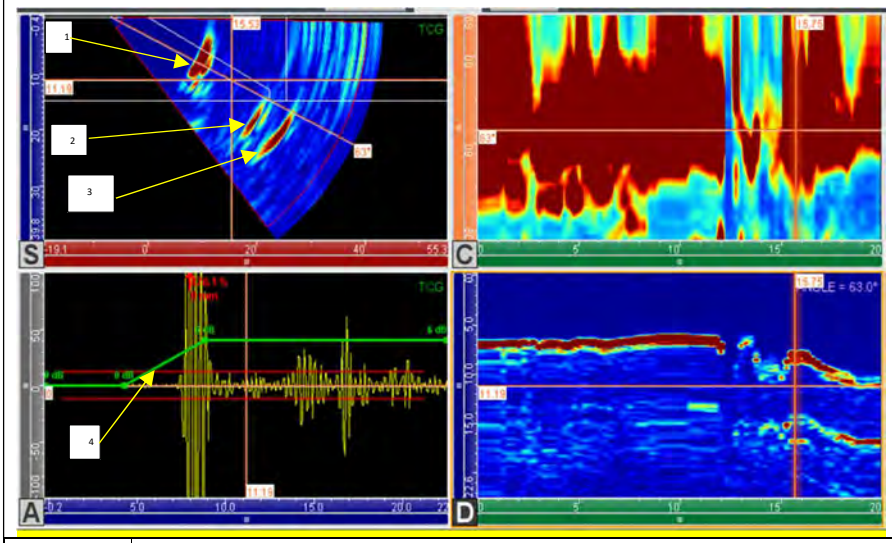
5 a) difetto a 5mm



5 b) piastra di calibrazione - due dei tre fori di controllo -

Figura 5. Calibrazione sonda DLA

A differenza dei controlli manuali, il PAUT richiede che tutti i potenziali difetti, a qualsiasi profondità vengano rilevati, debbano vedersi tutti alla stessa ampiezza di eco: a questo scopo è stata implementata una TCG (Time Corrected Gain) al setup iniziale.
La TCG sul blocco di calibrazione utilizzato ha "aggiustato" i dB sia sui fori sia sull'intaglio superiore, in modo da avere, così, tutti i riflettori all'80% sull'A-Scan.
Il controllo è stato eseguito In Time mantenendo una velocità di scansione di 3mm/sec e avendo avuto cura di tenere costante la distanza del fronte sonda dalla faccia del bocchello (OFFSET). In figura 6 lo screenshot su una scansione (340R11 bocchello T5 prima della riparazione):



Pos.	1: Incollatura Sul Lembo Del Cianfrino 2: Incisione In Radice 3: Radice 4: curva TCG

Figura 6. Controllo PAUT reattore 340 R11 (bocchello T5)

5. Applicazione della UNI TS 11325 - 8 2025 e nuovo Piano dei Controlli

È di tutta evidenza che le attrezzature a pressione non sempre ottengono dal Manuale d' Uso e Manutenzione le informazioni necessarie per pianificare ispezioni e controlli: le verifiche di legge quando obbligatorie o legate alla buona tecnica non sono in grado di identificare tutte le condizioni di esercizio alle quali vanno incontro lungo la loro vita utile queste attrezzature di lavoro. È proprio la conoscenza dell'effettiva condizione di esercizio e la possibilità di operare una efficace verifica ispettiva durante la manutenzione che garantisce una vita utile sicura anche in presenza di indicazioni di danneggiamento. La norma UNI TS 11325-8 2025 definisce una tecnica di lavoro per coordinare le tempistiche e le modalità delle attività di manutenzione in funzione dei risultati che questi controllo evidenziano. Il percorso avviene con un processo sequenziale (figura 7):

1. Analisi e pianificazione iniziale degli interventi da effettuare (modi e tempi);
2. Raccolta dati e informazioni (progetto di prima fabbricazione, controlli successivi.);
3. Analisi di rischio (effettuata con metodiche di analisi consolidata: HaZop, LOPA, what if analysis, fault-tree analysis ;
4. Elaborazione e attuazione del piano di ispezione e manutenzione;
5. Esecuzione dei controlli;
6. Verifica dell'efficacia del sistema adottato.

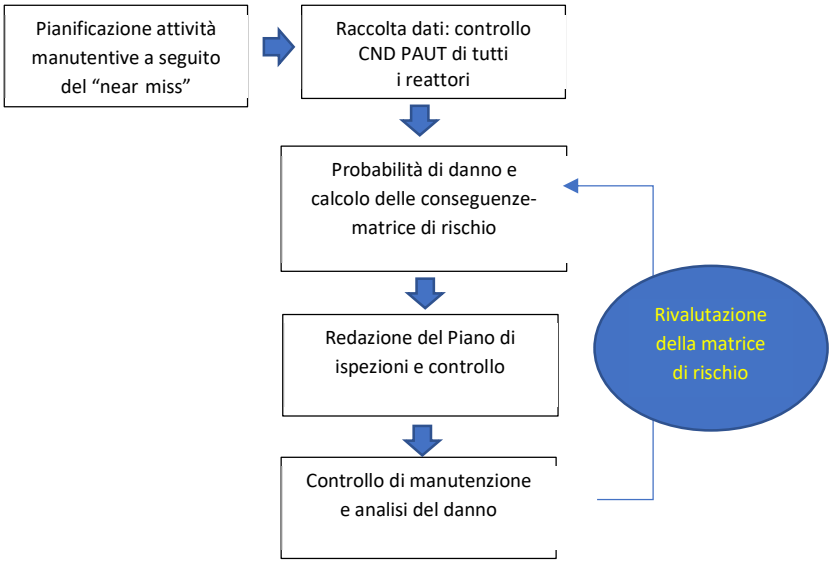


Figura 7. Processo di gestione delle attività manutentive

Nello specifico di un reattore è possibile fare riferimento alle tabelle adottate dalla CCPS "Guidelines for Mechanical Integrity Systems [4] ", dove per la verifica di integrità del solo reattore sono riportate in tabella 4 i tempi e modi della nuova attività manutentiva:

attività	Fabbricazione/ Scheda macchina	Gravità	Manutenzione attività	Manutenzione frequenza	Manutenzione corretta attività	Manutenzione corretta frequenza
documentale	• Conformità alla norma di fabbricazione	critica				
monitoraggio parametri	• Rating (Pressione,Portata, Temperatura, Livello)	critica	Monitoraggio delle derive	8500 ore – un anno-	Monitoraggio delle derive	1200 ore
inattività del reattore	• Tempi fermo impianto	moderata	Efficientamento ISO 55000	< 800 ore	Efficientamento ISO 55000	<100 ore
controllo del danno atteso	• Corrosione • Erosione • Cedimento strutturale • Danno d'origine	critica	UTS spessori LP VT	10 anni	PAUT LP VT	2 anni

Tabella 4. Manutenzione e Piano dei Controlli (CCPS "Guidelines for Mechanical Integrity Systems [4])

Il Piano dei controlli rivalutato a seguito delle campagne 2024 e 2025 ha consentito di pianificare le indagini intermedie:

- 2 anni per tutti i reattori che non hanno manifestato indicazioni di danneggiamento
- 3 anni per i reattori che in presenza di danneggiamento non hanno manifestato l'avanzamento del danno tra il primo e secondo controllo
- 2 anni per i reattori che hanno una indicazione di danneggiamento da verificare

Si è scelto di identificare come indice di prestazione KPI della frequenza dei controlli proprio l'avanzamento del danneggiamento riscontrato tra un controllo PAUT e il successivo.

6. Conclusione e analisi dei risultati

IL controllo manutentivo aggiornato secondo il nuovo piano dei controlli risulta più efficiente in quanto all'incremento dei tempi di controllo corrisponde la riduzione del fermo impianto. Inoltre, la possibilità di adoperare una tecnica di indagine affidabile, ripetibile e di basso impatto sui tempi di fermata manutentiva come il controllo Phased Array PAUT, permette di attivare efficacemente la procedura di deroga dei controlli decennali delle attrezzature a pressione di cui al comma 5 dell'art.10 del D.M. 329/ 04, avendo a supporto il monitoraggio continuo dello stato di benessere del componente.
Gli autori ritengono che l'identificazione di un metodo efficiente di rilevamento dei difetti sia essenziale alla determinazione dell'effettivo stato di ammaloramento di

un’attrezzatura a pressione. Solo a seguito della validazione della bontà del metodo sarà possibile compilare un piano manutentivo valido, finalizzato ai risultati e coordinato con l’attività produttiva.

Bibliografia

[1] UNI 11325-8:2025 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 8: Pianificazione delle ispezioni e delle manutenzioni su attrezzature a pressione attraverso metodologie basate sulla valutazione del rischio (RBI)

[2] UNI 11325-12:2018 Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 12: Verifiche periodiche delle attrezzature e degli insiemi a pressione

[3] UNI EN ISO 22825:2017 Controllo non distruttivo delle saldature - Controllo con ultrasuoni - Controllo delle saldature di acciaio austenitico e leghe a base nichel

[4] CCPS: Guidelines for Mechanical Integrity Systems 1 st Edition

Verifica di funzionamento a seguito di riparazione di un generatore di vapore a tubi d'acqua al servizio della linea 1 del Termoutilizzatore A2A di Brescia

F. Rossetti[1], N. Palumbo[1], A. Serra[2], D. Airoldi[3]

[1]Inail – UOT di Brescia
[2]ATS Brescia
[3]A2A Ambiente SPA

Sommario
Questa memoria descrive le prove effettuate per la verifica di funzionamento a seguito di riparazione del generatore di vapore al servizio del termoutilizzatore A2A di Brescia. In particolare vengono descritte le procedure da impiegarsi nella verifica del corretto funzionamento dei dispositivi di sicurezza e delle relative logiche nel sistema blocco caldaia condivise dall'Utilizzatore con l'ATS di Brescia e l'INAIL UOT di Brescia. Vengono inoltre elencati i documenti indispensabili atti a garantire un esito positivo della verifica.

1. Introduzione

Il generatore di vapore a tubi d'acqua, al servizio della linea 1 del Termoutilizzatore A2A di Brescia, è stato oggetto della sostituzione completa di tutte le serpentine dei surriscaldatori SH 1-2 e SH2 secondo la norma tecnica Raccolta VSG – M – S. L'utente ha provveduto ad avanzare proposta di riparazione ai sensi dell'art. 14 comma 2 lettera a) e b) del d.m. 329/04 alla competente UOT dell'INAIL che ha rilasciato il benestare alla riparazione e il successivo verbale di verifica di riparazione. L'utilizzatore infine ha provveduto ai sensi dell'art. 7 comma 3 del d.m. 329/04, a richiedere al soggetto incaricato delle attività di verifiche periodiche il consenso al riavvio dell'esercizio dell'attrezzatura riparata. La verifica di funzionamento per il riavvio del generatore è stata eseguita dall'ATS di Brescia, seguendo un apposito protocollo condiviso. L'esigenza di implementare una procedura codificata per l'esecuzione della verifica di funzionamento è dettata dalla particolarità dell'impianto oggetto di analisi ed in particolare, perché si evitano interruzioni di funzionamento della griglia mobile di approvvigionamento del combustibile RSU al generatore e fuori servizio della turbina a vapore. Tale procedura dovrà essere vista come una linea guida codificata ad uso dell'operatore abilitato alla conduzione di generatori di vapore col patentino di 1° grado di turno, che si trova quindi ad eseguire la verifica con l'Ente incaricato. La verifica, inoltre, deve essere attuata in collaborazione con la struttura interna dell'azienda che si occupa della programmazione e impostazione dei valori digitali di blocco delle sicurezze che si vogliono provare. La verifica viene svolta presso la *control-room* dell'impianto ed ha una durata di circa un'ora. Gli esisti relativi agli interventi dei blocchi di sicurezza

vengono proiettati a monitor e salvati in apposito file digitale che viene acquisito dall'Ente incaricato per l'esecuzione delle verifiche (Fig. 1).

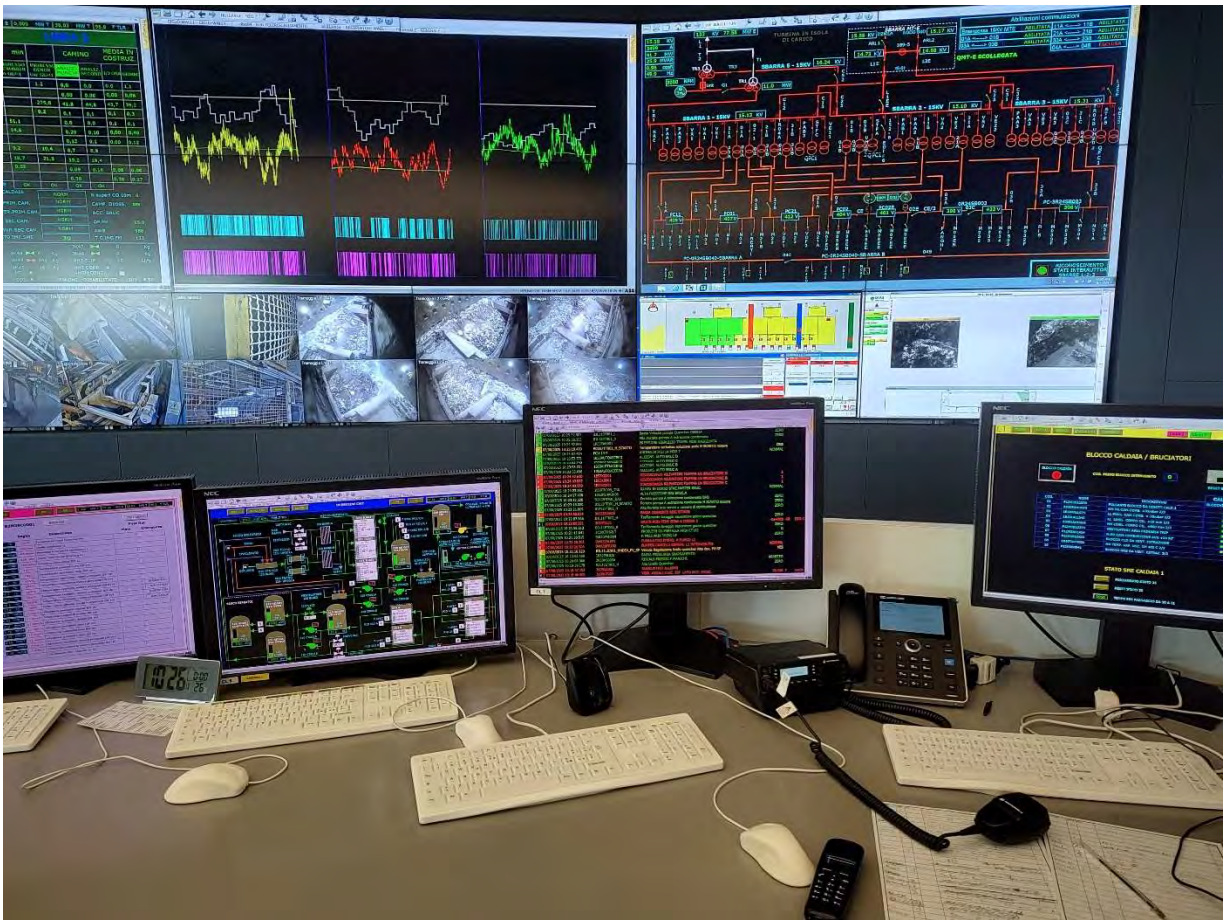


Figura 1. Sala di controllo

2. Modalità operative

Il funzionario incaricato della verifica ha provveduto a:

a) acquisire il *benestare alla riparazione* e la *verifica di riparazione* rilasciati dalla competente INAIL UOT di Brescia;

Benestare alla riparazione

BENESTARE N. : 20250528.006311441.PR0			**DATA EMISS.:**		**16/06/2025**
RIPARATORE e UTENTE: **A2A Ambiente spa Via Lamarmora, 230 Brescia**			N. Matricola ISPESL o, in mancanza, N. di fabbrica:		**2013/7/10015/BS N.F. 8245**
Dipartimento Territoriale competente:	**BRESCIA**		Identificativi della richiesta di esame del Riparatore:		**20250522.006305603.PR**
~~N. disegno~~/N. di pratica della proposta di riparazione	**PG-A2A-AMB-0116870-06/05/2025-U**				
Descrizione della attrezzatura:	**GENERATORE DI VAPORE LINEA 1 installato in Via Malta 25/R Brescia**			Categoria PED di rischio	**IV**
N° e data del Protocollo INAIL:	vedi identificativo CIVA	PS x V bar x litri o PS x DN bar:	**87 x 125.300**	Tabella di appartenenza - All. II PED:	**5**

Figura 2. Estratto del benestare alla riparazione rilasciato dalla competente INAIL – UOT.

Verifica di riparazione

VERIFICA DI RIPARAZIONE (D.M. 01/12/2004, n. 329 art. 14)

IDENTIFICATIVO	**20250528.006311444.PR2**		DATA		**29/07/2025**
MATRICOLA	**2013/7/10015/BS**		NUMERO DI FABBRICA		**8245**
TIPO	**GENERATORE DI VAPORE**		RIPARATORE		**A2A Ambiente**
GRUPPO DEL FLUIDO	**2**	TABELLA	**5**	CATEGORIA	**IV**

DITTA UTILIZZATRICE	**A2A Ambiente S.p.A.**
LUOGO DI INSTALLAZIONE	**Brescia via Malta 25/R presso Termoutilizzatore**

Figura 3. Estratto del verbale di verifica di riparazione rilasciato dalla competente INAIL – UOT.

b) Esaminare la documentazione pregressa, verificare i dati tecnici e di funzionamento del generatore di vapore compresi i valori dei parametri dell'acqua di alimento ed esercizio del generatore di vapore, acquisire i certificati di taratura degli accessori di sicurezza e verificare l'abilitazione alla conduzione del conduttore. Il generatore di vapore ha le seguenti caratteristiche:

Costruttore: *ANSALDO CALDAIE S.p.A.*
Anno di costruzione: *novembre 1997 e Riqualificato PED in accordo alla 97/23/CE il 03/04/2012*
Tipo: *"GVR" Generatore di vapore*
Pressione di progetto caldaia: *87 bar*
Produzione di vapore: *150.000 kg/h*
Temperatura di progetto ECO: *304 °C*
Temperatura di progetto CORPO CILINDRICO/EVA/BANCHI: *302 °C*
Temperatura di progetto SH: *380/411/480 °C*
Capacità totale del generatore:
Economizzatore: *56.000 Lt.*
Corpo cilindrico: *19.000 Lt.*
Evaporatore: *56.000 Lt.*
Banchi evaporatore: *16.800 Lt*.
Surriscaldatore: *33.500 Lt.*
Fluido: Acqua
Stato fisico del fluido: *Liquido/Vapore surriscaldato*

Di seguito si riportano gli estremi delle ultime verifiche periodiche effettuate:
- 03/07/2024: Ultima Verifica periodica "prova funzionale"
- 16/05/2024 e 11/06/2024: Ultima Verifica periodica "Visita interna"
Interventi di riparazione e/o sostituzioni banchi dalla messa in servizio del 2017:

- luglio 2017: Sostituzione di n.55 curve del diam. 42,4 mm sp. 5 mm sulla prima fila del banco uscita SH1.
- giugno 2018: Sostituzione completa banco SH2, sostituzione completa cielo caldaia e parete di mezzo, apertura e ripristino della parete laterale sup. 1° passaggio, modifica pareti primo canale per cambio posizione aria secondaria, riporto di Inconel su alcune superfici in camera di combustione.
- ottobre 2021: Sostituzione completa banco SH3, inserimento TIE IN 3" tubazione uscita vapore saturo.
- luglio 2025 sostituzione completa di tutte le serpentine dei surriscaldatori SH 1-2 e SH2.

Altri documenti acquisiti in sede di verifica:

- certificato di abilitazione di primo grado alla conduzione di generatori di vapore con idoneità fisica alla mansione del conduttore ai sensi del d.m. n. 94 del 07/08/2020;
- Dichiarazioni di conformità delle valvole di sicurezza;
- Data sheet delle valvole di sicurezza;
- certificato di controllo e taratura del pressostato di sicurezza ELETTROMATIC;
- certificazione di taratura e calibrazione in corso di validità di tutta la strumentazione utilizzata in sede di verifica da parte delle ditte incaricate per conto dell'utente alle verifiche di taratura;
- Report riguardanti l'analisi dell'acqua sul ciclo ACQUA – VAPORE come da tabella sottostante;

DEGASATORE						
DATA	*pH a 25°*	*Cond. Tot. µS/cm*	*Additivo mg/l*	*O2 disciolto µg/l*		
04-giu-25	9,10	6,50	-	1,0		
Valori rif. A2A	**>9,0 < 9,8**	**< 15**		**< 20**		

ALIMENTO						
DATA	*pH a 25°*	*Cond. Tot. µS/cm*	*Additivo mg/l*	*Silice µg/l SiO2*	*Ferro tot. µg/l*	
04-giu-25	9,12	6,00	0,002	2	< 5,00	
Valori rif. A2A	**>9,0 < 9,8**	**< 15**		**< 20**	**< 25**	

CALDAIA						
DATA	*pH a 25°*	*Cond. Tot. µS/cm*	*Additivo mg/l*	*Silice µg/l SiO2*	*Ferro µg/l tot. - sol.*	*Rame µg/l*
04-giu-25	9,24	7,80	0,022	109	< 5,00 / < 5,00	< 5,00
Valori rif. A2A	**>9,0 < 9,8**	**< 15**		**< 850**	**< 25**	**< 20**

VAPORE SURRISCALDATO						
DATA	*pH a 25°*	*Cond. Tot. µS/cm*	*Silice µg/l SiO2*	*Ferro tot. µg/l*		
04-giu-25	9,00	5,40	4	< 5,00		
Valori rif. A2A	**>9,0 < 9,8**	**< 15**	**< 20**	**< 25**		

CONDENSATO R1-R2						
DATA	*pH a 25°*	*Cond. Tot. µS/cm*	*Additivo mg/l*	*Silice µg/l SiO2*	*Ferro tot. µg/l*	*O2 disciolto µg/l*
04-giu-25	9,10	5,70	0,022	4	< 5,00 / < 5,00	2,0
Valori rif. A2A	**>9,0 < 9,8**	**< 15**		**< 20**	**< 25**	**< 20**

CONDENSATO ARIA						
DATA	*pH a 25°*	*Cond. Tot. µS/cm*	*Additivo mg/l*	*Silice µg/l SiO2*	*Ferro tot. µg/l*	*O2 disciolto µg/l*
04-giu-25	9,09	5,60	0,019	2	< 5,00 / < 5,00	9
Valori rif. A2A	**> 9,0 < 9,8**	**< 15**		**< 20**	**< 25**	**< 20**

Tabella 1. Analisi chimica dell'acqua di processo

c) prove di funzionamento degli accessori di sicurezza.

Durante la verifica sono stati sottoposti a verifica di funzionamento i seguenti accessori di sicurezza:

- N. 2 valvole di sicurezza saldate sul corpo cilindrico con pressione di taratura pari rispettivamente a 87,0 bar e 89,5 bar. La verifica di taratura è stata eseguita in esercizio tramite martinetto idraulico (fig. 3)
- N. 1 Valvola di sicurezza saldata sul surriscaldatore tarata a 78 bar. La verifica di taratura è stata eseguita in esercizio tramite martinetto idraulico (fig. 3).



Figura 4. prova in esercizio di valvola di sicurezza con martinetto idraulico

- Prove funzionali blocchi caldaia

Questa procedura di test è stata elaborata in sinergia con ATS Brescia e INAIL UOT Brescia ed è strutturata secondo la seguente sequenza:

1. Blocco caldaia per bassissimo livello e altissimo livello nel corpo cilindrico

Scopo della prova è testare il corretto funzionamento della logica, implementata sul DCS di impianto, prevista per la salvaguardia della caldaia in caso di bassissimo livello del corpo cilindrico. Tali verifiche sono aggiuntive rispetto alle verifiche interne di caldaia che sono effettuate durante la fermata programmata di manutenzione.

Assetto di impianto necessario per la prova (caldaia rifiuti + bruciatori):

- griglia in moto
- almeno un bruciatore acceso a metano
- ventilatore dell'aria primaria in marcia
- ventilatore dell'a aria secondaria in marcia

Test

Sono presenti tre misure di livello sul corpo cilindrico LT045C/045D/045E acquisiti dal sistema caldaia (B50) che elabora le soglie di bassissimo livello LSLL e altissimo livello LSHH in logica 2 su 3 genera il segnale di blocco.

- Il limite di altissimo livello (LSHH) è fissato a 860 mm
- Il limite di bassissimo livello (LSLL) è fissato a 10 mm

La procedura seguita per la verifica del blocco bassissimo livello corpo cilindrico è la seguente:

	DESCRIZIONE	AZIONE PREVISTA	ESITO
1	Verifica condizioni assetto iniziale: - Caldaia in servizio - Bruciatori a metano accesi - Livello corpo cilindrico normale - Nessun blocco caldaia presente	N/A	OK
2	Modifica della soglia di intervento catena livello corpo cilindrico sulla misura LT045C	Verifica della corretta segnalazione di allarme 1/3	OK
3	Ripristino soglie di intervento	Rientro allarme	OK
4	Modifica della soglia di intervento catena livello corpo cilindrico sulla misura LT045D	Verifica della corretta segnalazione di allarme 1/3	OK
5	Ripristino soglie di intervento	Rientro allarme	OK
6	Modifica della soglia di intervento catena livello corpo cilindrico sulla misura LT045E	Verifica della corretta segnalazione di allarme 1/3	OK
7	Modifica della soglia di intervento catena livello corpo cilindrico sulla misura LT045C	Verifica segnalazioni e allarmi	OK
		Verifica intervento logica di blocco caldaia	OK
		Stop bruciatori	OK
		Chiusura Valvola metano F97F503 e Apertura Sfiato metano F97F507	OK
8	Ripristino soglie di intervento	Rientro blocco	OK

Tabella. 2 – tabella riepilogativa dei blocchi sui livelli

2. Blocco caldaia per altissima temperatura uscita SH

Scopo della prova è testare il corretto funzionamento della logica, implementata sul DCS di impianto, prevista per la salvaguardia della caldaia in caso di altissima temperatura in uscita SH. Tali verifiche sono aggiuntive rispetto alle verifiche interne di caldaia che sono effettuate durante la fermata programmata di manutenzione.

Assetto di impianto necessario per la prova (caldaia rifiuti + bruciatori):
- griglia in moto
- almeno un bruciatore acceso a metano
- ventilatore dell'aria primaria in marcia
- ventilatore dell'aria secondaria in marcia

Test

Sono presenti tre sonde di temperatura PT100 (TT030A, TT030B e TT022) cablati al sistema caldaia (B50) che elabora le 3 soglie di altissimo valore TSHH e in logica 2 su 3 genera il segnale di blocco. La soglia di TSHH è 480 °C.
La verifica del blocco sarà effettuata mediante modifica delle soglie di intervento della temperatura. Quando almeno 2 su 3 canali superano il valore di blocco, il dispositivo di protezione deve intervenire comandando il blocco della caldaia.
La procedura seguita per l'esecuzione della verifica di funzionamento del blocco altissima temperatura SH è la seguente:

	DESCRIZIONE	AZIONE PREVISTA	ESITO
1	Verifica condizioni assetto iniziale: - Caldaia in servizio - Bruciatori a metano accesi - Nessun blocco caldaia presente	N/A	OK
2	Modifica della soglia di intervento della catena 1B50TT030A2	Verifica della corretta segnalazione di allarme 1/3	OK
3	Ripristino soglie di intervento	Rientro allarme	OK
4	Modifica della soglia di intervento della catena 1B50TT030B2	Verifica della corretta segnalazione di allarme 1/3	OK
5	Ripristino soglie di intervento	Rientro allarme	OK
6	Modifica della soglia di intervento della catena 1B50TT022	Verifica della corretta segnalazione di allarme 1/3	OK
7	Modifica della soglia di intervento della catena 1B50TT030A2	Verifica segnalazioni e allarmi	OK
		Verifica intervento logica di blocco caldaia.	OK
		Stop bruciatori	OK
		Chiusura Valvola metano F97F503 e Apertura Sfiato metano F97F507	OK
8	Ripristino soglie di intervento	Rientro blocco	OK

Tabella 3. tabella riepilogativa dei blocchi sulle temperature

3. Verifica blocco bruciatore per segnalazione anomalia rilevatore di fiamma

Scopo della prova è testare il corretto funzionamento della logica prevista per la salvaguardia della caldaia, implementata su ogni bruciatore, in caso di anomalia rilevatore di fiamma.
Tali verifiche sono aggiuntive rispetto alle verifiche interne di caldaia che sono effettuate durante la fermata programmata di manutenzione.
Assetto di impianto necessario per la prova (caldaia rifiuti + bruciatori):
- griglia in moto
- bruciatore acceso a metano
- ventilatore dell'aria primaria in marcia
- ventilatore dell'aria secondaria in marcia

Test
La verifica del blocco sarà effettuata mediante modifica del segnale di anomalia rilevatore di fiamma. Il dispositivo di protezione deve intervenire comandando il blocco del bruciatore.

3. Riepilogo e conclusioni
Tutte le verifiche effettuate hanno dato esito positivo, in particolare tutte le logiche di blocco implementate sul sistema di controllo automatico del generatore di vapore hanno funzionato e i codici di allarme sono stati evidenziati a monitor presso la sala controllo e sui sinottici a schermo dell'impianto (Fig. 5).

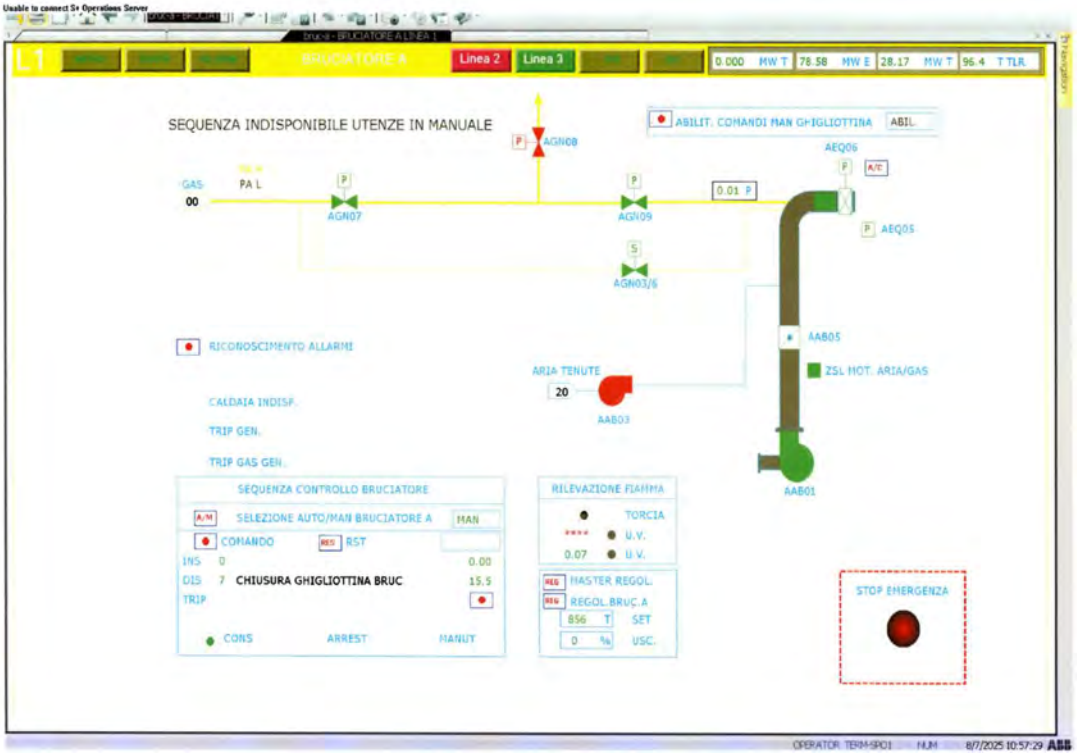


Figura 5. intervento delle sicurezze legate ai bruciatori del generatore di vapore

Il sistema adottato, codificato e descritto in questa memoria, ha il pregio di essere molto flessibile e applicabile in tutte le condizioni di carico del generatore di vapore. Non genera *fermi-impianto* e garantisce la possibilità di provare tutte le sicurezze installate sull'impianto. Il sistema garantisce una registrazione degli eventi di blocco e permette di vedere da remoto l'effettivo intervento dei dispositivi di sicurezza con la stampa di un report dettagliato. La procedura codificata potrà essere resa disponibile ad ogni operatore incaricato della conduzione e ai tecnici che si occupano della modifica dei parametri di intervento in modo che possa essere analizzata, studiata e recepita prima della verifica con l'Ente preposto e immediatamente applicata.

Bibliografia

[1] d.m. 329 del 01/12/2004; d.lgs. n. 81/2008; d.m. 11/04/2011

Esperienze operative di un impianto di generatore di azoto in un pozzo di estrazione

G. Vaccaro[1], I Mollone[1], C. Piccolo[2], E. Milano[3]

[1]Inail - Uot di Potenza
[2]Inail - Uot di Avellino
[3]Comando Provinciale VVF di Potenza

Sommario
Lo studio si propone di presentare una esperienza operativa di un insieme a pressione progettato e realizzato per essere utilizzato in cantieri temporanei per la produzione di azoto estratto direttamente da aria atmosferica, la sua compressione e successiva iniezione all' interno di pozzi di estrazione.
Trattasi di impianti di limitato utilizzo temporale per i quali le criticità gestionali e manutentive sono riscontrabili quasi esclusivamente in fase di esercizio.
La fase di analisi documentale dell'impianto e la completezza delle documentazioni e certificazioni a corredo e la successiva attività di verifica sul campo risultano gli unici momenti autorizzativi e certificativi dello stesso in termini di sicurezza nei confronti degli operatori addetti alla gestione dello stesso.
In particolare si espone di seguito la tipologia di impianto evidenziando che la procedura di denuncia di messa in servizio dell'insieme è stata analizzata dal personale tecnico ed amministrativo dell'Unità Operativa Territoriale di Certificazione Verifica e Ricerca di Potenza nel cui territorio è localizzata mentre l' attività di certificazione sul campo è stata svolta dalla Unità Operativa Territoriale di Certificazione Verifica e Ricerca di Avellino che ha effettuato la prima verifica periodica ai sensi dell' art. 71 del D.Lgs. 81/08 secondo le procedure di cui al DM 11 aprile 2011

1. Introduzione

Alla luce delle nuove esigenze dovute ad una diminuita capacità estrattiva che i campi di estrazione siti nella zona della Basilicata hanno manifestato negli ultimi tempi si è resa necessaria in maniera via via più pressante l'esigenza di un sistema di alimentazione di gas inerte che potesse "allungare la vita" dei giacimenti attraverso l'iniezione in pressione dello stesso gas inerte nel pozzo per facilitare l'estrazione del greggio.
L' alternativa alla soluzione proposta sarebbe quella di "abbandonare" i pozzi di estrazione già utilizzati con tutte le infrastrutture connesse.
La soluzione scelta è quella della realizzazione di un insieme in grado di produrre azoto partendo dall'aria presente in atmosfera per poi inviarlo nei pozzi alla pressione necessaria. Al tal fine, nel caso in esame si è utilizzato un impianto facente capo ad uno schema di processo che vede installato un doppio impianto di

produzione azoto attraverso il convogliamento ad un sistema di compressione ed al successivo invio in pozzo.
L'impianto ha una capacità di produzione di 500 SCFM (800 Nm^3/h).

2. Descrizione del processo

Gli elementi costituenti dell'impianto di produzione e compressione dell'azoto sono:

- **2 unità di compressione aria (ognuno dei quali produce il 50% dell'aria necessaria)**
- **2 unità di trattamento aria (ognuno dei quali produce il 50% dell'azoto necessario)**
- **1 unità di compressione azoto ad alta pressione**

All'interno di ogni skid sono previsti una serie di controlli e sicurezze che garantiscono un funzionamento sicuro e contestualmente corretto dell'insieme, sia in termini di controllo dei parametri operativi (pressione e temperatura), sia in termini di qualità del fluido prodotto (purezza dell'azoto).
Tutte le attività del processo sono state oggetto di verifica di conformità della documentazione presentata e di verifica dell'efficienza e funzionalità sul campo dei dispositivi di sicurezza ad essi connessi

2.1 Compressione aria (settore A)

Il primo step è la produzione dell'aria compressa con un grado di umidità adeguato. L'aria compressa necessaria alla produzione di azoto è prodotta dal contemporaneo funzionamento dei compressori (AC-001A e AC-001B) ognuno in ragione del 50%.
L'aria è prelevata da una zona salubre esterna alla pressione atmosferica, attraversa un primo stadio di filtrazione in dotazione ai compressori, di tipo "oil injected" monostadio. L'olio di lubrificazione viene iniettato durante la fase di compressione dell'aria. L'aria con tracce di olio passa attraverso una valvola di non ritorno, viene raffreddata e successivamente separata dall'olio in un separatore centrifugo protetto da valvola di sicurezza con taratura a 15 bar(g). La componente oleosa viene recuperata e nuovamente iniettata nella macchina, mentre l'aria, compressa a circa 12.5 bar(g) e con una T max di circa +49°C, procede verso l'unità di trattamento dell'aria e di produzione dell'azoto. In condizioni di normale funzionamento, la portata di aria prodotta dalle due unità di compressione è 3132 Nm^3/h.

2.2. Trattamento aria e produzione azoto (settore B)

L'aria in uscita dai compressori raggiunge quattro recipienti di polmonazione (2 per ogni cabinato identificati con V-001A/B e V-002A/B) che alimentano il circuito di produzione azoto. Ogni serbatoio (V 1500 lt; PS 16 barg) è protetto da una valvola di sicurezza tarata a 14 bar(g) ed opera ad una pressione pari a 11,5 bar. L'eventuale condensa presente nell'aria è eliminata grazie a degli scaricatori installati sul fondo di ciascun serbatoio. Inoltre ogni recipiente può essere isolato per mezzo di valvole di intercettazione montate a monte ed a valle degli stessi.

Da detti recipienti l'aria raggiunge il primo stadio di filtrazione composto da due coppie di pre-filtri per ogni cabinato (F-001A/B e F-002A/B), ciascuna coppia si occupa del filtraggio del 50% dell'aria prodotta con un grado di filtrazione ari 0.1 mg/m^3.
I filtri lavorano ad una pressione pari a 11.35 bar(g) e l'aria dopo averli attraversati raggiunge due essiccatori refrigerati (uno per cabinato identificati con D-001A e D-001/B) in grado di abbassare la temperatura di dew-point al di sotto di +5°C.
A valle degli essiccatori sono installati tre differenti stadi di filtrazione: il primo è composto da due coppie di post-filtri (F-003A/B e F-004A/B) aventi grado di filtrazione 0.01 mg/m^3 che operano alla pressione di 11.25 bar(g); Il secondo è costituito da due filtri a colonna a carbone (uno per cabinato, identificati con C- 001A e C-001B) in configurazione 2x50%, che provvedono alla rimozione dell'eventuale olio residuo derivante dalla compressione e che operano alla pressione di 10.95 bar(g). Il terzo stadio di filtrazione è composto da due coppie di post-filtri (due per cabinato e identificati con F-005A e F-006A e F-005B e F-006B con un grado di filtrazione pari a 0.01 µm per la rimozione dell'eventuale polvere trascinata dalle colonne carbone che operano alla pressione di 10.90 bar(g). L'aria secca e filtrata è convogliata in un collettore di distribuzione che alimenta le dieci membrane di separazione azoto per ogni cabinato che operano alla pressione di 10.8 bar(g).
Questi filtri a membrana provvedono a separare l'azoto dagli altri componenti dell'aria. L'azoto ottenuto deve avere una purezza pari al 99%, valore questo che lo rende perfettamente inerte. Per ottenere un simile risultato, l'aria essiccata e filtrata attraversa un fascio di fibre sottili permeabili alle molecole di ossigeno. Così facendo, l'aria arricchita di ossigeno è scaricata in zona sicura all'esterno del container (a pressione atmosferica) attraverso un collettore dedicato, mentre l'azoto separato esce dalle membrane dal lato opposto dell'ingresso. Ad assicurare la purezza dell'azoto richiesta vi è un analizzatore di ossigeno per ogni cabinato installato a valle delle membrane. Tale dispositivo monitora in continuo la qualità dell'azoto e, qualora la purezza non sia quella richiesta (frazione di O_2 superiore all'1%), ne dispone lo scarico automatico in atmosfera (in zona sicura) grazie ad una valvola pilotata (XV-001A/B) e una tubazione dotata di silenziatore.
La portata dell'azoto a specifica, alla pressione di 10.2 bar(g), è regolata in base alla richiesta dell'utenza dalla valvola di controllo FCV-001A/B e quindi inviata all'alimentazione del compressore, qualora necessario.

2.3 Compressione azoto e invio in pozzo (Settore C)

L'azoto a specifica in uscita dai generatori ad una pressione di 10,2 bar attraversa la valvola XV-F01A e successivamente il filtro (F-F01A) che elimina eventuali residui che potrebbero danneggiare il booster. L'azoto filtrato raggiunge un serbatoio di polmonazione (denominato V- 003A con una PS pari a 16 barg), dotato di valvola di sicurezza con taratura a 14 bar(g), che consente una migliore gestione della pressione dell'azoto in ingresso al compressore alternativo.
Il booster è costituito da quattro stadi ognuno dei quali protetto da una PSV (da quella

tarata a 19.2 bar(g) sull'aspirazione a quella a 220 bar sulla mandata), raffreddati ad acqua. Il booster produce complessivamente 800 Nm^3/h di azoto alla pressione operativa di 200 bar(g). L'azoto prodotto viene iniettato in pozzo.

3. Descrizione dell'insieme e caratteristiche tecniche

L'impianto in esame è diviso in tre Settori che contengono i componenti prima menzionati:

- Settore "A" costituito dalle due unità di compressione aria e relative tubazioni di collegamento al Settore "B". Nel Settore A avviene il processo di compressione e primo trattamento dell'aria atmosferica (come da paragrafo 2.1).
- Settore "B" costituito dalla sezione di trattamento aria e produzione azoto (come da paragrafo 2.2);
- il Settore "C" costituito dall'unità di compressione azoto e dalle relative tubazioni di processo (come da paragrafo 2.3). Questo settore è l'interfaccia dell'insieme con le tubazioni di cantiere che immettono l'azoto pressurizzato nel pozzo.

L'insieme è stato progettato per l'installazione in condizioni ambientali specifiche:

- **Paese** Italia **Altitudine** 600 – 1300 mslm
- **T. Amb.** Da -15 °C a +35°C **Area d'installazione** Outdoor (in Container)
- **Classificazione Area** SAFE AREA

Le caratteristiche progettuali sono in funzione dei vari settori considerati (vedi sotto), mentre le condizioni operative sono state riportate nel paragrafo 2, discorso a parte meritano le condizioni di umidità relativa che è mantenuta intorno al 60%.

PS max (bar)	TS (°C)		FLUIDO			V (l)	DN
	Min	Max	Natura	Stato	Gruppo	(somma)	(max)
Atm-15 (Sett. a)	**-15**	**+50**	**Aria -**	**Gas**	**2**	**9507 l**	**80**
Atm-14 (Sett. b)	**+10**	**+50**	**azoto**				
Atm-220 (Sett. C)	**-15**	**+50**					

Portata massima dell'azoto: 500 SCFM (800 Nm^3/h)
Pressione operativa all'uscita delle membrane: 10,8 bar g (Settore B)
Pressione operativa massima uscita polmone azoto: 10,2 bar (Settore C)
Pressione operativa massima azoto compresso: 200 barg (Settore C)

L'azoto viene prodotto grazie ad una serie di filtri a membrana. Nel normale funzionamento, ad una pressione operativa di 10,8 barg e ad una temperatura di 35°C, detti filtri assicurano una purezza dell'azoto pari al 99%, nel caso in cui tale parametro non sia rispettato l'azoto prodotto verrà scartato e scaricato all'esterno attraverso una linea dedicata dotata di silenziatori. La verifica della qualità dell'azoto viene effettuata in continuo da un analizzatore che qualora riscontra parametri non corretti aziona in automatico una valvola che devia l'azoto prodotto verso la linea di scarico.

L'impianto è costituito da vari cabinati che sono di seguito analizzati. Al termine di tale analisi vengono specificate le modalità di mantenimento delle temperature

all'interno di container, aspetto non secondario per la produzione di azoto della qualità desiderata.

NR. 2 CABINATI DI COMPRESSIONE ARIA E PRODUZIONE AZOTO

Un singolo cabinato di 40' è in grado di produrre 250 SCFM di Azoto 99% @ 10 barg.
Ogni cabinato è composto da:

- Nr. 1 package di compressione aria, a vite, oil injected, raffreddato ad aria
- Nr. 2 serbatoi aria umida
- Nr. 2 prefiltri grossolani a coalescenza, grado di filtrazione 0,1 mg/m^3 (
- Nr. 2 prefiltri fini a coalescenza, grado di filtrazione 0,01 mg/m3
- Nr. 1 essiccatore a ciclo frigorifero
- Nr. 1 torre a carboni attivi
- Nr. 2 post-filtri per polvere, grado di filtrazione 0,1 µm
- Nr. 10 moduli membrane

Sono inoltre presenti una pressure control valve ed un sistema di misurazione e controllo

NR. 1 CABINATO COMPRESSIONE AZOTO

Il cabinato di 20' è in grado di comprimere 500 SCFM. Il cabinato è composto da:

- Nr. 1 compressore azoto, alternativo, oil-free, raffreddato ad acqua
- Nr. 1 serbatoio azoto
- Nr. 1 circuito di raffreddamento ad acqua
- Nr. 1 quadro di controllo booster

NR. 1 CABINATO TRASFORMAZIONE

Il cabinato è composto da: 1 Trasformatore 1250kVA 20kV/400V Resina, una UPS; una QGBT; una QSA; una QMT e un Master Control Panel

CABINATI DI COMPRESSIONE ARIA E PRODUZIONE AZOTO

Relativamente ai due cabinati di compressione aria e produzione azoto, di seguito sono riportati i componenti e le loro caratteristiche per ogni singolo cabinato

Nro. 1 COMPRESSORE ARIA

Il modello è offerto nella configurazione oil injected e raffreddato ad aria. Il compressore è singolo stadio, composto da un motore elettrico completo di sistemi di raffreddamento e lubrificazione.

Portata max	1566 Nm3/h	Temp. Ambiente	Max. +35 °C
Pressione di design	15 barg	Pressione operativa	12,5 barg
Temperatura di design	-15/+70 °C	Temperatura uscita	Max. +49 °C
Potenza assorbita	309 kW		

Ogni compressore ha un pannello di controllo locale (Intellisys Control Module) adatto a gestire tutte le operazioni che consentono un regolare funzionamento dell'impianto e l'impostazione dei set point di lavoro, operazione quest'ultima che può essere effettuata anche dal pannello master; che consente anche l'avvio o la fermata dell'unità in modalità automatica nella sequenza d'impianto.

N.ro 2 SERBATOI ARIA UMIDA

In uscita al compressore troviamo due serbatoi di aria umida (2X50%) che hanno

come funzione quella di facilitare la corretta gestione del ciclo carico/vuoto dello stesso compressore. La capacità complessiva di questi serbatoi di polmonazione è di 3000 litri (1500 litri cadauno). Entrambi i serbatoi sono dotati di uno scaricatore meccanico a galleggiante che va ad eliminare la condensa in eccesso e di una PSV (set 14 barg) dimensionata per Fire Case ed idonea per scaricare anche la portata generata dal compressore.

Portata	783 Nm3/h	**PS**	14, bar	**TS**	-15/+70 °C
Temperatura operativa		Max. +49 °C	**Pressione operativa**		11,5 barg

N.ro 2 PRE-FILTRI A COALESCENZA

A valle dei serbatoi di aria umida è presente una coppia di filtri a coalescenza (2x100%), idonei per filtrare particelle caratterizzati da un grado di filtrazione pari a 0,1 mg/m3, forniti di valvole manuali di intercetto che consentono di effettuare le manutenzioni su uno dei due durante il funzionamento dell'altro. Inoltre, in ogni filtro è presente un indicatore di pressione differenziale con allarme (PDIS-001 e PDIS-002). Entrambi i filtri sono dotati di uno scaricatore meccanico a galleggiante che va ad eliminare la condensa in eccesso.

DRYER FRIGORIFERO

Dopo i filtri vi è un essiccatore progettato per ottenere un punto di rugiada a +5°C alla pressione di esercizio e a valle dello stesso è montato un analizzatore di dew point (AT-001) che verifica il contenuto della componente liquida. L'aria compressa satura entra nello scambiatore di calore dell'essiccatore, dove viene preraffreddata dall'aria compressa fredda in uscita dall'essiccatore. Quindi passa all'evaporatore, dove viene ulteriormente raffreddata. L'aria fredda e i liquidi condensati fluiscono verso il separatore de-mister, dove i liquidi vengono separati dal flusso d'aria dal filtro a rete e vengono drenati tramite uno scaricatore di condensa temporizzato.

L'aria compressa secca, ma ancora fredda, esce dall'essiccatore attraverso lo scambiatore di calore aria-aria. Mentre raffredda l'aria in ingresso, l'aria in uscita si riscalda. Sull'essiccatore è presente un pannello di controllo alimentato a 400VAC / 3Ph / 50Hz per gestire tutto il processo di essicazione dell'aria. A bordo dell'essiccatore frigorifero è montato un sistema di controllo con display multifunzionale che fornisce la lettura digitale del punto di rugiada. Questo sistema si interfaccia con MCP tramite Modbus TCP-IP da cui è possibile avviare e fermare l'essiccatore e visualizzare da remoto il valore di dew point ed eventuali allarmi attivi.

POST-FILTRI A COALESCENZA

A valle del dryer è presente un'ulteriore coppia di filtri a coalescenza (2x100%), idonei per filtrare ulteriormente particelle e condensati mediante processo di coalescenza; sono forniti di valvole manuali di intercetto che consentiranno di effettuare manutenzione su uno dei due durante il funzionamento dell'altro. In ogni filtro è presente un indicatore di pressione differenziale con contatto di alto allarme (PDIS-003 e PDIS-004). Entrambi i filtri sono dotati di uno scarico manuale di condensa.

COLONNA A CARBONE

L'aria secca, dopo i filtri, passa attraverso la colonna carbone, progettata per ridurre

la presenza di contaminazione da vapori d'olio. A valle della colonna è predisposto uno stacco per un indicatore presenza olio.

POST-FILTRI

In successione alla colonna carbone è installata una coppia di post filtri (2x100%) in grado di trattenere eventuali particelle solide dovute da trascinamenti dalla colonna a carbone. Entrambi i filtri sono predisposti con valvole manuali di intercetto che consentiranno di effettuare manutenzione su uno dei due durante il funzionamento dell'altro. Ogni filtro è dotato di indicatore di pressione differenziale con contatto di alto allarme. Entrambi i filtri sono dotati di uno scarico manuale di condensa.

STACCO ARIA STRUMENTI

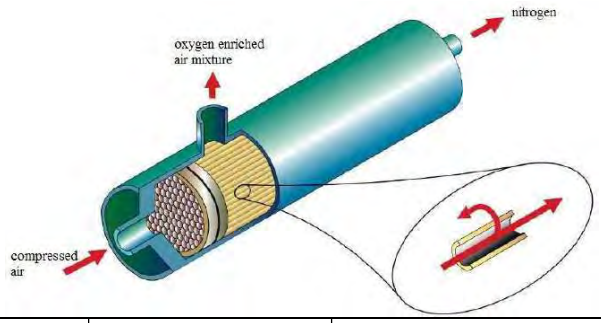
A valle dei filtri è installato uno stacco da ½" per l'aria strumenti necessaria a pilotare le valvole pneumatiche. A valle dello stacco è installato un riduttore di pressione impostato a 6,5 barg.

MODULI MEMBRANE

A valle dei filtri sono presenti 10 moduli a membrana (10x10%) ciascuno dotato di valvole di intercetto manuale. I moduli lavorano secondo un processo di permeazione: le fibre interne, secondo un processo di diffusività e selettività, separano le molecole di ossigeno da quelle di azoto. Come risultato di questa separazione abbiamo:

a) l'azoto alla purezza desiderata inviata all'unità di compressione o in pozzo;
b) l'aria arricchita di ossigeno inviata alla linea di scarico.

Quando l'impianto è acceso, la qualità dell'azoto viene continuamente monitorata da un analizzatore di ossigeno (AT-002) montato a valle delle membrane. Di seguito il tipico schema di un modulo a membrane.



Portata ingresso	1566 Nm^3/h	Portata azoto	400 Nm^3/h
Purezza azoto	99 %	Pressione operativa	10,8 barg
Temperatura operativa	Max. +35 °C	PS / TS	14 barg / 50°C max

REGOLAZIONE TEMPERATURA CABINATO DI PRODUZONE AZOTO

La temperatura del cabinato è fondamentale per una corretta operatività dell'assieme, infatti essa è automaticamente regolata grazie ad un sistema che aziona I due fan (M-001, M-002) e le 8 serrande installate. Le serrande sono d'espulsione e scaricano l'aria calda verso l'esterno e di ricircolo dell'aria calda all'interno del cabinato. L'apertura e la chiusura delle serrande è gestita mediante un trasmettitore

di temperatura (TT-001). Con una temperatura ambientale inferiore a 25 °C le serrande di ricircolo sono aperte e quelle di espulsione sono chiuse; una volta che la temperatura è superiore a 25 °C le serrande di ricircolo vengono chiuse e quelle d'espulsione aperte. Anche i 2 fan si accendono e si spengono in base alla temperatura ambientale. Se TT-001 supera i 30 °C entrambi i fan si accendono; una volta che la temperatura scende sotto i 30 °C, si spengono. Ogni singolo fan è gestito da un selettore a tre posizioni e si può scegliere se andare in automatico, in manuale o spegnerli (Auto, Man, OFF). Infine Internamente al cabinato v i è un analizzatore di ossigeno ambientale (AT-001) il quale va a gestire l'accensione e lo spegnimento dei fan. Quando l'ossigeno scende sotto il 19% viene generato un allarme di avvertimento ed attivato il lampeggiante situato sulla porta di ingresso. Quando l'ossigeno scende sotto il 18%, entrambi i fan si accenderanno. Nel momento in cui l'ossigeno si ristabilizza sopra il 20%, i fan si spegneranno.

CABINATO COMPRESSIONE AZOTO (N2-HP)

Il cabinato di compressione azoto è unico ed ha al suo interno i seguenti componenti

SERBATOI D'AZOTO (V003)

All'ingresso del cabinato booster troviamo un serbatoio d'azoto che ha come funzione quella di facilitare la corretta gestione della pressione dell'azoto, che alimenterà il compressore alternativo. Il serbatoio è dotato di una PSV (set 14 barg) dimensionata per Fire Case ed idonea a scaricare anche la portata generata dal compressore.

Portata	800 Nm3/h	**PS/P es.**	14/10,2 barg	**TS/T es.**	-15;+70/ Max. +35 °C

COMPRESSORE AZOTO (BC-001)

Il compressore fornito è in grado di comprimere l'azoto al @99% da 10 bar a 200 bar a 500 SCFM. Il modello FORNOVOGAS 4DA300 da 160 kW è a 4 stadi di compressione. L'azoto entra nel compressore attraverso il serbatoio di accumulo di ingresso ed ha le seguenti caratterisiche prestazionali.

Portata:	800 Nm3/h
Pressione di design / Pressione esercizio max:	220 / 200 barg
Purezza azoto:	99%

CABINATO ELETTRICO

L'insieme è alimentato attraverso un cabinato elettrico, dove sono installate le apparecchiature elettriche per la gestione dell'impianto e la distribuzione dell'energia a tutti macchinari presenti. Oltre al quadro principale e quello ausiliario all'interno dello stesso sono installati:

- **UNA CENTRALE RILEVAMENTO FUMI (ANT1)**

Tale apparecchio è in grado di acquisire i segnali dai vari sensori/ pulsanti installati nei container e generare un allarme che, acquisito da MCP attiva i segnalatori ottico/acustici installati nei vari container e attiva le sequenze di disalimentazione elettrica dei container.

- **UN MASTER CONTROL PANEL (MCP-001)**

LMCP gestisce i compressori, l'essiccatore refrigerato, l'impianto di ricompressione. All'interno del MCP è presente un PLC. Il MCP è provvisto di un pannello HMI locale montato sul quadro nel cabinato elettrico ed è connesso allo SCADA remoto da cui è possibile monitorare e gestire l'intero impianto. In aggiunta per la gestione e il monitoraggio è prevista la connessione ad un sistema SCADA che permette l'acquisizione e registrazione dei principali dati d'impianto.

- **UN CONTROLLO COMPRESSORI (AC-001 A/B)**

I compressori sono controllati da MCP mediante una comunicazione ModBus TCP/IP. Tramite questa connessione vengono monitorati tutti i parametri del compressore.

- **UN CONTROLLO DRYER FRIGORIFERO (D-001 A/B)**

Il Dryer è controllato da MCP mediante una comunicazione ModBus TCP/IP. Tramite Modbus vengono monitorare tutti i parametri del dryer.

- **UN CONTROLLO COMPRESSORE AZOTO (BC-001)**

I compressori azoto sono controllati da MCP mediante una comunicazione ModBus TCP/IP. Tramite Modbus vengono monitorare tutti i parametri del compressore in esame.

VALVOLA DI CONTROLLO-CURVA CARATTERISTICA PROPORZIONALE FCV-001 A/B

Sulla linea di produzione è presente una valvola proporzionale di controllo (FCV-001). La gestione di questa valvola avviene mediante il flussometro (FT-001), il quale legge il flusso di uscita. Il comando della valvola è conseguenza ad una logica PID all'interno del MCP, la quale aprirà o chiuderà la valvola per limitare il flusso in uscita massimo di 400Nm3 / h alla pressione operativa.

4. Dispositivi di sicurezza

L'insieme è dotato di più valvole di sicurezza di diversa taratura e capacità di scarico in accordo con le caratteristiche dei componenti che devono proteggere.

Il rispetto dei parametri di design è garantito dai dispositivi di sicurezza per ogni singolo settore:

- Settore A: presente nr.1 valvola di sicurezza tarata a 15 bar(g).sul serbatoio di separazione aria-olio, in uscita dallo stadio di compressione.
- Settore B: presenti nr.2 valvole di sicurezza tarate 14 bar(g)., una su ogni polmone aria.
- Settore C: presente nr.1 valvola di sicurezza tarata 14 bar(g). a protezione del polmone azoto a monte del compressore alternativo. E' installata altresì una valvola di sicurezza tarata a 19.2 bar(g) a protezione dell'aspirazione dell'unità di compressione. Per ogni fase di compressione è installata nr.1 valvola di sicurezza (nr.1 a protezione di ogni stadio). Le valvole di sicurezza sono tarate rispettivamente in modo da intervenire alla pressione di 35 bar(g) (a valle del I stadio), 80 bar(g) (a valle del II stadio), 150 bar(g) (a valle del III stadio) e 220 bar(g) (a valle del IV stadio). Un'altra valvola di sicurezza tarata a 220 bar(g) è installata sul circuito di compensazione. Il circuito dell'acqua di raffreddamento di ciascuna

unità di compressione azoto è protetto da nr.2 valvole di sicurezza. Le valvole di sicurezza sono tarate in modo da intervenire alla pressione di 8 bar(g).

Unità di compressione aria e tubazione fino all'unità di produzione azoto:

Pericoli derivanti da**:**

Blocked outlet: l'unità ha una PS pari a 15 barg ed è protetta dalle sovrappressioni dalla PSV installata all'interno dell'unità stessa (set 15 barg). LA PSV smaltisce una portata pari a 3921 Nm3/h ed è sufficiente a smaltire la massima portata erogabile dall'unità di compressione pari a 1566 Nm3/h. La tubazione installata ha una PS minima pari a 15 barg; pertanto, è da ritenersi protetta dalle sovrappressioni dai dispositivi che proteggono l'unità di compressione

External fire: l'attrezzatura dopo analisi risulta adeguatamente protetta dai dispositivi presenti.

Unità di generazione azoto e tubazione fino all'unità di compressione azoto

Pericoli derivanti da:

Blocked outlet: la PSV installata sui recipienti di polmonazione ha una pressione di taratura (14 barg) inferiore alla PS dei componenti che deve proteggere e una portata max smaltibile pari a 2802.78 Nm3/h che è superiore a quella massima prodotta dall'unità di compressione aria che è pari a 1566 Nm3/h. La tubazione installata ha una PS pari almeno a 14 barg ed è da ritenersi protetta dalle sovrappressioni dai dispositivi che proteggono l'unità di trattamento aria e produzione azoto PSA

Unità di compressione azoto

Pericoli derivanti da:

Blocked outlet: l'unità di compressione azoto ha all'ingresso un polmone con PS pari a 14 barg. L'unità pertanto è da ritenersi protetta dalla PSV installata all'ingresso dell'unità stessa in quanto tale PSV riesce a smaltire una portata pari 2849.17 Nm3/h (par. 5). Il booster è protetto da una PSV per ogni stadio di compressione, PSV idonee a smaltirei quantitativi previsti.

External fire: l'attrezzatura, considerata la certificazione PED e i manuali a corredo, risulta adeguatamente protetta

Alla luce di quanto sopra riportato ne consegue che tutti i settori risultano adeguatamente protetti da anomalie di esercizio e di incendio in considerazione delle pressioni, temperature e portate attese e prevedibili. L'analisi dell'intero impianto ha inoltre preso in considerazione i singoli componenti dell'insieme e le loro interazioni.

5. Conclusioni

L' esperienza sul campo nell' utilizzo dell'insieme descritto ha consentito di verificare la sua efficienza e funzionalità nel rispetto delle condizioni di sicurezza dello stesso.

Le verifiche effettuate dei tecnici dell'INAIL su più impianti della medesima tipologia in sede di prima verifica periodica non hanno riscontrato condizioni di criticità.

Al momento l'esercizio dell'insieme non ha riscontrato criticità operative tenuto conto

che lo stesso è oggetto di attività di manutenzione e di specifiche verifiche per il mantenimento delle condizioni di sicurezza previste in fase progettuale.
Avendo gli impianti avendo un limitato tempo di utilizzo in relazione alle necessità operative connesse alla loro funzione non è possibile al momento determinare criticità operativa connesse al loro utilizzo nel tempo.
Non esistendo studi di settori e riferimenti bibliografici in merito ad impianti analoghi, i risultati potranno essere disponibili sono nel tempo in relazione al rapporto tra costi di esercizio dell'impianto e risultati attesi i termini economici.
Tali esiti al momento della redazione del presente studio non sono disponibili.

Si ringrazia per la collaborazione E. D'Agostino, S. Sini-- NRG Med s.r.l.

Bibliografia

[1] Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro (G.U. n. 101 del 30 aprile 2008)
[2] Decreto Ministero delle attività produttive 1° dicembre 2004, n. 329. Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93. (GU Serie Generale n.22 del 28 gennaio 2005 - Suppl. Ordinario n. 10)

Ciclo di cattura della CO_2 da post-combustione in un impianto a ciclo combinato a gas naturale

A. Romanelli[1], A. Serra[2]

[1]Inail – UOT di Bergamo
[2]ATS Brescia

Sommario
La memoria descrive le tecnologie in fase di studio negli Stati Uniti, relative alla cattura della CO_2 proveniente dalle centrali turbogas con successivo generatore di vapore a recupero (figura 1). La memoria è stata pensata come informazione sulle tecnologie disponibili e evidenzia che la cattura della CO_2 può essere resa flessibile e modulabile, in modo da adattarsi a centrali a gas naturale soggette a cicli di carico variabili e intermittenti (tipici di un sistema elettrico con molte rinnovabili). Ciò significa sviluppare sistemi di CCS (Carbon Capture and Storage) capaci di inseguire il carico senza compromettere eccessivamente l'efficienza, e di disaccoppiare in parte il processo di cattura dai vincoli della produzione di potenza, ad esempio immagazzinando energia o solventi per usare la cattura in modo flessibile. Il lavoro esposto prende spunto dal programma che ha coinvolto negli Stati Uniti una varietà di partner industriali e accademici.

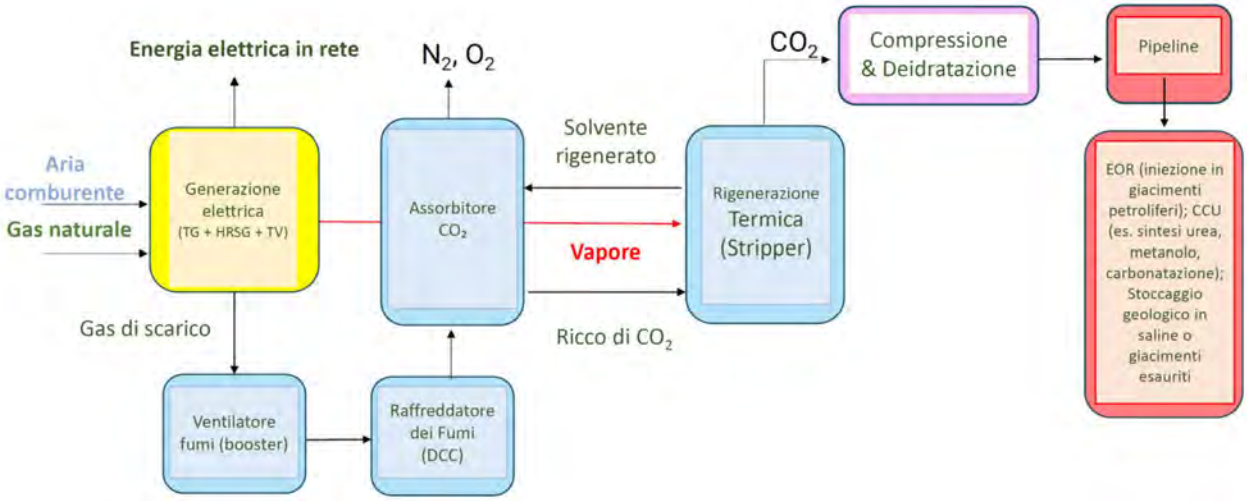


Figura. 1. – schema a blocchi dell'impianto oggetto di studio

1. Tecnologie per la Cattura della CO_2

Le principali tecnologie di cattura CO_2 (FLECCS - Flexible Carbon Capture and Storage) investigate riguardano i sorbenti modulari, membrane attive, DAC (Direct Air Capture), sistemi a solvente, nonché soluzioni di accumulo termico e di accumulo di O_2. Di seguito una descrizione di ciascuna:

Sorbenti modulari (sistemi a sorbente solido) – Si tratta di processi che impiegano materiali solidi (detti sorbenti) capaci di adsorbire la CO_2 dai fumi a basse temperature, per poi rilasciarla quando il sorbente viene riscaldato (rigenerazione). L'idea "*modulare*" indica che l'impianto è suddiviso in unità più piccole o in flussi facilmente modulabili, così da poter adattare rapidamente la capacità di cattura al variare del carico. Un esempio sviluppato è la cattura a sorbente solido iniettato: in questo schema si inietta una polvere sorbente direttamente nel flusso dei fumi della turbina a gas; il solido caricato di CO_2 viene quindi separato e inviato a un rigeneratore dove viene riscaldato (usando vapore saturo) per rilasciare la CO_2 concentrata, dopodiché il sorbente rigenerato viene riutilizzato. Sono previsti anche serbatoi di accumulo per il sorbente (carico e rigenerato) che fungono da buffer, consentendo di gestire in modo flessibile discontinuità nel flusso di CO_2. Un altro approccio modulare è l'uso di fibre cave rivestite di sorbente: ad esempio, sono stati sviluppati moduli DAC costituiti da fasci di ~1000 fibre cavo-sorbenti assemblate in pannelli contattori, in modo da aumentare la superficie di scambio e scalare il processo in maniera graduale. Questi sistemi a sorbente solido mirano a ridurre l'energia di rigenerazione (grazie a nuovi materiali a basso calore di reazione) e a operare a temperatura più bassa rispetto ai solventi liquidi tradizionali. Attualmente, tali tecnologie sono in fase di sviluppo sperimentale: i progetti FLECCS hanno realizzato prototipi di laboratorio (ad esempio unità di adsorbimento a letto rotante di piccola scala e fibre cave modulari) e mirano a dimostrazioni pilota di impianto, per verificare la capacità di catturare fino al 90% della CO_2 emessa da impianti esistenti. Il concetto modulare consente di accendere/spegnere o dosare il sorbente in base alle esigenze, fornendo flessibilità operativa.

Membrane attive per CO_2 – Questa tecnologia utilizza membrane avanzate in grado di selezionare e "*pompare*" attivamente la CO_2 da una corrente gassosa a bassa concentrazione verso un flusso concentrato, superando i limiti delle membrane passive. Il principio di funzionamento prevede una membrana composita costituita da un supporto ceramico poroso ricoperto da un elettrolita fuso selettivo per CO_2. Applicando una differenza di condizioni attraverso la membrana (ad es. un gradiente di pressione parziale o un potenziale chimico), la CO_2 viene trasportata dal lato dei fumi (bassa concentrazione) all'interno della membrana (alta concentrazione). In sostanza la membrana funziona come un "*compressore chimico*" di CO_2: cattura le molecole di anidride carbonica dai fumi diluiti e le rilascia concentrate dall'altro lato. Questo consente di ottenere un flusso di CO_2 quasi pura senza dover assorbire in liquidi o rigenerare sorbenti solidi.

Una sfida per queste membrane è mantenerne le prestazioni ad alta temperatura nei gas di scarico; a tal fine Nooter sta studiando l'integrazione nel recuperatore di calore della turbina a gas (HRSG) per fornire il calore necessario al funzionamento della membrana e ottimizzare l'impianto. Lo stato di sviluppo è pre-commerciale: sono in corso test su materiali (elettroliti e supporti) e moduli membrana di piccola scala in laboratorio, con l'obiettivo futuro di un pilotaggio su flussi reali di gas di scarico.

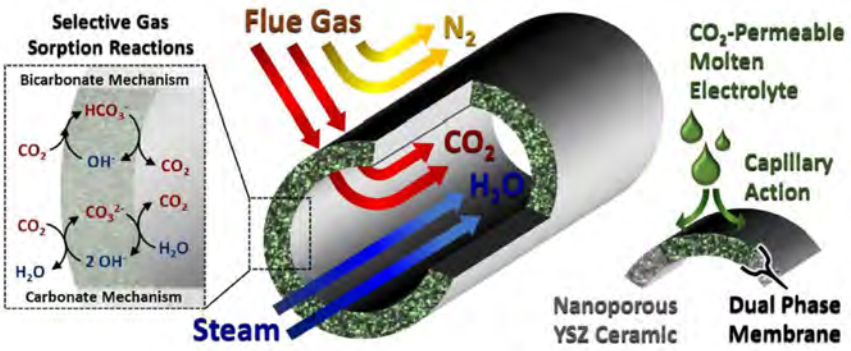


Figura 2 - membrana composita costituita da un supporto ceramico poroso ricoperto da un elettrolita fuso selettivo per CO_2

DAC (Direct Air Capture) – La cattura diretta dall'aria comporta l'estrazione di CO_2 dall'atmosfera, dove la concentrazione è molto bassa (~0,04%). Il DAC viene considerato come componente integrativo ai sistemi di cattura di un impianto a gas. Ad esempio è stata proposta una centrale NGCC accoppiata sia a un impianto di cattura sui fumi (post-combustion, es. ammine) sia a moduli DAC flessibili. L'idea è che il DAC possa entrare in funzione quando la centrale è sotto carico o spenta, catturando CO_2 aggiuntiva dall'aria ambiente per massimizzare la riduzione di emissioni o accumulare crediti di CO_2, oppure per compensare eventuali cali di efficienza del *capture* sui fumi durante transitori. La tecnologia DAC presentata impiega sorbenti solidi su supporti innovativi (fibre cave) simili a quelli descritti prima, ma con configurazione adatta all'aria (che ha meno CO_2 dei fumi) e con la possibilità di modulare capacità e consumo energetico in modo flessibile. In pratica, quando c'è disponibilità di energia a basso costo (ad esempio eccesso di rinnovabili) o la centrale è al minimo, i moduli DAC possono essere alimentati per catturare CO_2; viceversa, in ore di punta i moduli DAC possono ridurre l'attività per non consumare energia preziosa. Attualmente il DAC è una tecnologia allo stadio pilota/dimostrativo a livello globale: nell'ambito di FLECCS si stanno fabbricando prototipi di moduli DAC (pannelli di fibre adsorbenti) per testare il processo su piccole portate. La sfida rimane l'elevato fabbisogno energetico della cattura dall'aria, ma l'integrazione intelligente con l'impianto NGCC potrebbe migliorarne la sostenibilità economica, sfruttando momenti di bassa richiesta di energia elettrica dalla rete.

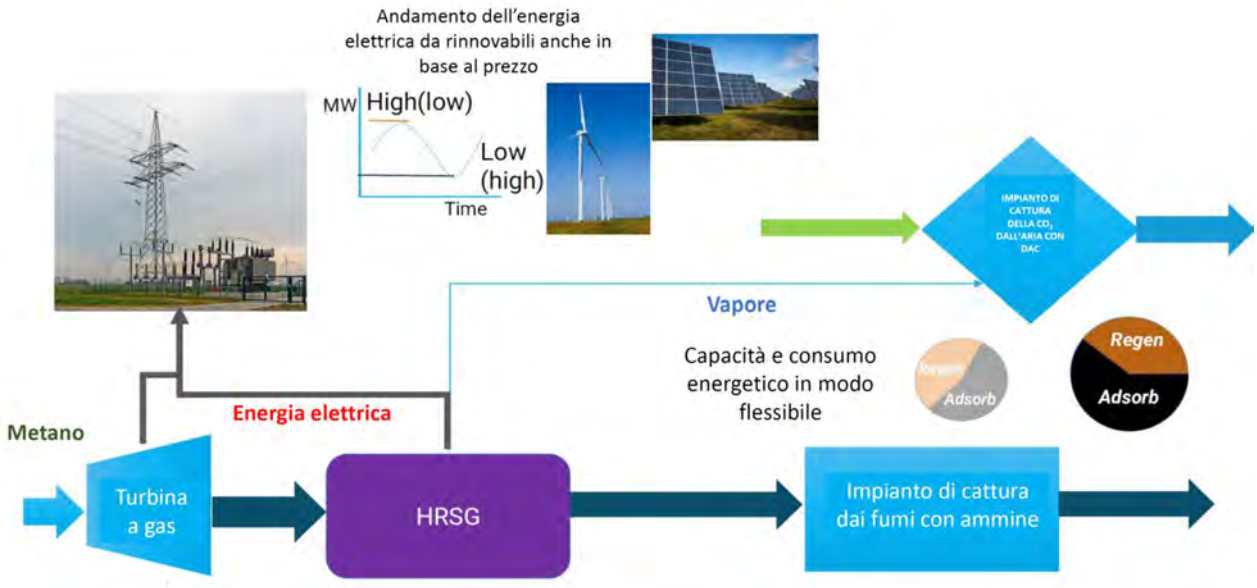


Figura. 3 – schema impianto con DAC

Sistemi di solventi per assorbimento – I solventi liquidi (tipicamente soluzioni amminiche come MEA o carbonati) sono la tecnologia tradizionale per la cattura post-combustione della CO_2: i fumi vengono fatti gorgogliare in una colonna di assorbimento dove il solvente chimicamente lega la CO_2; il solvente arricchito (carico di CO_2) viene poi inviato a un rigeneratore (stripper) dove, scaldandolo con vapore, rilascia la CO_2 pura e torna ad essere riutilizzato (solvente rigenerato). Esistono degli studi su un solvente alternativo a base di carbonato di potassio (K_2CO_3). Il carbonato caldo è un assorbente chimico della CO_2 che opera a temperature più elevate delle ammine e potrebbe integrarsi con il ciclo termico in modo diverso. I sistemi a solvente possono essere resi più flessibili con degli *solvent storage* (accumulo di solvente): questa tecnica prevede di far assorbire CO_2 al solvente continuamente, ma di demandare la rigenerazione ad un momento più opportuno, ad esempio accumulando temporaneamente il solvente ricco di CO_2 in un serbatoio. In tal modo, la rigenerazione (che richiede vapore e quindi riduce la potenza disponibile) può essere effettuata quando la richiesta di elettricità è più bassa o la centrale è in stand-by, migliorando la flessibilità. Studi indicano che lo spostamento della rigenerazione fuori dai picchi permette di sfruttare prezzi dell'energia più bassi e di evitare bruschi prelievi di vapore dal ciclo principale. Tuttavia, il beneficio economico della sola strategia di *solvent storage* risulta modesto (aumento della capacità utilizzabile della centrale dell'ordine del 0–10% con CCS) a fronte di costi capitali aggiuntivi (serbatoi, scambiatori). Nel programma FLECCS, i sistemi a solvente sono arrivati alla fase di progettazione avanzata e test pilota: in particolare è stato sviluppato un impianto pilota per validare il ciclo al carbonato potassico caldo, mentre altri team hanno valutato miscele solventi ottimizzate per reagire più velocemente e resistere a cicli termici. I solventi restano una tecnologia relativamente matura, ma necessitano di adattamenti per l'operazione flessibile.

Accumulo termico (Thermal Storage) – Per rendere flessibile un sistema di cattura CO_2 è cruciale gestire l'energia termica necessaria per il processo. L'accumulo termico consiste nello stoccare energia sotto forma di calore (ad esempio in sali fusi, oli termici o materiali a cambiamento di fase) durante i periodi in cui c'è surplus energetico o la centrale opera a basso carico, per poi riutilizzare quel calore per rigenerare il solvente/sorbente quando serve catturare CO_2 ad alti carichi senza sottrarre vapore al ciclo. Un possibile schema è riscaldare un mezzo di accumulo (ad es. sali fusi) usando vapore o resistenze elettriche quando la domanda di rete è bassa, immagazzinando così energia termica; successivamente, durante i picchi di carico della centrale, quell'energia viene rilasciata per alimentare il rigeneratore del solvente al posto del vapore di turbina, evitando di penalizzare la produzione di elettricità. Questa soluzione funge da "cuscinetto" energetico e contribuisce a disaccoppiare parzialmente il processo di cattura dalla produzione di potenza. Lo stato di sviluppo è iniziale: sebbene i sistemi di accumulo termico (come i serbatoi di sali fusi) siano già usati in altri contesti (es. solare termodinamico), la loro applicazione integrata alla cattura CO_2 è oggetto di studi concettuali e simulazioni. Uno dei risultati attesi è capire se i benefici operativi compensano i costi aggiuntivi e la complessità impiantistica di un accumulo termico dedicato al CCS.

Accumulo di O_2 (ciclo Allam) – *L'Allam cycle* è un innovativo ciclo termodinamico per la generazione di potenza basato sulla combustione di gas naturale con ossigeno puro in un ambiente ad alta pressione di CO_2 supercritica, che produce direttamente CO_2 concentrata (facile da sequestrare) invece di fumi diluiti. Il ciclo Allam promette efficienze elevate con cattura integrata, ma richiede un approvvigionamento costante di O_2 puro tramite impianto criogenico (ASU). La produzione di ossigeno è energivora e poco flessibile nei cambi di regime del turbogas. Nel contesto FLECCS, si è considerato lo stoccaggio di ossigeno come mezzo per dare flessibilità a un impianto *Allam cycle*: l'idea è di produrre e liquefare O_2 in eccesso durante le fasi stazionarie o di basso carico, accumulando O_2 liquido in serbatoi criogenici, e poi utilizzarlo per alimentare la turbina Allam durante i picchi di domanda senza dover accelerare istantaneamente l'ASU. In questo modo, l'impianto può aumentare rapidamente la potenza erogata attingendo dall'ossigeno immagazzinato. Inoltre, l'accumulo di O_2 può fungere da riserva per avvii rapidi del ciclo (che altrimenti sarebbero limitati dal tempo di avvio dell'ASU). Questa tecnologia è ancora in fase concettuale: attualmente è studiata come scenario di modellazione (nessun pilota diretto, dato che il ciclo Allam stesso è in fase dimostrativa). Gli aspetti indagati includono la capacità ottimale dei serbatoi di O_2, le perdite di evaporazione, e i costi vs. benefici in termini di capacità di carico flessibile. L'accumulo di ossigeno rappresenta dunque una soluzione sistemica per abilitare l'uso di cicli *oxy-fuel* flessibili, complementare alle tecnologie di cattura post-combustione discusse sopra.

2. Sfide operative e sistemiche

Integrare un sistema di cattura della CO_2 in una centrale a ciclo combinato a gas naturale (NGCC) comporta numerose sfide operative e di sistema. Gli studi in corso a livello globale evidenziano in particolare le criticità dovute alla natura intermittente e modulante dell'esercizio delle centrali moderne, che mal si adatta ai processi di cattura tradizionali progettati per regime stazionario. Di seguito elenchiamo le principali sfide riscontrate, insieme al loro impatto:

Variabilità del carico e dinamiche di risposta – Le centrali NGCC odierne, in risposta alla crescente quota di rinnovabili, sono chiamate ad avviarsi e fermarsi molto più frequentemente che in passato: ad esempio, negli USA si è passati in media da ~39 avviamenti/anno nel 2019 a una proiezione di ~70-150 avviamenti/anno nel 2025. Inoltre, una NGCC può modulare dal 20% al 100% della potenza in pochi minuti, con *ramp-rate* dell'ordine del 10-15% al minuto per la turbina a gas. Questa rapidità di variazione del carico mette in crisi i sistemi di cattura, i cui componenti chiave (assorbitori ad ammina, rigeneratori, compressori di CO_2, ecc.) hanno costanti di tempo molto più lunghe. Ad esempio, una grande unità di assorbimento ad ammine può richiedere molte ore per passare dallo stato freddo a regime operativo, e i tassi massimi di incremento di portata catturata possono essere dell'ordine dei pochi % al minuto – quindi significativamente più lenti della variazione di emissioni della turbina. Questo disallineamento dinamico significa che durante aumenti rapidi di carico, la CO_2 emessa potrebbe non essere catturata completamente (il sistema di cattura "rimane indietro"), portando a potenziali sforamenti temporanei degli obiettivi di cattura o a CO_2 "*fuori specifica*" in transitorio. Viceversa, durante discese di carico o spegnimenti, il sistema di cattura deve gestire la CO_2 già assorbita nei solventi/sorbenti e magari purificare le apparecchiature (spurgo) per prevenire corrosioni o emissioni al riavvio. Mantenere la purezza della CO_2 catturata durante questi transitori è complesso – ad esempio può entrare ossigeno nel flusso di CO_2 catturata durante avviamenti e arresti, contaminandola. Tutto ciò richiede strategie di controllo avanzate e possibili sistemi ausiliari (buffer, bypass parziali, storage di solvente) per colmare il gap di risposta. In sintesi, il mismatch nelle dinamiche di impianto tra sezione di potenza e sezione di cattura è una delle sfide maggiori.

Gestione dei fumi e perdite di pressione – Il sistema di cattura viene installato lungo il percorso dei fumi di scarico della turbina a gas, che in uscita presentano tipicamente una temperatura di circa 100 °C, una concentrazione di CO_2 del 4–5%, circa il 15% di H_2O, con la restante parte costituita da aria esausta.

Una prima criticità riguarda la temperatura: solventi e sorbenti operano in modo più efficace a valori inferiori (circa 40–60 °C). È quindi necessario inserire uno scambiatore per raffreddare i fumi prima dell'assorbitore, con conseguente condensazione di parte del vapore acqueo. Questa operazione però riduce la spinta di galleggiamento dei fumi, poiché diventano più densi, e può rendere necessario l'impiego di ventilatori di tiraggio per garantire l'espulsione dei gas trattati attraverso il camino.

Un'ulteriore difficoltà è legata alla perdita di carico introdotta dal passaggio attraverso assorbitore, filtri e condotti: la maggiore contropressione si ripercuote sul lato turbina, con una leggera riduzione dell'efficienza complessiva e la necessità di ventilatori o sistemi di regolazione (*dampers*) per mantenere un corretto flusso dei gas. La progettazione deve assicurare che la contropressione totale rimanga contenuta entro pochi decimi di millibar, per non compromettere il funzionamento della turbina e della caldaia a recupero.
Negli impianti esistenti, inoltre, lo spazio disponibile per integrare scambiatori, ventilatori e condotti aggiuntivi può risultare limitato. Infine, il raffreddamento dei fumi può generare condense acide (in presenza di SO_x o NO_x), che richiedono materiali resistenti alla corrosione o sistemi di neutralizzazione, aggiungendo ulteriori complessità operative.
Impatto sulle prestazioni e efficienza – L'aggiunta del CCS comporta inevitabilmente una penalizzazione delle prestazioni globali dell'impianto. Oltre al già menzionato *derating* dovuto all'uso di vapore (che può costare tipicamente il 5–10% della potenza generata, a seconda dell'efficienza del capture), vi sono consumi ausiliari significativi: ad esempio, i compressori di CO_2 per comprimere la CO_2 catturata a pressione di trasporto (100+ bar) assorbono potenza, così come le pompe dei solventi, i ventilatori supplementari e le eventuali unità di raffreddamento. Nel complesso, l'efficienza netta dell'impianto scende. Un impianto NGCC senza CCS ha un'efficienza attorno al 55-60%; con CCS tradizionale può scendere al ~50% o meno, a seconda di quanto è ottimizzato il processo. Nella modalità operativa flessibile, c'è inoltre da considerare la perdita di efficienza dovuta ai transitori frequenti: spegnimenti e riavvii comportano cicli termici che stressano i componenti e portano ad *energy penalty* aggiuntivi (p. es. per ripristinare la temperatura del solvente dopo un fermo, o per mantenere caldi i sorbenti – a meno di utilizzare *purge gas* o *riscaldamento elettrico* durante gli standby). Vi è anche la questione del *part-load*: le turbine a gas sono meno efficienti a carico parziale, il che significa che se l'impianto viene fatto marciare a metà carico per poter deviare energia al capture, si brucerà più gas per MWh prodotto. Gli studi suggeriscono che potrebbe rendersi necessario talvolta far operare l'impianto in perdita per massimizzare la cattura/entrate da crediti in determinati momenti, segnalando la complessità nell'ottimizzare congiuntamente produzione e cattura.
Problemi di spazio fisico – Un impianto di cattura CO_2 su scala completa è un'infrastruttura di notevoli dimensioni. Si stima che l'area occupata da un sistema CCS possa essere pari o superiore a quella della centrale NGCC stessa. Ad esempio, per una centrale da 500 MW, un classico impianto ammine (90% cattura) richiederebbe uno o più assorbitori alti decine di metri e larghi svariati metri, grandi serbatoi di solvente, una *colonna di stripping* con relativo *reboiler*, compressori multi-stadio con refrigeratori intercooler, unità di trattamento condense, ecc., oltre a nuovi edifici di controllo. Inserire tutto ciò in impianti esistenti è spesso proibitivo senza ampi lavori civili: può mancare lo spazio vicino ai camini per collocare l'assorbitore, o vicino alla turbina a vapore per le attrezzature di rigenerazione. Anche in nuove

installazioni, dover raddoppiare l'area occupata aumenta i costi del terreno e limita la collocazione (soprattutto se la centrale è presso aree industriali dense). Nel programma FLECCS si è riconosciuto questo limite e infatti alcune tecnologie proposte (come gli assorbitori compatti a letto rotante o le membrane modulari) mirano proprio a ridurre gli ingombri rispetto alle soluzioni convenzionali. Tuttavia, la sfida spaziale rimane: in assenza di innovazioni drastiche, prevedere retrofit CCS per molte centrali esistenti potrebbe richiedere creatività ingegneristica (ad es. costruire in verticale, usare strutture preesistenti come torri di raffreddamento dismesse, ecc.) e costi aggiuntivi significativi.

3. Pipeline della CO_2

Una volta catturata e compressa, la CO_2 deve essere trasportata verso siti di sequestro geologico, impiego industriale o EOR (recupero assistito di petrolio). A tal fine si utilizzano condotte dedicate (pipeline di CO_2), generalmente in fase supercritica per ottimizzare la densità del fluido. Gli studi sottolineano diverse problematiche relative alle pipeline di CO_2, specialmente nel contesto di flussi provenienti da impianti power-CCS flessibili:

Composizione e impurità del fluido – Le attuali specifiche delle pipeline di CO_2 (spesso sviluppate per progetti di Enhanced Oil Recovery o hub di stoccaggio) tipicamente richiedono CO_2 ad elevata purezza, con concentrazioni minime di altre sostanze e praticamente assenza di ossigeno. Questo perché finora la CO_2 trasportata proveniva soprattutto da sorgenti industriali "*pulite*" (es. impianti di gas naturale, impianti di fertilizzanti, processi industriali) o da giacimenti naturali di CO_2, che non contengono O_2. Nel caso di CO_2 derivante da fumi di combustibili fossili, invece, nel flusso catturato sarà presente dell'ossigeno residuo (dall'aria in eccesso usata in caldaia) e possono essere presenti altre impurità in tracce: ad esempio SO_2/SO_3, NO_2, NH_3, HCl derivanti dai contaminanti del combustibile o dal solvente. Questi componenti, se non rimossi a monte, complicano la gestione della pipeline: molti possono reagire con l'acqua formando acidi (H_2SO_3, HNO_3, HCl) corrosivi, oppure possono non essere accettati dalle specifiche del sito di stoccaggio. La presenza di O_2 è particolarmente problematica perché può favorire la corrosione e perché altererebbe la chimica in siti di EOR (dove si vuole CO_2 quasi pura). Diventa quindi necessario prevedere unità di "*polishing*" della CO_2 dopo la cattura – ad esempio sistemi di deossigenazione catalitica, filtri per acidi e deumidificatori profondi – aumentando costi e complessità. Un altro punto critico è l'incertezza sul comportamento termodinamico delle miscele CO_2-impurità: ad esempio, anche tracce di acqua possono portare a formazione di fasi liquide o solide impreviste all'interno della CO_2 supercritica. In particolare, non è ancora ben definito il diagramma di fase dell'acqua in CO_2 supercritica: potrebbe verificarsi condensa di acqua (o formazione di ghiaccio/semi-idrati) in punti freddi della condotta. Questa acqua liquida, unita ad altri contaminanti (SOx, NOx, O_2), può dar luogo a acidi corrosivi che attaccano le pareti interne dell'acciaio causando corrosione puntuale (pitting). Dunque, garantire una composizione della CO_2 entro

specifica durante tutti i regimi operativi (inclusi i transitori di cattura) è fondamentale per l'integrità a lungo termine della pipeline.

Variabilità di portata e regime di flusso – Le pipeline di CO_2 finora sono state esercite prevalentemente a flusso costante ("*rateable*"), definito da contratto. Ad esempio, una centrale di fertilizzanti che cattura CO_2 immette in condotta un flusso abbastanza stabile giorno e notte. Le centrali elettriche, invece, immetterebbero CO_2 in modo altamente variabile: durante le ore di marcia della centrale la portata è elevata (proporzionale al carico e all'efficienza di cattura istantanea), ma durante gli arresti la portata scende a zero; inoltre, con frequenti start/stop si avrebbero rampe rapide di flusso. Questa discontinuità mal si adatta alle condotte progettate per regime stazionario. La CO_2 in fase densa ha bassa comprimibilità, ciò significa che la pipeline non può fungere da polmone livellando le oscillazioni (come invece accade in parte con il gas naturale comprimibile): variazioni brusche di portata si tradurranno in variazioni immediate di pressione lungo la condotta. Tali oscillazioni possono innescare fenomeni di transienti idraulici (*colpi d'ariete*) e sollecitare valvole, compressori di linea e dispositivi di sicurezza. Inoltre, se la portata scende spesso a zero (fermo impianto), la CO_2 nel tubo può raffreddarsi e perdere pressione, richiedendo poi tempo e energia per ripristinare le condizioni di regime quando il flusso riprende. In pratica, per mantenere una "*rateability*" molte strategie devono essere valutate: ad esempio, buffer di stoccaggio intermedio di CO_2 compressa (serbatoi) presso l'impianto, oppure accordi per convogliare la CO_2 di più impianti in modo sfalsato, o ancora far funzionare l'impianto di cattura in modalità ricircolo durante i cali di domanda (emettendo temporaneamente la CO_2 in atmosfera) per evitare stop completi del flusso verso la pipeline. La questione è sia tecnica che contrattuale: i contratti di trasporto potrebbero dover essere ripensati per accettare una certa variabilità, oppure penalizzare il produttore di CO_2 per le deviazioni. Senza adeguamenti, frequenti stop/start e fluttuazioni di portata possono creare problemi operativi seri nelle pipeline di CO_2, compromettendo la pressione e la consegna continua al sito di sequestro.

Corrosione e integrità della condotta – Come accennato, la presenza di impurità (soprattutto O_2 e acqua) può portare a corrosione interna della pipeline. La CO_2 secca e pura è relativamente innocua per l'acciaio al carbonio, ma basta una piccola percentuale di acqua perché si formi acido carbonico (H_2CO_3) che abbassa il pH e corrode l'acciaio. Se coesistono O_2 e altri gas acidi (SO_2, NO_2), si formano acidi ancora più aggressivi (solforoso, solforico, nitrico). La corrosione può manifestarsi in modo localizzato (pitting) facilitata dal fatto che l'ossigeno favorisce reazioni elettrochimiche. Un altro fattore è che nelle fasi di stop, se la tubazione respira aria dall'esterno o rimane con CO_2 stagnante umida, si possono creare condense locali che attaccano i punti più freddi o più alti del tracciato. Garantire la secchezza della CO_2 (<50 ppm H_2O tipicamente) è dunque imprescindibile, così come limitare al massimo l'O_2 (idealmente <100 ppm) e filtrare acidi. I materiali e i rivestimenti interni delle condotte potrebbero dover essere selezionati o trattati ad hoc se si prevede

qualche impurità. Nel programma FLECCS si raccomanda di iniziare fin da subito a monitorare e riportare le concentrazioni di specie traccia nella CO_2 catturata, e coinvolgere i gestori di pipeline per definire limiti sicuri. Va notato che le pipeline esistenti per CO_2 (ad es. negli USA per recupero avanzato del petrolio Enhanced Oil Recovery - EOR) spesso tollerano un po' di H_2S (che è acidificante ma in assenza di O_2 non causa corrosione rapida) ma non sono preparate ad accettare ossigeno libero. Pertanto, i futuri network di CO_2 dovranno sviluppare specifiche di qualità più complesse e sistemi di condizionamento della CO_2 catturata prima dell'immissione in rete.

Incertezze su permessi e regolamentazione – Un ultimo aspetto non tecnico ma cruciale è il regime autorizzativo per le nuove pipeline di CO_2. In molti stati, le infrastrutture per CO_2 non hanno ancora un quadro regolatorio consolidato: ad esempio, negli Stati Uniti non esiste un processo federale analogo a quello degli oleodotti o gasdotti dedicato alle pipelines di CO_2, il che significa che ottenere i permessi può essere lungo e soggetto a normative locali frammentate. Inoltre, dopo alcuni incidenti (come la fuoriuscita di CO_2 a Satartia, Mississippi nel 2020), l'opinione pubblica e i regolatori pongono crescente attenzione alla sicurezza di queste condotte (la CO_2 in concentrazioni elevate è asfissiante, e in caso di rotture può percorrere lunghe distanze al suolo perché più densa dell'aria). Gli studi evidenziano una "incertezza nei permessi delle pipeline di CO_2", suggerendo che i progetti potrebbero incontrare ostacoli e ritardi significativi prima di vedere realizzata la rete di trasporto necessaria. Si tratta di una sfida sistemica: la pianificazione di decine di nuovi gasdotti per CO_2 richiederà probabilmente politiche e normative nuove, il coordinamento tra enti (ad esempio, decidere se la CO_2 è regolata a livello statale o locale, se gode di diritto di esproprio come i gasdotti energetici, ecc.) e l'accettazione da parte delle comunità locali. Nel contesto nel programma FLECCS, viene raccomandato un coinvolgimento precoce di tutti gli stakeholder – dai produttori di CO_2 catturata, ai fornitori di tecnologia di cattura, ai costruttori di compressori, agli operatori di pipeline, fino agli utilizzatori finali della CO_2 (stoccaggio, EOR, usi industriali) – per definire specifiche e scenari comuni. Solo con un approccio olistico si potranno prevenire colli di bottiglia e garantire che la catena completa (cattura-trasporto-utilizzo/stoccaggio) funzioni in modo affidabile e sicuro.

4. Risultati

Lo sviluppo dei sistemi a turbogas con generatore a recupero (spesso integrati in cicli combinati CCGT o cogenerazione) rappresenta una tecnologia matura e in continua evoluzione, fondamentale nel panorama energetico mondiale per l'alta efficienza e la flessibilità operativa. Il recupero calore (attraverso HRSG - Heat Recovery Steam Generator) consente di innalzare il rendimento elettrico dal 35-40% del ciclo semplice a oltre il 60%. Il mercato delle turbine a gas per la generazione di energia è in continua crescita, sostenuto dalla necessità di sostituire carbone e impianti vecchi. Con questo questo forte sviluppo è necessario pensare anche a dei sistemi che prevedano la

cattura della CO_2 con il fine primario di porre un freno all'aumento della sua concentrazione in atmosfera (figura 4). La CO_2 recuperata può essere utilizzata per combustibili sintetici, materiali da costruzione, industria alimentare, serre agricole, recupero petrolifero (EOR), industria chimica, refrigerazione e processi industriali. Questo lavoro mette in luce come la decarbonizzazione delle centrali a gas tramite CCS non sia un semplice retrofit, ma richieda innovazioni su più fronti: nuove tecnologie di cattura più flessibili, adattamenti sostanziali all'operatività delle centrali (gestione di transitori, vapore, carichi), e considerazioni sull'infrastruttura a valle per il trasporto della CO_2. Sebbene siano stati fatti progressi con approcci innovativi, rimangono numerose sfide aperte. Il retrofit dei cicli combinati esistenti risulta difficile, specialmente a causa dell'operatività intermittente: non basta verificarne il funzionamento in condizioni stazionarie, ma occorre capire come reagiranno tutti i componenti in condizioni non stazionarie. I transitori potrebbero portare a CO_2 "*fuori specifica*" in alcune fasi, e bisognerà decidere come gestirla (emetterla in atmosfera temporaneamente? convogliarla altrove?). La sostanziosa bibliografia riportata alla fine di questa memoria, evidenzia che negli ultimi anni numerosi studi di revisione hanno analizzato lo stato dell'arte delle tecnologie di cattura della CO_2, evidenziando che i principali approcci tecnologici includono processi di pre-combustione, post-combustione e oxy-fuel, oltre a tecnologie emergenti quali adsorbimento su sorbenti solidi, membrane selettive, calcium looping e Direct Air Capture. Queste tecnologie sono oggetto di intensa ricerca per migliorare l'efficienza energetica e ridurre i costi di implementazione nei sistemi di generazione energetica e nei settori industriali ad alte emissioni.

In Italia non sono ancora operativi impianti di generazione elettrica a ciclo combinato alimentati a gas naturale con sistemi di cattura della CO_2 pienamente integrati su scala commerciale. Tuttavia, esistono progetti pilota e iniziative industriali di cattura della CO_2. Ad esempio in Lombardia è stata progettata una tecnologia che recupera l'anidride carbonica derivante da processo di fermentazione del mais finalizzato alla produzione di bioetanolo. *"La tecnologia TPI recupera mediante liquefazione la CO_2 biogenica che rappresenta la gran parte del gas prodotto durante la fase di fermentazione a monte per la produzione del bioetanolo: l'amido di mais viene trasformato in alcol etilico attraverso un processo biotecnologico. I gas di fermentazione, ricchi di CO_2, sono convogliati mediante tubazione all'impianto SIAD per la purificazione finale e la liquefazione. Lo stream di gas proveniente dall'impianto di produzione a monte viene purificato in torri di lavaggio e filtri a carboni dedicati. Successivamente questo gas ad alta percentuale di CO2 viene raffreddato intorno ai 10°C. La CO_2 viene compressa intorno ai 20 bar, alimentata a una batteria di essicamento e infine, dopo invio come fluido caldo al ribollitore di coda dell'unità di stripping (che sostiene l'evaporazione della CO_2 liquida), è alimentata al liquefattore di testa colonna, dove viene raffreddata e condensata intorno ai -25°C. Una volta liquefatta la CO_2 di grado alimentare viene stoccata in serbatoi criogenici e poi trasportata ai Clienti.*

La tecnologia di TPI non consiste pertanto in una semplice condensazione monostadio della CO_2, operazione che è invece integrata con una purificazione della CO_2 stessa mediante frazionamento in una colonna dedicata. La CO_2 viene così recuperata in coda alla colonna con un elevato grado di purezza, rientrando in particolare nelle specifiche ISBT (richieste dal mercato del beverage), indipendentemente dalla qualità della CO_2 prodotta dal processo a monte"[1].

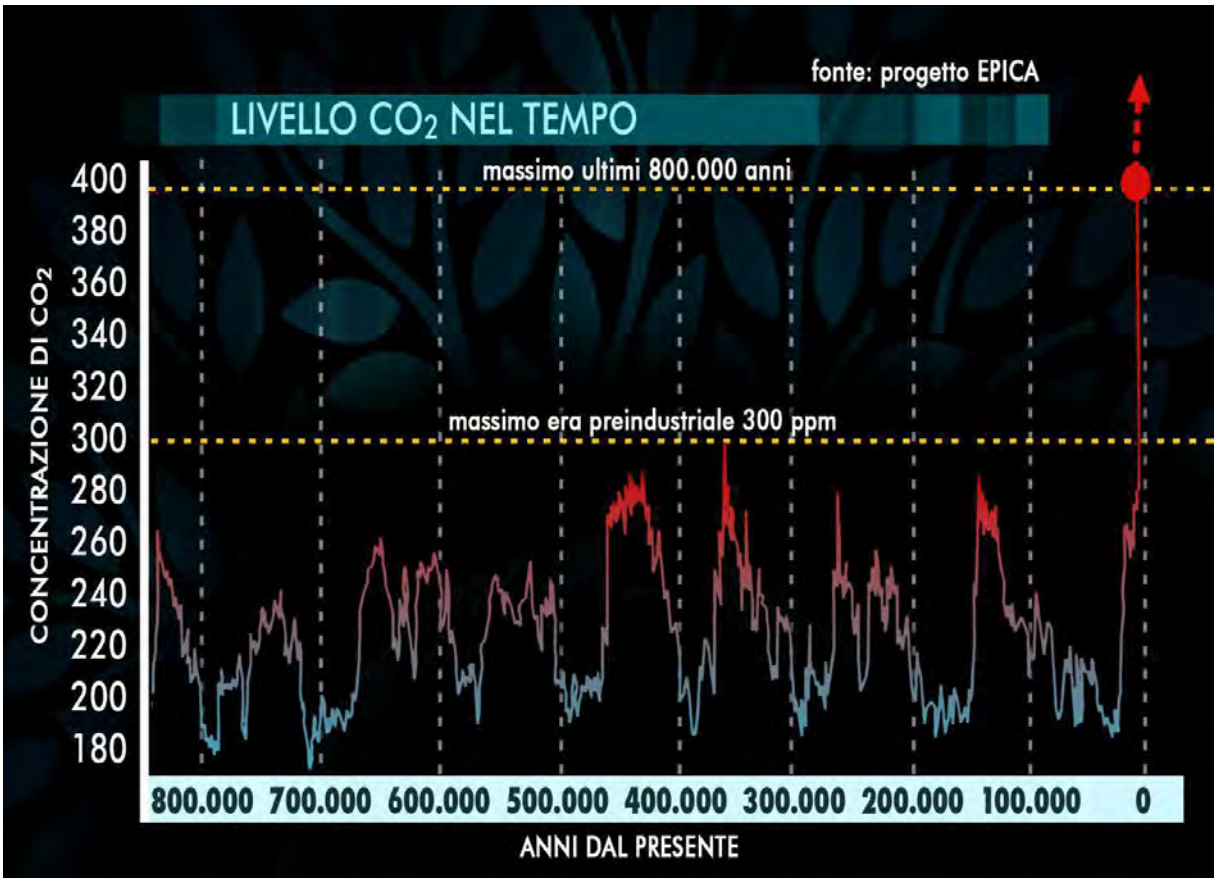


Figura. 4 – andamento della concentrazione della CO_2 da 800.000 anni ad oggi

Bibliografia

[1] Jack Lewnard, Chris Vandervort – ARPA-E FLExible Carbon Capture and Storage (FLECCS) – Presentation, 2024 netl.doe.govnetl.doe.gov.

[2] Barr Engineering – Analysis demonstrates scalability of innovative carbon-capture concept (CACHYS™) barr.combarr.com

[3] ARPA-E e letteratura: dati e studi su solvent storage, integrazione CCS flessibilesciencedirect.comcontent-cdn.sessionboard.com.

[4] Intervista "TPI (SIAD): nella CCUS il futuro sarà il riciclo chimico delle CO2" di Margherita Ferrante.

[5] Nagireddi S., et al. - Carbon Dioxide Capture, Utilization, and Sequestration: Current Status, Challenges, and Future Prospects for Global Decarbonization. ACS Engineering AU, 2023.

[6] Wu C., et al. - A Comprehensive Review of Carbon Capture Science and Technology. Carbon Capture Science & Technology, 2024.
[7] Islam M. H., et al. - A Review on the State-of-the-Art and Commercial Status of Carbon Capture Technologies. Energies, 2025.
[8] Thiedemann T. M., et al. - A Compact Review of Current Technologies for Carbon Capture. Processes, 2025.
[9] Obi D., Onyekuru S. - Review of Recent Process Developments in the Field of CO_2 Capture from Power Plant Flue Gases. Philosophical Magazine, 2024.
[10] Kammerer S., et al. - Review: CO_2 Capturing Methods of the Last Two Decades. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023.
[11] Hanifa M., et al. - A Review on CO_2 Capture and Sequestration in the Cement Industry. Sustainable Materials and Technologies, 2023.
[12] Osman A. I., et al. - Recent Advances in Carbon Capture, Storage and Utilisation Technologies. Environmental Chemistry Letters, 2021.
[13] Gooty R. et al. (2023) – *Incorporation of market signals for the optimal design of flexible carbon capture systems*, Applied Energy.
[14] Zantye M., Arora A., Hasan M. (2021) – *Optimal design and scheduling of flexible carbon capture processes*, Energy & Environmental Science.
[15] Bui M. et al. (2018) – *Carbon capture and storage technologies for power generation*, International Journal of Greenhouse Gas Control.
[16] Boot-Handford M. et al. (2014) – *Carbon capture and storage update*, Energy & Environmental Science.
[17] IEAGHG (2020) – *CO_2 pipeline infrastructure*.
[18] IPCC (2022) – *Mitigation of Climate Change – Carbon Capture and Storage*.
[19] NETL (2023) – *CO_2 Transport and Storage Infrastructure for CCS deployment*.
[20] Keith D. et al. (2018) – *A process for capturing CO_2 from the atmosphere*, Joule.
[21] Fasihi M. et al. (2019) – *Techno-economic assessment of direct air capture technologies*, Joule.
[22] Rochelle G. (2012) – *Amine scrubbing for CO_2 capture*, Science.
[23] Wang M. et al. (2011) – *Post-combustion CO_2 capture with chemical absorption*, Energy.

Nota 1: TPI (SIAD): nella CCUS il futuro sarà il riciclo chimico della CO_2

Analisi del danneggiamento per scorrimento viscoso del collettore di uscita di un impianto di "steam reforming": tecniche diagnostiche e caratterizzazione metallurgica e meccanica in laboratorio

R. Ciancio[1], E. Ferrari[2], V. Zanni[3], M. Palombo[4], G. L. Cosso[4]

[1]Inail – Uot di Genova
[2]Inail – Dit
[3]IPLOM S.p.A.
[4]Istituto Italiano della Saldatura

1. Introduzione

Negli impianti di steam reforming per la produzione di idrogeno, i componenti più critici per danneggiamento a creep sono i tubi catalitici (>900°C) e il sistema di uscita della sezione radiante (>800°C), realizzati in leghe di nichel per resistere a condizioni operative estreme (870–950°C).
Il degrado può essere accelerato da interazione creep–fatica e da mismatch di resistenza al creep nelle saldature tra materiali dissimili (connessioni pig tail–collettore).
Il lavoro analizza il caso studio del collettore di uscita del forno F-1101 dell'unità di produzione idrogeno (HMU) della Raffineria IPLOM di Busalla, sostituito a seguito di indicazioni riscontrate durante i controlli in ottemperanza alla normativa vigente.
Lo studio descrive le tecniche diagnostiche adottate per individuare il danneggiamento sul componente esercito, consentendo la pianificazione della sostituzione preventiva. Una volta rimosso, il componente è stato sottoposto a indagini di laboratorio per valutare entità ed estensione del danno, oltre a un'analisi agli elementi finiti, finalizzata a interpretare i risultati sperimentali secondo i criteri di progettazione e valutazione della vita residua in regime di creep.
I risultati e le considerazioni finali sono discussi nei paragrafi successivi.

2. Descrizione dell'impianto e del processo di produzione idrogeno

Gli idrocarburi leggeri (miscela di gas di raffineria e gas naturale) preriscaldati a ~400°C nella sezione convettiva del Reformer Heater, sono quindi inviati al reattore di idrogenazione, dove i composti solforati sono convertiti in idrogeno solforato per evitare l'avvelenamento del catalizzatore di reforming.
Il gas desolforato è miscelato con vapore, preriscaldato a 580–590°C e inviato alla sezione radiante (30 tubi catalitici), dove avviene il reforming con formazione di idrogeno, CO, CO_2, CH_4 e H_2O.
L'effluente è raffreddato a 320–350°C nel "Process Gas Boiler" (con produzione di vapore) e inviato alla conversione del CO, dove reagisce con vapore, formando CO_2 e ulteriore idrogeno.

Segue ulteriore recupero termico con produzione di vapore surriscaldato per il reforming, preriscaldo acqua alimento caldaia e preriscaldo di acqua per degasatore. Il gas è quindi trattato tramite il separatore caldo (rimozione condensa ricca di CO_2), un ulteriore raffreddamento (aria + acqua) e attraverso il separatore freddo (per rimuovere l'ulteriore condensa). Infine è inviato all'unità PSA (Pressure Swing Adsorption) per la purificazione.

3. Descrizione del sistema di uscita dalla sezione radiante del "Reformer Heater" F-1101

Il sistema di uscita dalla sezione radiante, rappresentato in Figura 1, è costituito dai componenti di seguito indicati, di cui vengono riepilogate le principali caratteristiche:

- "pig tail" di collegamento tra tubi catalitici e collettore di uscita in materiale: Alloy 800H (ASTM B407 UNS 8810);
- "nipolet" in corrispondenza delle connessioni tra "pig tail" e collettore di uscita in materiale: Alloy 800HT (ASTM B408 UNS 8811);
- collettore di uscita (realizzato in Alloy Schmidt + Clemens G4859), costituito da: fondi piani di estremità, "tee" centrale di collegamento alla transizione tronco-conica e, infine, riduzione tronco-conica di collegamento tra collettore di uscita e "Process gas boiler".

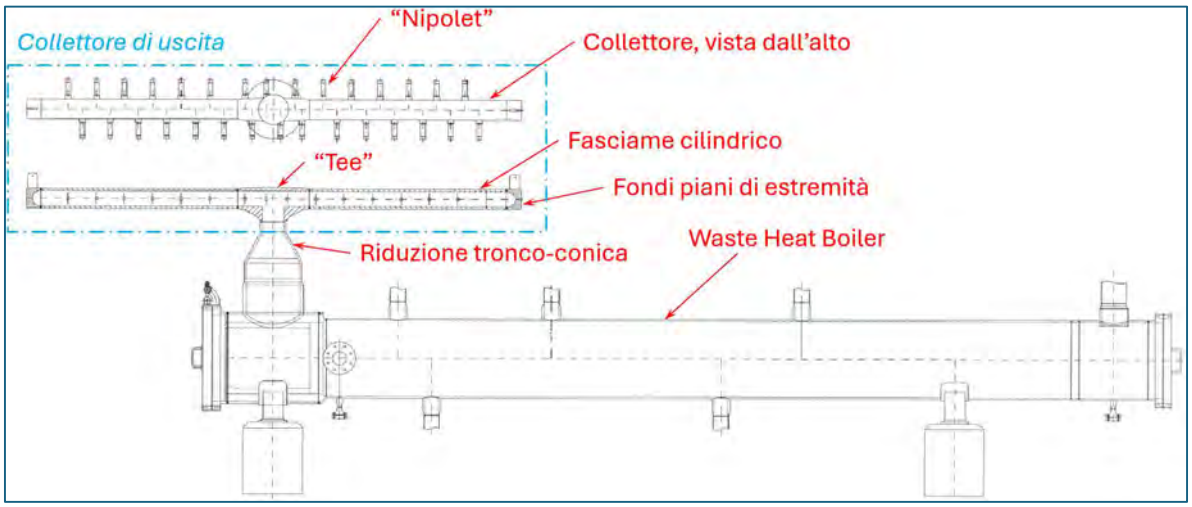


Figura 1. Componenti del sistema di uscita

Tutti i componenti del sistema di uscita sono coibentati, ad eccezione della riduzione tronco-conica: quest'ultima è infatti dotata di un rivestimento refrattario interno (il cui spessore aumenta gradualmente lungo l'asse longitudinale del componente), che si estende anche all'interno del distributore del "Process gas Boiler".

4. Esito delle attività di ispezione condotte durante la fermata di manutenzione

In occasione della fermata di manutenzione effettuata nel secondo semestre del 2022, i componenti del forno di "Steam Reformer" in esercizio in regime di

scorrimento viscoso ad alta temperatura, indicati nel prospetto seguente, sono stati sottoposti ai controlli non distruttivi e alle indagini metallografiche necessarie per la valutazione della frazione di vita consumata e della vita residua, in accordo ai riferimenti legislativi e normativi vigenti ([1] ÷ [5]):

- serpentino C-1102 di preriscaldo della carica nella sezione convettiva (realizzato in acciaio ASTM A312 Tp. 304H),
- linea di collegamento tra serpentino C-1102 e collettore di ingresso alla sezione radiante (realizzata in acciaio ASTM A312 Tp. 316H);
- collettore di ingresso alla sezione radiante (realizzato in acciaio ASTM A312 Tp. 316H);
- "pig tail" di collegamento tra collettore di ingresso alla sezione radiante e tubi catalitici (realizzati in acciaio ASTM A312 Tp. 316H);
- componenti del sistema di uscita dalla sezione radiante (descritti in dettaglio nel paragrafo precedente).

I tubi catalitici sono stati esclusi dalla valutazione e dalla relativa pianificazione dei controlli non distruttivi e delle indagini metallografiche, in quanto integralmente sostituiti nel 2018.

Alla data di esecuzione delle attività di ispezione, i componenti avevano accumulato un numero di ore di esercizio tale da richiedere l'esecuzione di controlli finalizzati all'individuazione, ove presenti, di fenomeni di scorrimento viscoso ad alta temperatura ("creep"), nonché lo svolgimento di verifiche e calcoli sui componenti in pressione operanti in regime di scorrimento viscoso del materiale, in conformità alla Circolare ISPESL n. 48/2003.

Il Piano di Controllo predisposto per l'intervento di riomologazione ha previsto l'esecuzione delle attività di ispezione di seguito indicate:

- esame visivo;
- esame con liquidi penetranti;
- esame ultrasonoro spessimetrico;
- esame dimensionale dei "pig tail" con tecnica LASER (misurazione del diametro esterno);
- indagine metallografica mediante replica.

Sui componenti della sezione convettiva, della linea di collegamento al collettore di ingresso e del sistema di ingresso (collettore e "pig tail") non sono state riscontrate anomalie.

Sui "pig tail" del sistema di uscita l'esame dimensionale ha riscontrato la presenza di una contenuta espansione diametrale anelastica (compresa tra 1% e 2%), ascrivibile allo scorrimento viscoso ad alta temperatura.

Sul collettore di uscita l'indagine metallografica, effettuata dove indicato in Figura 2, ha riscontrato la presenza di microvuoti e alcune microcricche.

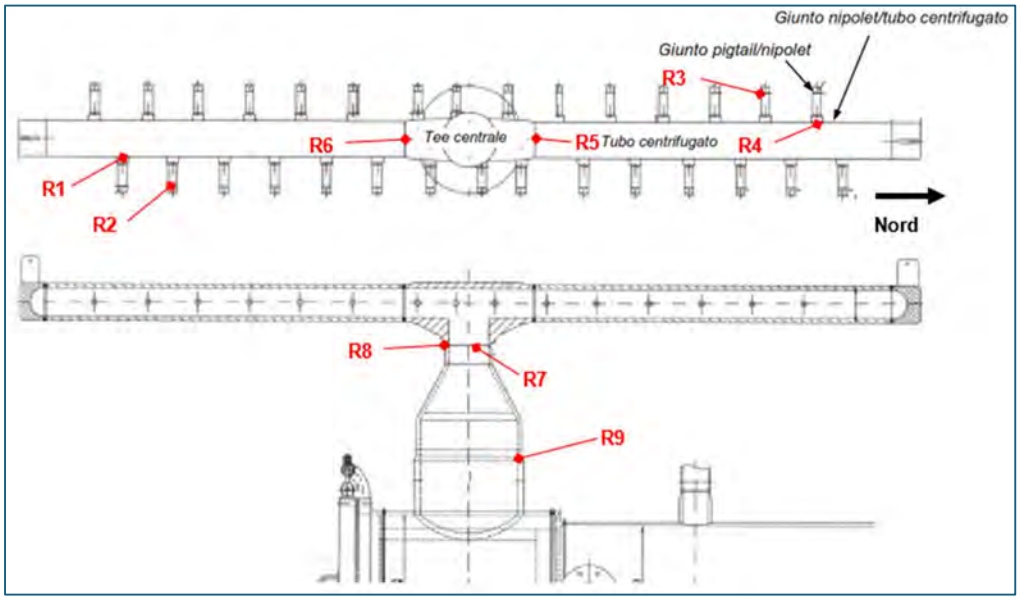


Figura 2. Posizione di prelievo delle repliche metallografiche

Il danneggiamento microstrutturale è risultato maggiormente significativo nelle posizioni seguenti:

- repliche R1 e R4, in corrispondenza della saldatura eterogenea tra "nipolet" in Alloy 800HT e fasciame cilindrico del collettore in Alloy Schmidt + Clemens G4859: sono state rilevate microcricche sia in zona fusa, sia nella zona termicamente alterata lato collettore (Figura 3);
- repliche R7 e R8, in corrispondenza della saldatura tra "tee" e riduzione tronco-conica. Sono state rilevate microcricche (Figura 3) in materiale base lato "tee" e in zona termicamente alterata, sia lato "tee", sia lato riduzione; in zona fusa è stata invece riscontrata la presenza di microvuoti isolati o localmente allineati (Figura 4).

In corrispondenza della piazzola della replica R7, la presenza di indicazioni lineari di piccole dimensioni (lunghezza ≅ 2 ÷ 3 mm) è stata riscontrata anche dall'esame con liquidi penetranti (Figura 4).

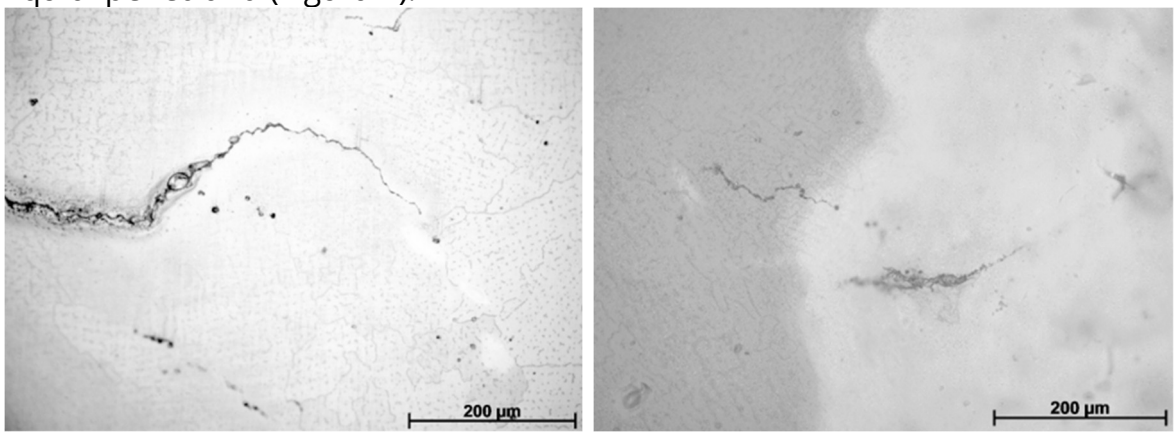


Figura 3. Replica R1, microcricca isolata in ZF; replica R7, microcricca isolata in ZTA lato "tee"

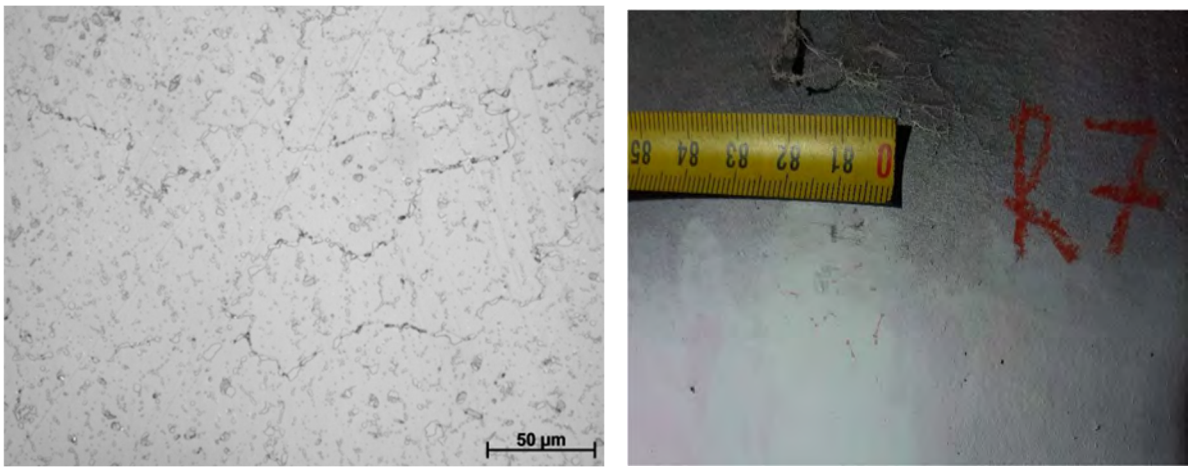


Figura 4. Replica R7, microvuoti localmente allineati in ZF; in basso a dx.: replica R7, indicazioni lineari rilevate sulla piazzola della replica

5. Vita effettiva del sistema di uscita dello "Steam Reformer": riscontri nell'esperienza operativa e nella letteratura tecnica

Fatte salve limitate eccezioni, i componenti realizzati in materiali "convenzionali" (acciai basso-legati Cr-Mo e acciai inossidabili) presentano generalmente un danneggiamento microstrutturale contenuto anche dopo tempi di esercizio in regime di creep ad alta temperatura superiori alla vita di progetto (tipicamente 100˙000 h).
Nell'esperienza di IIS SERVICE su componenti analoghi, realizzati in leghe simili a quelle dei componenti del sistema di uscita dello Steam Reformer oggetto di studio, evidenze di questo tipo risultano frequenti per durate di esercizio dell'ordine di ~100˙000 h, in condizioni di esposizione a temperature estremamente elevate, che favoriscono un progressivo e relativamente rapido degrado della microstruttura e delle proprietà meccaniche del materiale, inclusa la resistenza allo scorrimento viscoso.
Sebbene possano differenziarsi in relazione allo specifico caso, le motivazioni sono spesso comprese tra le seguenti:

- Presenza di saldature eterogenee tra materiali dissimili (es. Weldolet/Nipolet in Alloy 800H/800HT e collettore in 20Cr-32Ni-Nb), con resistenza al creep inferiore (~55%) nel materiale di raccordo, che rappresenta un punto critico per danneggiamento a caldo.
- Presenza di severi gradienti termici in attrezzature sottoposte a cicli di avviamento e arresto relativamente numerosi: questa circostanza contraddistingue, in particolare, la zona di transizione tra componenti coibentati e componenti con rivestimento refrattario interno.
- Carichi termici e meccanici non adeguatamente considerati possono compromettere il sistema di supporto, che deve sostenere il peso senza impedire la dilatazione termica. Il degrado dei supporti elastici o una progettazione non ottimale può aumentare le tensioni e accelerare il danneggiamento.

- La presenza di imperfezioni di origine costruttiva, pur rientrando nei criteri di accettabilità iniziali, può evolvere durante l'esercizio ad alte temperature, favorendo nel tempo fenomeni di danneggiamento.

Le considerazioni esposte trovano conferma nella letteratura tecnica, in particolare in API TR 942-A ("Materials, Fabrication, and Repair Considerations for Hydrogen Reformer Furnace Outlet Pigtails and Manifolds", 2014), che tratta progettazione, fabbricazione e gestione in esercizio dei componenti.

6. Sostituzione dei componenti

A seguito delle evidenze emerse nella fermata di manutenzione 2022, IPLOM S.p.A. ha pianificato la sostituzione completa del sistema di uscita (pig tail, collettore e riduzione tronco-conica).

I nuovi componenti, realizzati con gli stessi materiali, sono stati forniti da Schmidt + Clemens Spain S.A.U.

Le attività di controllo non distruttivo, collaudo e prove meccaniche sono state supervisionate da INAIL e da IPLOM S.p.A., con il supporto dell'Istituto Italiano della Saldatura.

La sostituzione è stata eseguita da SIMIC S.p.A. durante la fermata di manutenzione, con assistenza tecnica dell'Istituto Italiano della Saldatura.

Le verifiche intermedie e finali, incluso il collaudo pneumatico, sono state supervisionate da INAIL (unità territoriale di Genova).

7. Pianificazione delle indagini di laboratorio

Per l'indagine sperimentale sono stati prelevati 4 campioni del collettore in esame (Figura 5). Sui campioni sono state pianificate le indagini seguenti:

- controllo mediante liquidi penetranti (PT) delle saldature "nipolet"/collettore e "tee"/riduzione tronco-conica;
- rilievo "laser scanner" del "tee" (per ottenere la geometria da utilizzare nella simulazione FEM);
- controllo mediante radiazioni ionizzanti (RT) della saldatura tra "tee" e riduzione tronco-conica;
- esecuzione e osservazione di sezioni macrografiche e micrografiche;
- prelievo di saggi per prove di trazione monoassiale a temperatura ambiente (per verificare il degrado delle proprietà meccaniche principali determinato da scorrimento viscoso ed esposizione a temperatura elevata);
- prelievo di saggi per prove di creep.



Figura 5. “Tee” centrale (in alto a sin.) e riduzione tronco-conica (in basso a sin.) - Posizioni di prelievo delle sezioni per l’esame macrografico e micrografico

8. Esito delle indagini di laboratorio

L’esito delle indagini di laboratorio (Figura 6) è sintetizzato nel prospetto seguente:

- Il controllo mediante liquidi penetranti non ha rilevato ulteriori indicazioni (oltre a quelle riscontrate sulla piazzola della replica R7); l’ulteriore periodo di esercizio sostenuto dal 2022 alla sostituzione, pertanto, non ha determinato una significativa evoluzione del danneggiamento.
- Il controllo radiografico, pur con le limitazioni determinate da dimensioni e geometria del componente, non ha evidenziato la presenza di indicazioni.
- Sul “tee” è stato effettuato il rilievo “laser scanner” con tecnologia “HandyScan”, che ha consentito di rilevare l’effettiva configurazione geometrica del componente ed adottarla per la simulazione numerica ad elementi finiti (Figura 7).

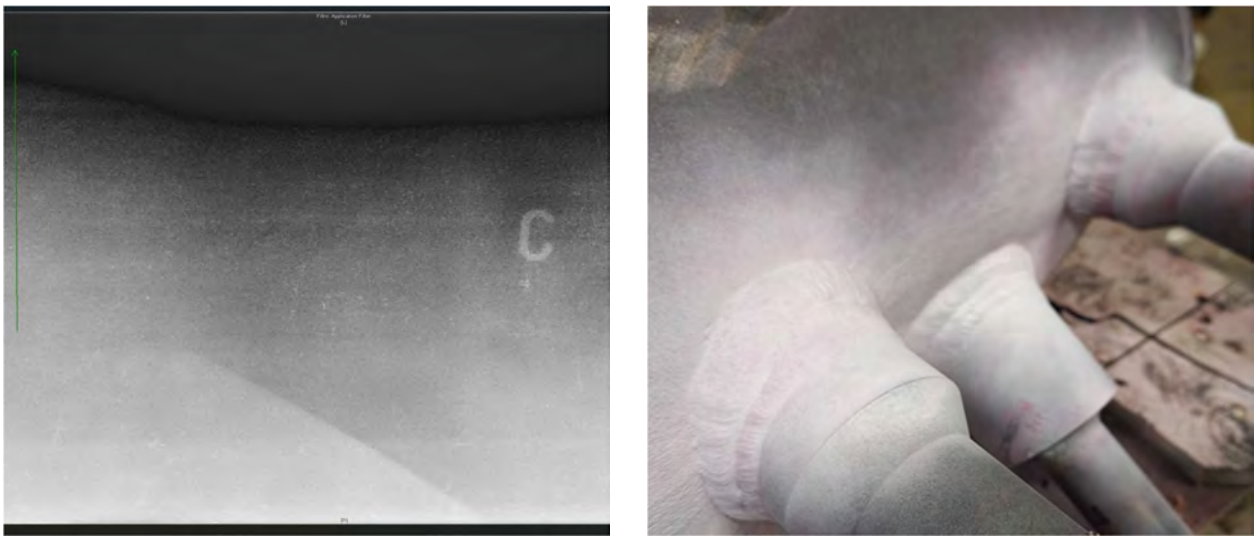


Figura 6. Esito dei controlli non distruttivi (a sinistra: radiografici; a destra: liquidi penetranti)

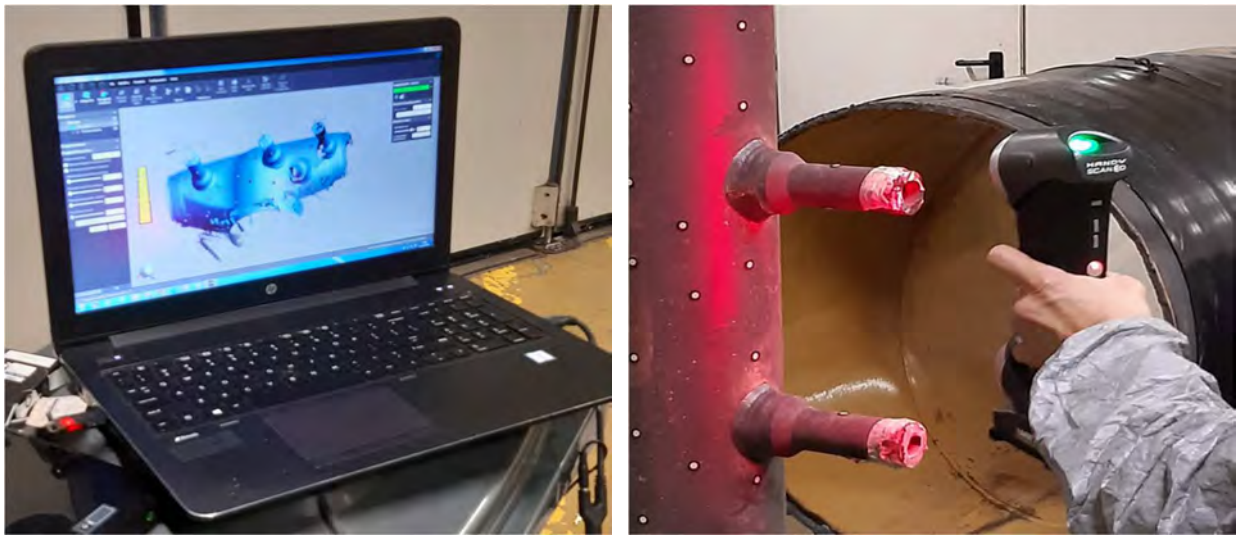


Figura 7. Rilievo “Laser Scanner” con tecnologia “HandyScan”

- In corrispondenza del “tee” e della saldatura “tee”/riduzione tronco-conica, l’esame macrografico e micrografico, effettuato nelle posizioni indicate in Figura 5, ha confermato la presenza delle discontinuità già evidenziate in campo dalle repliche metallografiche (Figura 8).

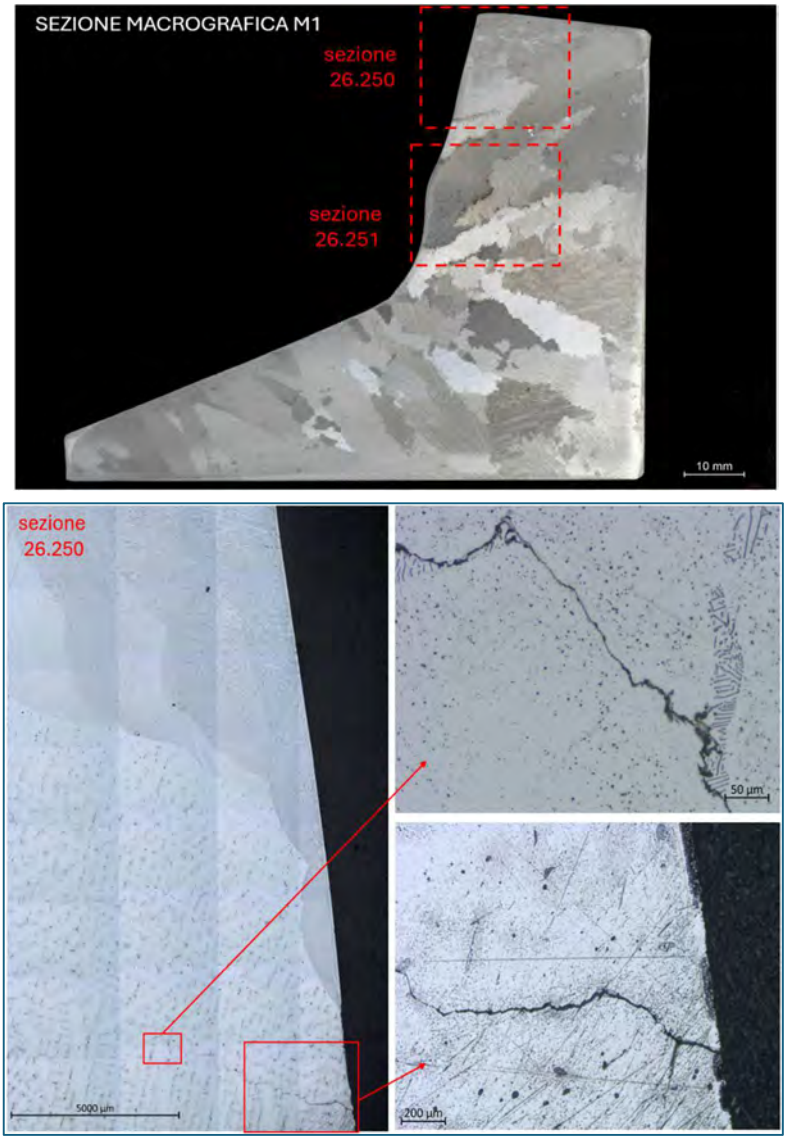


Figura 8. Esame macrografico e micrografico in corrispondenza della sezione M1

- l'esito delle prove di trazione monoassiale effettuate a temperatura ambiente è indicato in Tabella 1 seguente:

ID Prova	R_{p02} (MPa)	$R_{p02,min}^{*}$ (MPa)	R_m (MPa)	$R_{m,min}^{*}$ (MPa)	A (%)	A_{min}^{*} (%)
Test 1	228	180	317	440	3.0	20
Test 2	224		299		2.5	
**Valore minimo indicato dal Material Data Sheet Schmidt + Clemens*						

Tabella 1. Esito delle prove di trazione a temperatura ambiente

Come è possibile notare, i valori del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità dello 0.2% ottenuti dalle prove sono congruenti con il minimo previsto dal Material Data Sheet Schmidt + Clemens ([8]), a differenza di quanto attiene a resistenza meccanica a trazione e allungamento a rottura.

L'allungamento a rottura (A %) è risultato sensibilmente inferiore al valore minimo indicato da Schmidt + Clemens a componente nuovo, mentre una riduzione più modesta del minimo garantito in fornitura è risultata sulla resistenza a trazione. Tale esito è plausibilmente indicativo di un fenomeno di progressivo degrado delle proprietà meccaniche indotto dall'esercizio a temperatura elevata.

- Sono state infine effettuate due prove di resistenza allo scorrimento viscoso a breve/medio termine, una delle quali tutt'ora in corso, il cui esito è riepilogato in Tabella 2 e in Figura 9.

ID Prova	σ (MPa)	T (°C)	t_R (h)	A (%)
Test 1	35.9	860	1294	0.158
Test 2	41.8	900	272	23.9

Legenda:
s: tensione applicata
T: temperatura di prova
t_R: tempo a rottura
A: allungamento a rottura
Per il Test 1 (tutt'ora in corso), t_R e A rappresentano, rispettivamente, il tempo di prova già sostenuto e l'allungamento registrato alla data di stesura della presente memoria

Tabella 2. Esito delle prove di resistenza allo scorrimento viscoso a breve termine

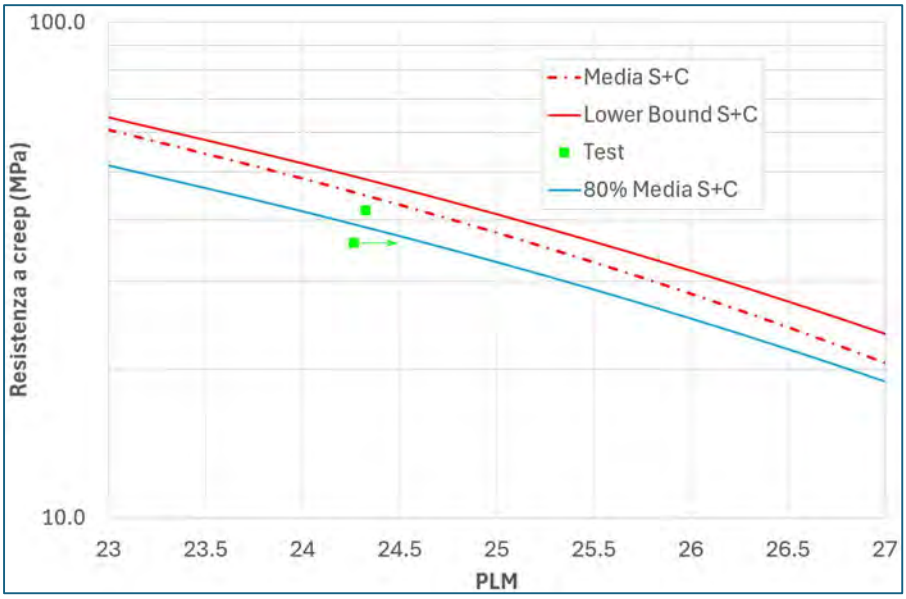


Figura 9. Esito delle prove di scorrimento viscoso riferite alla "Master Curve" del materiale in esame

I risultati ottenuti dalle prove indicano che la resistenza residua del materiale nei confronti dello scorrimento viscoso, sebbene inferiore alla curva di "Lower Bound" indicata dal produttore, si colloca plausibilmente sopra la curva che rappresenta l'80% della resistenza media del materiale di nuova fornitura. In questo caso, di

conseguenza, la riduzione di resistenza evidenziata sperimentalmente può ritenersi congruente con il periodo di esercizio sostenuto dal componente in esame.

9. Simulazione numerica ad elementi finiti

Nella soluzione costruttiva adottata per il Forno F-1101 in esame (senza dubbio la più consueta negli impianti di "Steam Reforming"), il "tee" centrale e la riduzione tronco/conica costituiscono la posizione di transizione tra la zona coibentata e la zona internamente refrattariata del sistema di uscita dalla sezione radiante (Figura 10).
I due componenti sono pertanto interessati da un significativo gradiente termico, riprodotto con l'esecuzione dell'analisi termica ad elementi finiti (Figura 11).

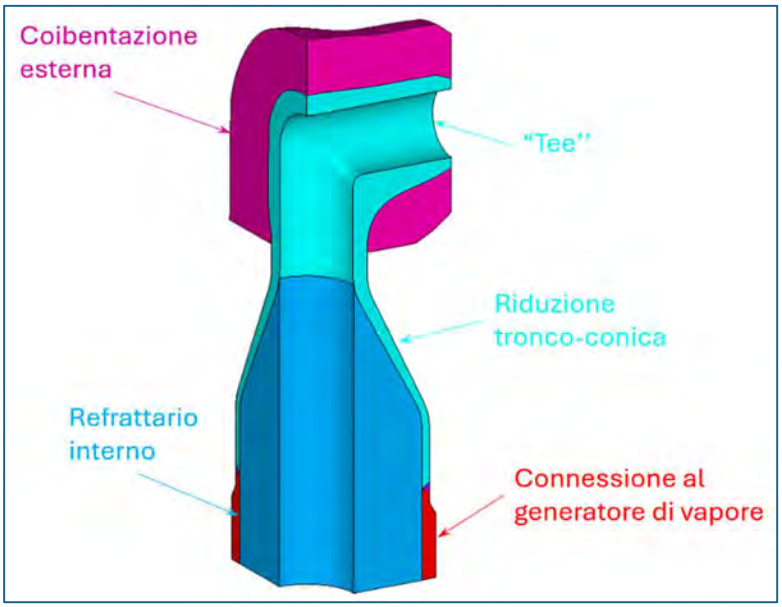


Figura 10. Modello ad elementi finiti utilizzato per l'analisi termica *e strutturale*

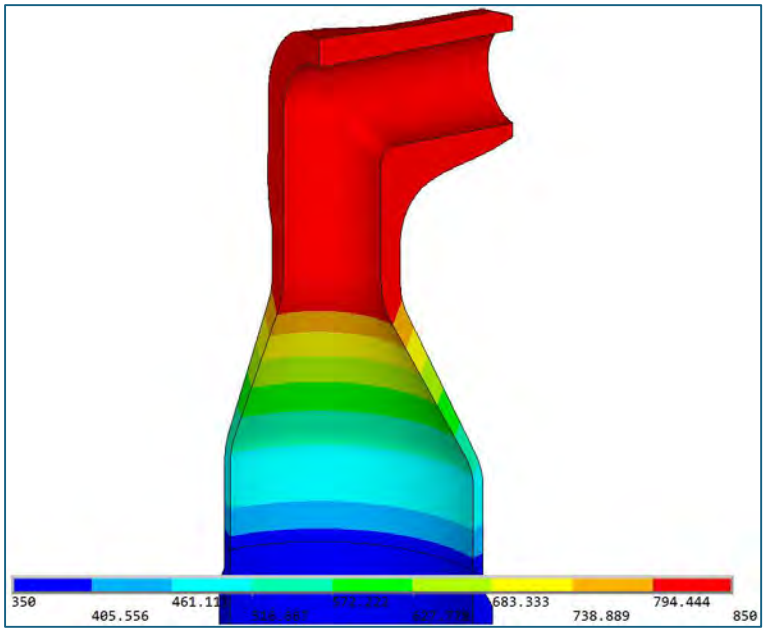


Figura 11. Distribuzione della temperatura (°C) nei componenti "tee" e riduzione tronco/conica

Lo stato di tensione e deformazione nei componenti deriva dalla combinazione di pressione interna e distribuzione non uniforme della temperatura.
Mediante analisi strutturale numerica, imponendo il campo termico e la pressione di progetto, è stata determinata la distribuzione delle tensioni, evidenziando valori più elevati in corrispondenza della saldatura tra *tee* e riduzione tronco-conica (Figura 12).
Durante le fasi di arresto dell'unità, a temperature prossime a quelle ambiente, può accentuarsi il fenomeno di danneggiamento per il potenziale manifestarsi di deformazioni plastiche (necessarie al rispetto delle condizioni di congruenza) e, di conseguenza, di uno stato di tensione residuo, destinato al progressivo rilassamento durante la successiva fase di avvio, con ulteriore accumulo di deformazione per creep.
Si verifica pertanto il fenomeno schematizzato in Figura 13, che evidenzia gli effetti dell'interazione creep-fatica nell'accentuare il progressivo incremento della deformazione per creep rispetto alla condizione di esercizio continuativo (assenza di cicli di arresto/avviamento).

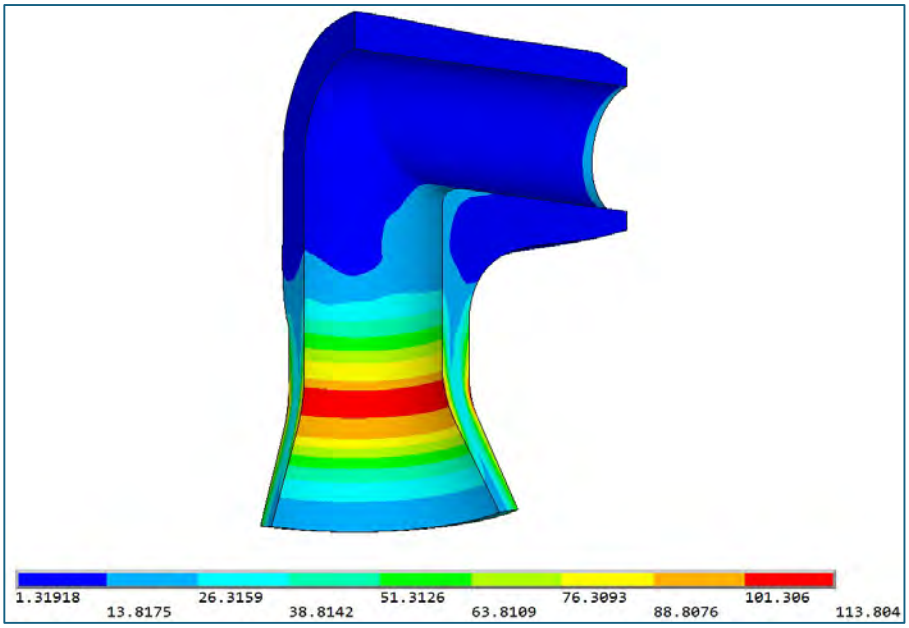


Figura 12. Distribuzione della tensione ideale di Tresca (MPa) nei componenti "tee" e riduzione tronco/conica (in prossimità della saldatura)

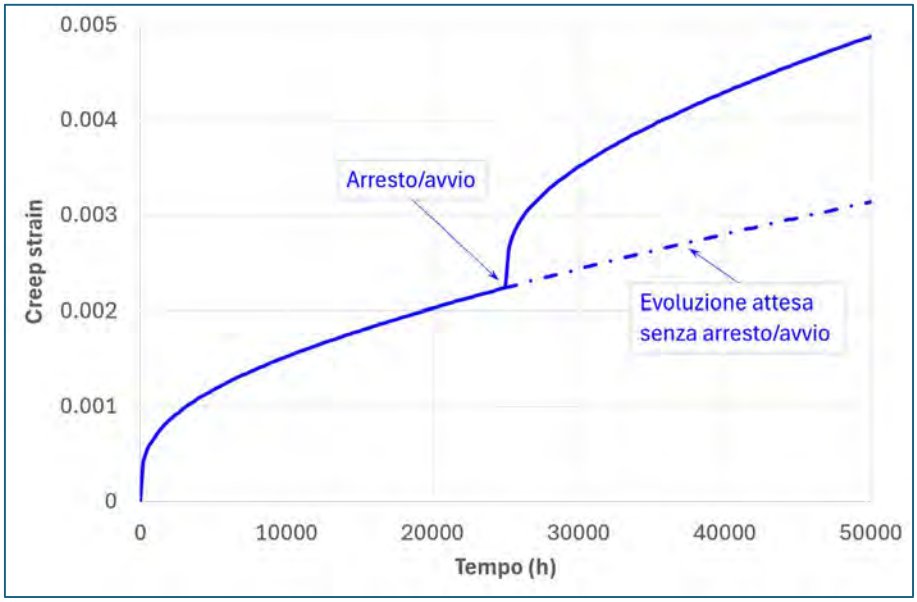


Figura 13. Evoluzione qualitativa della deformazione per scorrimento viscoso in presenza di fenomeni di interazione creep – fatica

10. Considerazioni conclusive

Nello studio descritto nei paragrafi precedenti sono stati presi in considerazione i componenti del sistema di uscita dalla sezione radiante del Forno F-1101 di "Steam Reforming", in esercizio nella Raffineria IPLOM di Busalla, che hanno evidenziato, dopo un periodo di esercizio ad alte temperature, il manifestarsi di fenomeni di danneggiamento riconducibili all'esercizio in regime di scorrimento viscoso. Una volta effettuata la sostituzione del collettore di uscita, i componenti sono stati sottoposti a prove e indagini di laboratorio. L'indagine metallografica ha consentito di caratterizzare con maggiore dettaglio la natura e le dimensioni delle discontinuità già evidenziate in campo con l'esecuzione delle repliche metallografiche, mentre con le prove meccaniche effettuate è stato possibile quantificare i fenomeni di degrado della resistenza del materiale indotti dall'esercizio.

Al termine delle prove è emersa una sensibile riduzione dell'allungamento a rottura, mentre la diminuzione della resistenza a trazione è risultata più contenuta rispetto ai valori dichiarati dal costruttore del componente nuovo.

La perdita di duttilità e, più in generale, delle proprietà meccaniche è coerente con l'esercizio prolungato (>100.000 h) in regime di scorrimento viscoso (creep).

L'analisi numerica agli elementi finiti ha inoltre indicato che il danneggiamento può essere accentuato dall'interazione creep–fatica, in occasione degli shutdown degli impianti.

Tale interpretazione ha trovato chiari riscontri nella letteratura tecnica per componenti con tempi di esercizio analoghi.

Bibliografia e sitografia

[1] Decreto del Ministero delle Attività Produttive 1 Dicembre 2004, n. 329 “Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del Decreto Legislativo 25 Febbraio 2000, n. 93”

[2] "Procedura tecnica per le verifiche di calcolo e controlli su componenti in pressione in regime di scorrimento viscoso del materiale" allegata alla Circolare INAIL n. 48/2003 del 05/12/2003

[3] UNI/TS 11325-2 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 2: Procedura di valutazione dell'idoneità all'ulteriore esercizio delle attrezzature e degli insiemi a pressione soggetti a scorrimento viscoso”

[4] UNI TS 11325-4 “Attrezzature a pressione - Messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature e degli insiemi a pressione - Parte 4: Metodi operativi per la valutazione di integrità di attrezzature a pressione operanti in regime di scorrimento viscoso applicabili nell'ambito della procedura di valutazione di cui alla UNI/TS 11325-2”

[5] UNI 11096 “Prove non distruttive - Controlli sullo stato di integrità strutturale di attrezzature a pressione soggette a scorrimento viscoso a caldo - Pianificazione ed esecuzione dei controlli, valutazione dei risultati e documentazione”

[6] API TR 942-A “Materials, Fabrication, and Repair Considerations for Hydrogen Reformer Furnace Outlet Pigtails and Manifolds”

[7] Dasari Sukumar Reddy, Aditya Divvela, “Case Study on the Failure of a centrifugally Cast Reformer Outlet Header in a Hydrogen generation Unit”, AMPP Conference, Nashville, Tennessee, April 6 – 10 2025

[8] Schmidt + Clemens Märker®/Centralloy® G/CA 4859 GX10NiCrNb32-20 Material Data Sheet

Affidabilità e sicurezza di un impianto di produzione TetraConaZolo con impiego di TetraFluoroEtilene ad alta pressione: fattibilità delle nuove tecnologie

F. Carmignani[1], G. Sgargetta[1], N. Jand [2], R. Iovene[3], R. Vasile[3]

[1] Isagro S.p.a
[2] DIIIE, Università degli studi dell'Aquila
[3] Inail - UOT di Pescara

Sommario
Partendo dall'analisi di rischio derivato dall'utilizzo del reagente gassoso TFE nel processo per la produzione del fitofarmaco TCZ in un moderno impianto chimico altamente automatizzato, l'obiettivo è esporre un esempio concreto di preparazione assistita dall'intelligenza artificiale di un codice di calcolo, sviluppato in Python3, per l'identificazione di un sistema lineare tempo-invariante (LTI) del terzo ordine che costituisce il cuore del gemello digitale collaborativo in progresso, a supporto della conduzione dei reattori batch, permettendo la previsione della pressione di esercizio e l'individuazione tempestiva di potenziali anomalie. Al di là di contribuire all'accrescimento del know-how aziendale, migliorare le operazioni e le procedure di sicurezza e potenziare l'affidabilità dell'impianto con costi contenuti, il principale elemento innovativo risiede nella trasferibilità della metodologia utilizzata ad altri processi industriali, con potenziali benefici in termini di efficienza operativa e sostenibilità economico-ambientale. In sostanza si prospetta agli addetti alla conduzione degli impianti chimici una nuova metodologia di lavoro, basata sullo sviluppo dei software collaborativi "in casa" mirati alla migliore conduzione e controllo dell'impianto, e resa disponibile dall'avvento delle nuove tecnologie digitali, dal software libero e dall'assistenza dell'intelligenza artificiale disponibile in internet, per ora senza alcun costo significativo.

1. Introduzione

Il reagente TFE in miscela azeotropica TFE-HCl raggiunge periodicamente l'impianto con il trasporto ADR in Iso-Tank mobili incamiciati alla pressione di 40/50 bar. Prima dell'invio ai reattori, la miscela subisce una serie di operazioni che prevedono il prelevamento dall'Iso-Tank della quantità richiesta, la laminazione a circa 1 barg ed il lavaggio e purificazione negli scrubber sotto controllo assistito dal conduttore, di cui si riportano alcune analisi del rischio e corrispondenti nodi HAZOP. La linea ad alta pressione della miscela azeotropica TFE-HCl è soggetta altresì ad un Piano di Emergenza PE, con svolgimento di esercitazioni periodiche.
Una volta preparato il TFE gassoso puro, al fine di ridurre il suo inventario nonché il rilascio della quantità residua in eccesso al termine della reazione verso l'abbattimento criogenico, viene adottata una procedura ingegnosa e complessa che

richiede l'interoperabilità estesa macchina-DCS e uomo-conduttore e l'utilizzo ridondante simultaneo di due reattori batch sfasati temporalmente ma strettamente interconnessi sul piano di esercizio. L'esperienza pregressa decennale dei conduttori che interagiscono con il sistema di controllo permette loro di affrontare con successo le variabilità intrinseche della conduzione dei due reattori, ma ciò introduce una criticità soggettiva dove investire le nuove tecnologie risulta promettente per migliorare ulteriormente l'affidabilità dell'intero processo. L'episodio di una lieve inspirazione d'aria per un'accidentale mancanza di tenuta della valvola comandata d'interconnessione dei due reattori, un evento di per sé di difficile rilevamento, ha evidenziato l'utilità dell'implementazione di un modello digitale capace non solo di osservare il progresso della reazione insieme al conduttore utilizzando le misure di pressione e le variabili di processo, ma soprattutto di rendere possibile proiettare al conduttore in largo anticipo il suo andamento futuro.

2. Il processo di sintesi del TCZ

Il complesso processo di sintesi del TCZ è basato sulla conversione di un reagente solido con il TFE gassoso, in una miscela liquida contenente un catalizzatore micronizzato a temperatura di circa -9°C.

Il TetraConaZolo TCZ (CAS 112281-77-3) è un fungicida triazolico, sistemico con un largo spettro di azione. In condizioni d'ambiente si presenta sotto forma di liquido bruno altamente viscoso. La sua formula molecolare e i corrispondenti pittogrammi sono riportati nella figura 1:

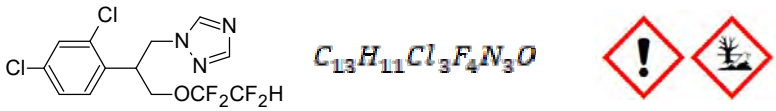


Figura 1. Struttura molecolare e pittogrammi del TCZ

Il TCZ è un potente inibitore della sintesi degli steroli, essenziali alla crescita del patogeno, in moltissime specie fungine e, inoltre, presenta l'assenza di effetti collaterali di tipo fitotossico o fitoregolatore anche a dosaggi sensibilmente superiori a quelli previsti per l'impiego sulle colture trattate [1]. Ha una grande versatilità di impiego, ampia e prolungata protezione della coltura, difatti trova utilizzo nella protezione di diverse colture [1]. Secondo la classificazione ai sensi del Regolamento (CE) N. 1272/2008, il TCZ è nocivo se ingerito o inalato ed è tossico per gli organismi acquatici con effetti di lunga durata [2].

Il reagente gassoso TFE puro (CAS 116-14-3) deve avere un bassissimo contenuto di umidità, azoto e altri incondensabili.



Figura 2. Struttura molecolare e i pittogrammi del TFE

Secondo la suddetta classificazione, il TFE è un gas altamente infiammabile, può esplodere anche in assenza di aria a pressione e/o temperatura elevata, è cancerogeno e può provocare danni agli organi se inalato [3]. A causa della sua elevata reattività, il TFE viene prodotto e stabilizzato in miscela azeotropica con l'acido cloridrico HCl per essere trasportato [4].
Il Regolamento (CE) N. 1272/2008 indica che la miscela azeotropica, oltre ad includere i pericoli derivanti dal TFE, è nocivo se inalato e provocherebbe gravi ustioni cutanee e lesioni oculari [5].



Figura 3. Pittogrammi della miscela azeotropica TFE - HCl

Le operazioni processuali di interesse sono, pertanto, quelle caratterizzate dalla presenza del TFE.
La figura 4 mostra, quindi, schematicamente la sequenza di queste operazioni in cui il TFE viene scaricato dall'Iso-Tank, subisce una laminazione da ca. 40 a ca. 1,5 barg seguita da lavaggio e purificazione prima di essere inviato ai due reattori operanti in accoppiamento parziale a regime alternato.

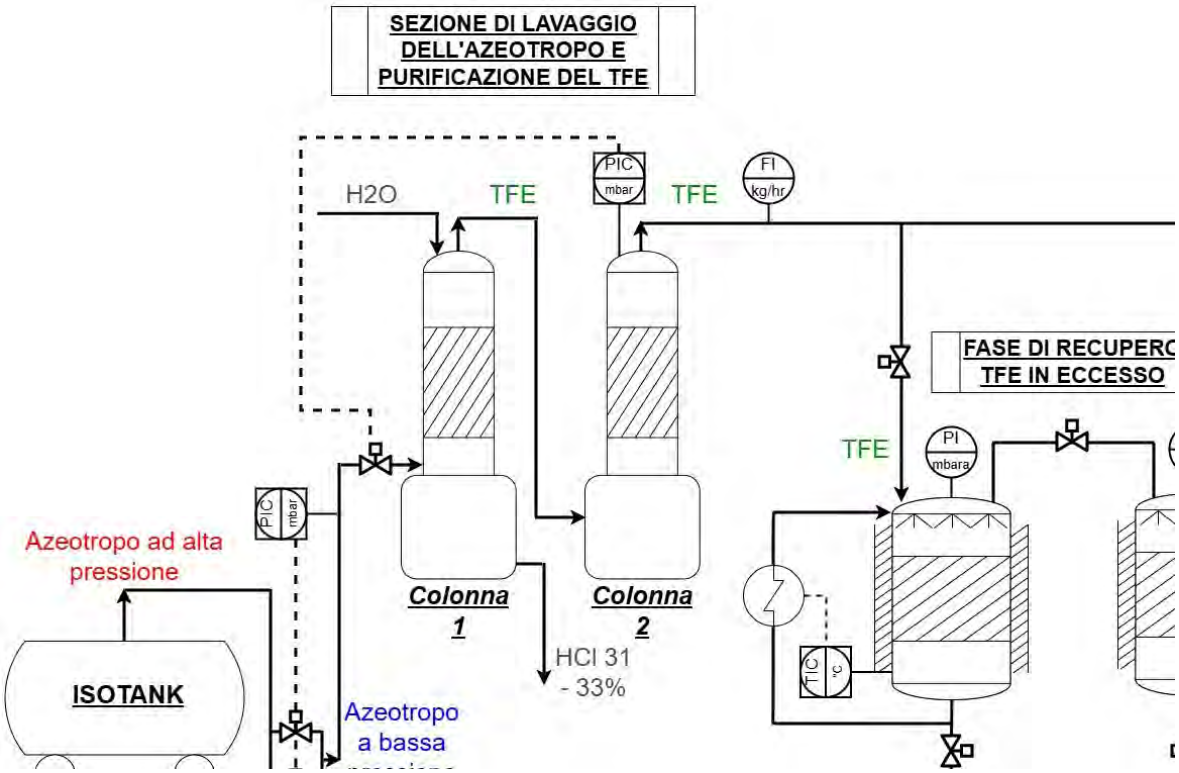


Figura 4. Schema funzionale dell'utilizzo processuale del TFE

Gli operatori, sotto la supervisione del conduttore in campo e quello in sala controllo, iniziano le sequenze delicate di sgancio dell'Iso-Tank esaurito e dell'aggancio di quello pieno seguendo meticolosamente la procedura e la corrispondente checklist, indossando gli opportuni dpi (maschera pieno-facciale, tuta antiacido, guanti, utensili

anti-scintilla, etc.). Inoltre, per garantire una maggiore sicurezza, sono eseguite diverse fasi di inertizzazione e aspirazione a vuoto delle apparecchiature e delle tubazioni connesse.
L'analisi dei rischi HAZOP prevede come evento accidentale il rilascio "breve" della miscela azeotropica per la rottura della tubazione con una probabilità di 3,31E-06 occorrenza/anno [6], riportato dalla descrizione del suo nodo nella figura 5.

Nodo	Descrizione del nodo
1	Scarico del TFE da isocontainer
2	Depurazione del TFE in colonna HCl
3	Depurazione del TFE in colonna NaOH
4	Carico, trasporto e dissoluzione M-alcool
5	Reazione
6	Lavaggio miscela di reazione
7	Stoccaggio miscela di reazione
8	Estrazione del DMSO
9	Stoccaggio prodotti da purificare
10	Purificazione TCZ 1° step
11	Purificazione TCZ 2° step

Figura 5. Nodi per HAZOP dell'impianto TCZ

Le controazioni di mitigazione utilizzano delle celle elettrochimiche in grado di captare i ppm di HCl rilasciati. Queste comandano la centralina antincendio che risponde azionando le sirene, il lampeggiante, le targhe ottico acustiche, ed inviando un segnale di allarme al DCS composto da interblocco e compositore telefonico con l'azionamento delle lame d'acqua a dieci bar nella zona interessata.
Il TFE in miscela azeotropica, dopo laminazione di pressione, subisce una prima operazione di lavaggio in controcorrente con l'acqua demineralizzata nella colonna di assorbimento HCl, seguita dall'operazione di neutralizzazione nella colonna di abbattimento del trascinato HCl con la soluzione NaOH al 5%. Pertanto, il volume del TFE residente nelle colonne costituisce la quantità massima inviabile ai reattori di sintesi TCZ, prima che venga richiesto dal sistema di controllo di pressione un nuovo prelievo dall'Iso-Tank.

2.1 Conduzione della reazione eterogenea di sintesi TCZ

La reazione di sintesi del TCZ è condotta in due reattori semi-batch (R1, R2) come mostrato nella figura 4. Ogni ciclo di produzione TCZ è composto da una successione di operazioni programmate di dissoluzione, reazione e lavaggio ed è governato da sequenze logiche riportate nelle rispettive check-list allo scopo di ridurre al minimo i possibili errori umani e garantendo l'esecuzione delle importanti verifiche preliminari, come la prova di tenuta a vuoto dei reattori. All'avvio, il primo reattore contiene la miscela liquida reagente in atmosfera d'azoto a ca. 50 mbara, mentre il secondo reattore contiene il prodotto della reazione e l'eccesso dei reagenti. Nello spazio di testa del secondo reattore è presente una quantità non trascurabile del TFE non reagito che costituisce l'oggetto del recupero che il conduttore inizia aprendo la

valvola di comunicazione tra i due reattori. Il conduttore osserva scendere la pressione nel primo reattore ed attende, in base alla propria esperienza pregressa, il raggiungimento di un valore minimo dopo circa due ore a valle del suo rapido aumento iniziale. A questo punto per portare a termine la reazione, il conduttore chiude la valvola di connessione tra i reattori e procede all'apertura della valvola di invio TFE puro dalla colonna di abbattimento HCl, con la conseguente riduzione della pressione di quest'ultima che, a sua volta, attiva ulteriore prelievo della miscela azeotropica dall'Iso-Tank. In questa catena di operazioni è fortemente rilevante l'azione soggettiva dei conduttori che cercano di seguire una consolidata procedura operativa. La corrente liquida di ricircolo su ciascun reattore, attraversando un rispettivo scambiatore di calore esterno, è responsabile del mescolamento nella fase liquida, del miglior contatto tra le fasi liquido–gas e del mantenimento omogeneo della temperatura nel reattore durante il progresso della reazione.

3. Implementazione del modello digitale

Le osservazioni adiacenti in una serie temporale di misure fisiche sono tra loro dipendenti. L'analisi di questa dipendenza è di considerevole interesse per costruire uno strumento predittivo affidabile come un modello dinamico collaborativo [7].
Dopo aver visto nel paragrafo 2.1 una sintetica descrizione della procedura di conduzione reattori, si presentano a grandi linee i metodi utilizzati per costruire, identificare, adattare e verificare un modello dinamico per il profilo temporale della pressione nel reattore a partire dalla sua prima fase di esercizio che vede recuperare il TFE residuo dal cielo dell'altro reattore, accoppiato al termine raggiunto della propria fase di reazione. Il reattore pronto per una nuova reazione, precaricato con la soluzione liquida reagente, messo sottovuoto e connesso al secondo reattore, vede arrivare un impulso positivo di pressione di TFE puro all'apertura della valvola di interconnessione tra i due reattori.
Da questo momento i due reattori sono accoppiati, come visibile dai profili di pressione (figura 6) ed operano a massa totale costante. Chiaramente il tasso della riduzione progressiva della pressione totale è indice della cinetica apparente dell'avanzamento della reazione catalitica eterogenea tra il TFE disciolto nel liquido ed il reagente liquido precaricato.
La figura 6 a sinistra riporta nel tempo (in minuti), un andamento tipico delle pressioni normalizzate, registrato nei due reattori accoppiati durante un loro ciclo di lavorazione in normale funzionamento. La curva in tratto rosso indica la pressione nel reattore al termine della reazione, dal cui cielo si vuole recuperare l'eccesso del TFE, mentre quella blu riporta la pressione nel reattore che inizia la propria reazione.
La figura 6 a destra riporta alcuni campioni degli andamenti di pressione registrati in due mesi di esercizio.

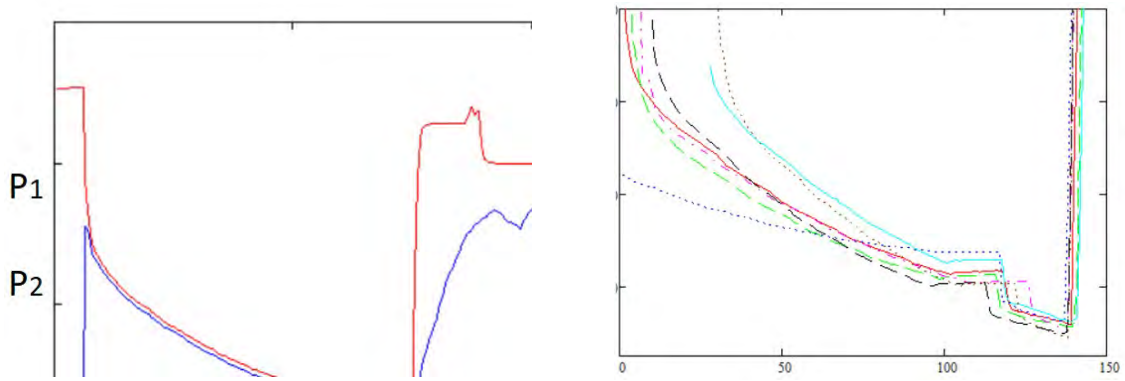


Figura 6. Andamento di pressione vs tempo (min) nei due reattori accoppiati (a sinistra) e profili storici

Per racchiudere a priori, in base alla fisica del processo, un insieme dei vari possibili profili temporali analitici attesi della pressione nel reattore P(t), si è ricorso ad uno studio fenomenologico di matrice reattoristica classica, analizzando vari casi possibili a seconda della validità delle seguenti ipotesi operative:

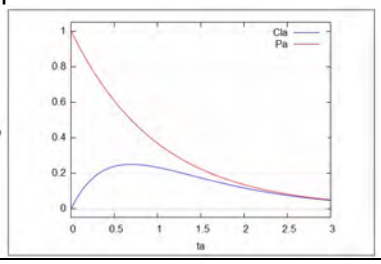
1-Assenza di reazione chimica Modello esponenziale ad un solo parametro	$\frac{P(t)}{P0}=\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\%e^{-\beta\,\tau}+\frac{1}{\beta}$ $\beta=\frac{H\,R\,T\,Vl}{Vv}+1$
2-Reazione istantanea Modello esponenziale ad un solo parametro	$\frac{P(t)}{P0}=\%e^{-\frac{t}{\tau}}$ $\tau=\frac{Vv}{A\,Ha\,kc}$
3-Fase liquida in regime quasi-stazionario. Modello esponenziale a due parametri	$\frac{P(t)}{P0}=\%e^{-\frac{Hb\,t}{(\beta+1)\,\tau}}$ $\left[Hb=\frac{Ha}{\alpha},H=\frac{Ha}{R\,T},\alpha=\frac{Vv}{Vl},\tau=\frac{1}{k},\beta=\frac{Vl\,k}{A\,kc}\right]$
4-Reazione con la cinetica del primo ordine nella fase bulk. 	$Cla(ta)=\frac{2\,\beta\,\%e^{-\frac{(\beta\,\delta+\beta+1)\,ta}{2}}\sinh\left(\frac{ta\sqrt{lambda}}{2}\right)}{\sqrt{lambda}}$ $Pa(ta)=\%e^{-\frac{(\beta\,\delta+\beta+1)\,ta}{2}}\left(\frac{(-\beta\,\delta+2\,(\beta+1)-\beta-1)\sinh\left(\frac{ta\sqrt{lambda}}{2}\right)}{\sqrt{lambda}}+\cosh\left(\frac{ta\sqrt{lambda}}{2}\right)\right)$ $\left[\delta=\frac{Ha}{\alpha},\beta=\frac{A\,kc}{Vl\,k},lambda=\beta^2\,\delta^2+\left(2\,\beta^2-2\,\beta\right)\delta+\beta^2+2\,\beta+1,\tau=\frac{1}{k}\right]$
Lista dei simboli: P, P_0 = pressione, p iniziale; V_l, V_v = volume liquido, V vapore; H = costante Henry; k_c = coefficiente trasferimento materia; k = costante cinetica; A = area gas-liquido	

Tabella 1. Andamenti dei modelli fenomenologici della pressione nei reattori

Modello 1- P(t) in presenza dell'assorbimento di TFE e l'assenza di reazione chimica, il parametro "β" funzione del volume liquido "V_l", del volume vapore "V_v", della temperatura "T" e della costante di Henry "H".

Modello 2- P(t) in presenza di reazione istantanea irreversibile, il parametro "τ" funzione ulteriore dell'area interfacciale gas-liquido "A" e del coefficiente di trasporto materia interfase "k_c".

Modello 3- P(t) fase liquida in regime quasi stazionario, ridefinizione dei parametri "β" e "τ" e la costante di Henry in forma adimensionale "H_a".

Modello 4- P(t) in presenza di reazione lenta limitata alla fase bulk ed in serie con la diffusione nel film liquido, la grafica riporta in blu la concentrazione adimensionale di TFE in fase liquida "Cla" e in rosso la pressione adimensionale della fase vapore in funzione del tempo adimensionale "ta".

Come dimostra la tabella 1, il profilo atteso della pressione nel reattore è caratterizzato in tutti i casi da un decadimento esponenziale ad uno o due parametri, durante la fase del recupero di TFE.

3.1 Analisi dei dati storici e modello lineare tempo invariante del terzo ordine

Per ragioni di standardizzazione, semplicità computazionale e in prospettiva di una futura estensione del modello, nonché sulla base dell'interpretazione delle risposte dinamiche dei modelli fenomenologici riportate in Tabella 1, si è scelto di valutare l'adeguatezza di modelli lineari tempo-invarianti (LTI) di ordine progressivamente crescente per descrivere la dinamica della fase operativa di recupero dell'eccesso di TFE. A tal fine, i profili di pressione dei reattori relativi a due mesi di esercizio continuo (figura 6) sono stati analizzati mediante il toolbox "System Identification" di Matlab®. L'analisi ha evidenziato l'adeguatezza di un modello LTI del terzo ordine. Il mantenimento di un ordine di modello il più basso possibile consente infatti di ridurre la richiesta di potenza di calcolo in fase di utilizzo online e, al contempo, di facilitare un eventuale incremento dell'ordine del modello con interventi minimi sul codice qualora necessario.

3.2 Preparazione AI-assistita del codice di calcolo in Python3

Il sistema DCS DeltaV™ in dotazione all'impianto, come la maggior parte dei sistemi di controllo distribuito industriali, integra strumenti avanzati per l'implementazione di strategie di controllo sofisticate e standardizzate. Tuttavia, dal punto di vista dell'utente finale, tali strumenti si configurano spesso come soluzioni proprietarie, caratterizzate da una documentazione limitata e da una ridotta possibilità di personalizzazione. Ne consegue che l'implementazione o la modifica di funzioni di controllo avanzate richiede frequentemente il ricorso al supporto della casa madre, con costi di assistenza dedicati da preventivare. Questo approccio risulta penalizzante per l'accrescimento del patrimonio di know-how aziendale e rappresenta una delle principali cause dell'abbandono precoce di iniziative interne di ricerca, innovazione e rinnovo dei processi.

In un'intervista, J. McAfee [8] osserva come le tecnologie digitali stiano amplificando le capacità cognitive umane in modo analogo a quanto la macchina a vapore fece per la potenza muscolare durante la rivoluzione industriale. In tale contesto, l'avvento dell'intelligenza artificiale sta progressivamente modificando questo paradigma, consentendo alle aziende di introdurre tecnologie digitali, esplorare nuove soluzioni e sviluppare competenze interne con costi estremamente contenuti.

L’obiettivo principale del presente lavoro è mostrare un esempio concreto di preparazione assistita dall’intelligenza artificiale di un codice di calcolo, sviluppato in Python3, per l’identificazione di un sistema lineare tempo-invariante (LTI) del terzo ordine. Il codice è strutturato in modo modulare, ben documentato ed estendibile in funzione di esigenze future. Pur rimandando alla vasta letteratura tecnico-scientifica per gli aspetti teorici più avanzati [7, 9], è opportuno sottolineare che la progettazione di modelli dinamici predittivi è intrinsecamente legata al problema dell’identificazione di sistema, ovvero alla determinazione di una legge che consenta, a partire dall’elaborazione dei dati storici di una variabile, di formulare previsioni attendibili del suo andamento futuro [9].
La risoluzione del problema di identificazione dinamica richiede, oltre a solide basi teoriche, una serie di attività pratiche quali la progettazione dell’esperimento di identificazione, la raccolta dei dati, la scelta della classe di modelli, la definizione dei criteri di adeguatezza e la validazione del modello. Si tratta di un ambito di ricerca consolidato, sviluppatosi a partire dalla Seconda guerra mondiale e divenuto nel tempo centrale per il progresso industriale e tecnologico.
Nel caso specifico analizzato, la normale procedura operativa di conduzione dei due reattori, unitamente alle misure di temperatura e pressione fornite dalla sensoristica di campo e dal sistema DCS, include già implicitamente l’esperimento di identificazione. La scelta del segnale di ingresso e di risposta, rappresentata dalla pressione accoppiata dei reattori, il tempo di campionamento dell’ordine del minuto, adeguato rispetto alla durata complessiva del processo, e la risposta impulsiva generata dall’apertura della valvola di interconnessione tra un reattore in pressione e uno inizialmente sottovuoto, rendono infatti possibile stimare, per ogni ciclo produttivo, una identificazione dinamica preliminare del processo.
In tale contesto, la prima richiesta formulata all’intelligenza artificiale è stata sintetizzata nella seguente istruzione:
“Write a Python code that reads the impulse response of temporal experimental data, applies a system identification algorithm to determine the parameters of a third-order LTI system using the first part of the data, and finally forecasts the model output to compare it with the remaining experimental data.”
In un tempo dell’ordine di pochi minuti, l’AI ha prodotto una bozza funzionale di codice Python 3, strutturato secondo il paradigma della programmazione a oggetti e composto da circa un migliaio di righe. La risposta dell’AI si è conclusa, significativamente, con l’affermazione: *“Here’s a comprehensive Python code for system identification from impulse response data, specifically designed for third-order LTI systems.”*
Dal punto di vista qualitativo, il codice generato presenta una struttura particolarmente efficiente (figura 7), grazie all’impiego estensivo di librerie open source ampiamente consolidate quali *NumPy*, *SciPy* (moduli *signal*, *optimize*, *linalg*), *Matplotlib* per la visualizzazione grafica e *Pandas* per la gestione dei dati. La logica del programma prevede il caricamento dei dati sperimentali, il loro pretrattamento

statistico opzionale (smoothing, rimozione del valore medio), la stima delle derivate mediante filtri di Savitzky–Golay o metodi spettrali basati su FFT e, nel nucleo computazionale, l'identificazione del modello tramite algoritmi di tipo *least squares*, *SVD* o *optimization*, con possibilità di regolarizzazione e normalizzazione dei dati.
Come per qualsiasi codice complesso, è stato necessario un successivo stadio di debugging, condotto anch'esso in collaborazione con l'intelligenza artificiale, per l'individuazione e la correzione di errori residui. Da quanto illustrato emerge chiaramente il potenziale oggi a disposizione di un utente tecnicamente competente e motivato, in grado di sviluppare in tempi contenuti algoritmi sempre più avanzati: dall'identificazione ricorsiva non parametrica, ai modelli tempo-varianti con filtraggio, fino all'implementazione di strategie di controllo adattativo e predittivo complete. Tali strumenti consentono lo sviluppo di soluzioni altamente calibrate e personalizzate, mirate alle specifiche esigenze di conduzione, controllo e gestione dei processi industriali.
La Figura 7 riporta il confronto tra il profilo di pressione previsto dal modello (linea rossa) ottenuta da un numero limitato di tre parametri identificati, i valori di pressione misurati nel reattore (simboli "+" in blu) e gli stessi dati sperimentali pretrattati e filtrati per la rimozione degli inevitabili errori di misura e del rumore bianco (linea verde), utilizzati per l'identificazione parametrica del modello. Il 50% delle misure di pressione disponibili è stato impiegato per l'identificazione del modello, mentre la restante parte è stata riservata alla fase di validazione, consentendo il confronto delle previsioni con valori sperimentali non utilizzati in fase di taratura. Come mostrato in figura, il modello è in grado di seguire accuratamente l'andamento delle misure sperimentali e di rilevare lo scostamento indotto da una perturbazione deliberatamente introdotta dal conduttore verso la fine della prima fase batch della reazione, consistente in una rapida chiusura e successiva apertura della valvola di interconnessione dei reattori.
Inoltre, l'identificazione parametrica, in questo caso della pressione nel reattore, costituisce una raccolta strutturata e filtrata dell'informazione, pronta all'analisi di ottimizzazione e standardizzazione del consumo del TFE, migliorando la ricerca delle procedure e delle condizioni operative ottimali.

4. Conclusioni

Lo studio ha dimostrato come l'integrazione dell'intelligenza artificiale con software libero ed open-source consenta lo sviluppo di un gemello digitale collaborativo a supporto della conduzione dei reattori batch, permettendo la previsione della pressione di esercizio e l'individuazione tempestiva di potenziali anomalie. La possibile raccolta strutturata ulteriore dei dati di processo favorisce inoltre la standardizzazione operativa e l'ottimizzazione del consumo di TFE. Al di là del contributo all'accrescimento del know-how aziendale, il principale elemento innovativo risiede nella trasferibilità della metodologia utilizzata, ad altri processi

industriali, con potenziali benefici in termini di efficienza operativa e sostenibilità economico-ambientale.

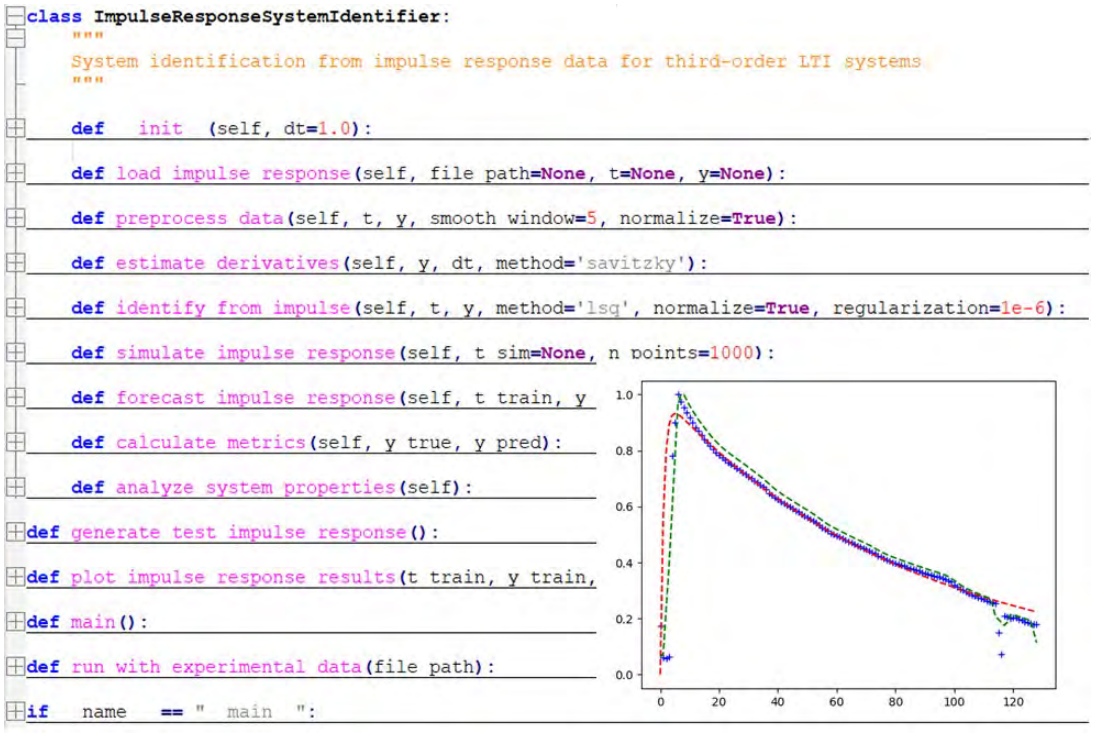


Figura 5. Struttura modulare del codice e la sua convalidazione dal confronto dei profili adimensionali di pressione vs tempo (min)

Ringraziamenti

Si ringraziano gli ingg. T. Guidi e M. Toma di Isagro S.p.a per il prezioso contributo che hanno fornito per la stesura definitiva del presente lavoro.

Bibliografia e sitografia

[1] L. Mirenna, O. Puppin, E. Spagni, *"Tetraconazolo – Nuovo fungicida triazolico sistemico ad ampio spettro di azione. Sue caratteristiche e risultati di quattro anni di prove in Italia"* Giornate fitopatologiche. Atti (Pisa, 23-27 aprile 1990), pp 87-96.

[2] Scheda di dati di sicurezza ai sensi del regolamento 2020/878 del Tetraconazolo, stampato il 20/03/2023.

[3] Scheda di dati di sicurezza ai sensi del regolamento 2020/878 del tetrafluoroetilene, data di revisione il 29/11/2024.

[4] F. Ferrero, R. Zeps, M. Kluge, V. Schröder, Tom Spoormaker "*The Explosive Decomposition of Tetrafluoroethylene: Large Scale Tests and Simulations*" CET Journal, Vol. 31, 2013.

[5] Scheda di dati di sicurezza ai sensi del regolamento 2020/878 della miscela azeotropica di tetrafluoroetilene e idrogeno cloruro, data di revisione il 23/07/2025.

[6] Analisi di operabilità dell'impianto TCZ, documentazione ad uso interno del personale Isagro, contatto Fcarmignani@gowanco.com.

[7] George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel, Greta M. Ljung, *"Time series analysis: Forecasting and control"* 5ed, John Wiley & Sons inc.
[8] https://hbr.org/2015/06/the-great-decoupling.
[9] S. Bittanti, *"Teoria della Predizione e del Filtraggio"*, Editrice Pitagora, Bologna, 1990, ISBN 8E-371-10924.

Fenomeni di instabilità dell'efflusso nelle valvole di sicurezza: Analisi e Mitigazione

D. Nicotra[1], A. Carro[2], G. Vaccaro[3]

[1]Ponterosso Comart SpA
[2]Inail - UOT di Forlì
[3]Inail - UOT di Palermo

Sommario
Le valvole di sicurezza rappresentano un elemento cruciale nei sistemi a pressione, garantendo la protezione degli impianti e delle persone in condizioni anomale di esercizio. Tuttavia, durante l'apertura, queste valvole possono essere soggette a fenomeni di instabilità dell'efflusso, che possono compromettere sia l'efficacia del dispositivo sia l'integrità dell'impianto. Queste instabilità, spesso caratterizzate da oscillazioni rapide di pressione e portata, possono essere causate da una complessa interazione tra il fluido, la soluzione impiantistica adottata e le condizioni al contorno. La memoria proporrà un'analisi critica dei principali meccanismi responsabili dell'instabilità dell'efflusso, con particolare attenzione ai fenomeni di cycling, fluttering e chattering, evidenziando le conseguenze di tali fenomeni e le possibili azioni mitigative.
Verranno inoltre illustrati casi presenti in letteratura in cui fenomeni di instabilità dell'efflusso dagli accessori di sicurezza hanno causato perdite di contenimento di materiali infiammabili ed ulteriori conseguenze per effetti domino nel sito produttivo. Verrà inoltre discussa l'efficacia di alcune strategie di mitigazione, tra cui modifiche impiantistiche, e ottimizzazione delle condizioni di installazione.
Si evidenzierà l'importanza di una corretta progettazione integrata della valvola di sicurezza, del sistema a pressione e del sistema di scarico, rappresentando il quadro normativo e le linee guida utili per la selezione e la gestione operativa delle valvole di sicurezza in contesti industriali ad alto rischio. Il lavoro si inserisce nell'ottica di un miglioramento continuo della sicurezza impiantistica, contribuendo alla comprensione e alla prevenzione di fenomeni dinamici ancora poco prevedibili.

0. Simbologia

- $m = \ massa\ totale\ componenti\ mobili\ della\ valvola\ di\ sicurezza$
- $k = \ costante\ di\ smorzameno\ viscoso$
- $s = costante\ elastica\ molla$
- $A_P = area\ orifizio,\ \ sezione\ di\ ingresso\ fluido$
- $p_v = pressione\ in\ ingresso\ valvola$
- $p_b = contropressione\ totale\ (imposta + generata)$
- $\dot{m} = portata\ di\ efflusso$
- $v_{in} = velocità\ di\ ingresso\ all'orifizio$
- $v_{out} = velocità\ di\ uscita\ dall'orifizio$
- $\theta = jet\ angle,\ \ angolo\ tra\ la\ direzione\ di\ ingresso\ e\ \ uscita\ dell'efflusso\ dall'orifizio$
- $x = coordinata\ di\ alzata\ dell'otturatore\ (\ x = 0\ \ valvola\ chiusa)$

- $\dot{x}, \ddot{x} = rispettivamente,\ velocità\ di\ alzata\ ed\ accelerazione$
- $\omega = pulsazione\ \ dell'oscillazione$
- $t = tempo$
- $\Phi = fase\ iniziale$
- $P_{set} = pressione\ di\ taratura\ \ valvola\ di\ sicurezza$
- $\Delta P_{inlet} = caduta\ di\ pressione\ \ del\ condotto\ di\ ingreso\ valvola$
- $p_r = \ pressione\ attrezzatura\ protetta$
- $\Delta P_{reseat} = \Delta P_{blowdown} = \ caduta\ di\ pressione\ di\ richiusura\ valvola$
- $\Delta \mathrm{P}_{\mathrm{overpressure}} = sovrapressione\ \ di\ \ scarico$

1. Introduzione

L'importanza del corretto dimensionamento delle valvole di sicurezza negli impianti a pressione è ben nota, poiché queste garantiscono sia la sicurezza operativa degli impianti che l'incolumità degli operatori. Alla luce degli eventi di seguito riportati è auspicabile eseguire un'accurata indagine al fine di salvaguardare l'integrità delle valvole di sicurezza.

1. 19 maggio 1985 Incendio presso l'impianto etilene di Priolo (SR): il guasto di una sonda termometrica, ha innescato l'isolamento della sezione di idrogenazione collocata nella area fredda dell'impianto. Durante il tentativo degli operatori di riprendere il controllo dei sistemi, sono intervenute le valvole di sicurezza, quasi contemporaneamente un incendio si è innescato nelle vicinanze della colonna de-etanizzatrice. La sorgente dell'incendio è stata individuata nelle tubazioni di ingresso alle valvole di sicurezza. Le eccessive vibrazioni della PSV[1] in chattering hanno causato la fuga di combustibile dagli accoppiamenti flangiati [1].
2. 13 agosto 2015 Chempark Zaluzi, Republica Ceca, presso l'impianto di Propilene: la mancanza di acqua (LOC[2]) alla sezione di raffreddamento di testa separatrice e conseguente mancanza di reflusso in colonna, ha provocato l'apertura delle PSV di testa in chattering. Le vibrazioni avrebbero indotto la perdita di fluido infiammabile dagli accoppiamenti flangiati della valvola con conseguente esplosione ed incendio [2].

I due episodi citati sono esempi su come i fenomeni di instabilità delle PSV possono essere le cause di eventi incidentali e dar luogo a possibili effetti domino.

2. Fenomeni di instabilità delle valvole di sicurezza

In generale, i fenomeni di instabilità delle valvole di sicurezza sono già noti in ambito tecnico come riportato nella normativa di settore (API 520, EN-ISO 4126). Per fenomeni di instabilità si intendono tutti quei casi in cui la valvola di sicurezza assume un comportamento dinamico, e durante il suo azionamento, i parametri caratteristici dell'efflusso variano ciclicamente in funzione del tempo.

[1] PSV: Pressure safety valve, valvola di sicurezza

[2] LOC: Loss of Cooling

In accordo al modello sviluppato da Hös & Champneys (2017) [3], schematizzato in Figura 1, lo studio di queste tipologie di fenomeni richiede un'analisi di non facile risoluzione, in quanto trattasi di un sistema complesso, accoppiato dal punto di vista meccanico e fluidodinamico in tutti e tre gli elementi del modello: attrezzatura protetta, PSV, e sistema di scarico.

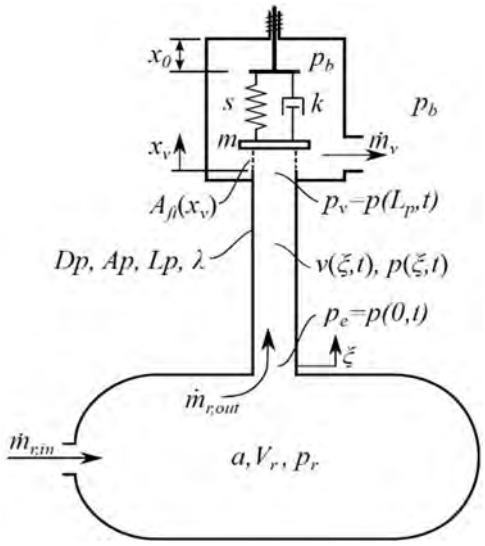


Figura 1. Modello dinamico PSV-Sistema protetto-scarico [3]

Il repentino susseguirsi di fasi di apertura e chiusura dell'otturatore sul boccaglio innesca vibrazioni e la formazione di onde di pressione sia nel condotto di ingresso della valvola che in quello di uscita.
Ne deriva che un'analisi accurata in fase progettuale, "a priori", diviene impossibile per la grande quantità di variabili da analizzare.

2.1 Classificazione dei fenomeni di instabilità

Sulla base della frequenza di oscillazione è possibile suddividere questi fenomeni in quattro principali categorie, il cui principale criterio di classificazione è la frequenza di oscillazione dello stelo vedasi Tabella 1 e Figura 2.

	Frequenze	**Descrizione**
Jump	Occasionale	Brusca variazione della posizione dell'otturatore in posizione di alzata intermedia, sia in apertura che in chiusura, senza urti con il boccaglio. Tipicamente non presenta interazioni rischiose per l'integrità della valvola.
Cycling	~0.1<f<2÷3Hz	Alternanza di aperture e chiusure, dovuta principalmente alla velocità di depressurizzazione del sistema maggiore rispetto all'aumento della sovrappressione di scarico della PSV. La valvola nelle fasi iniziali di apertura (stelo non in posizione di massima alzata) provoca la fuoriuscita di una portata di fluido tale per cui la pressione nel recipiente protetto diminuisce più rapidamente rispetto al rateo di

		incremento. Durante il transitorio vi è contatto, e quindi urto, tra otturatore e ugello del dispositivo di sicurezza.
Flutter	2÷3<f<10Hz	Caratterizzato da una frequenza maggiore, ma in contrapposizione con il precedente fenomeno non vi è urto tra boccaglio e disco; pertanto, si può avere la creazione di vibrazioni di minore entità e le parti maggiormente sollecitate sono limitate al solo soffietto con rarissime perdite di tenuta dallo stelo e/o pistone di bilanciamento (nei casi di valvole bilanciate)
Chatter	f>10Hz	Con l'aumento della frequenza si ha l'aumento dell'energia cinetica dello stelo che urtando ripetutamente con il boccaglio ne compromette la tenuta. Stelo, disco, accessori di bilanciamento e accessori di tenuta risultano estremamente sollecitati. Le parti mobili della valvola oscillano in sincronia con la frequenza dell'onda di depressurizzazione che si crea nel sistema protetto, la cui ampiezza oscilla tra la pressione di scatto e di re-seat. Si instaura così un moto oscillatorio in regime stazionario.

Tabella 1. Classificazione dei fenomeni di instabilità [3], [4]

Dalla Tabella 1 si evince come il chatter (o chattering) della valvola è il fenomeno che presenta le maggiori criticità, sia in relazione all'integrità della valvola stessa, che in

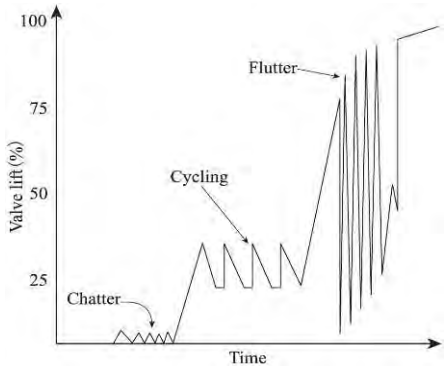


Figura 2. Time vs Apertura; Classificazione instabilità [4]

considerazione dei sistemi a pressione ad essa connessi. Le vibrazioni indotte dagli urti ciclici sollecitano: tubazioni, accoppiamenti flangiati e supporti compromettendone il servizio.

2.2 Cause

Analisi e modelli più rigorosi sono presenti in letteratura (vedasi ref. [3][4][5]), ma osservando in maniera più pratica il modello proposto in figura 1, il bilancio dinamico delle forze agenti sul disco della PSV può essere definito come in eq. (1) & (2) ref. [3]:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + s(x - x_0) = F_{fluido} + F_{gravitazionale} \quad (1)$$

$$F_{fluido} = A_p(p_v(t) - p_b(t)) + \dot{m}_v|v_{in}| + \dot{m}_v|v_{out}|cos\theta \quad (2)$$

Riferendosi alla Figura 1, con A_p si intende l'area della sezione di ingresso della valvola, p_v e p_b sono rispettivamente la pressione alla valvola durante l'efflusso (~pressione di set) e la backpressure, v_{in} e v_{out} velocità di ingresso e uscita ed infine θ l'angolo del getto (jet angle) tra ingresso PSV e la direzione di uscita dal boccaglio della valvola (vedasi Figura 3) [5].

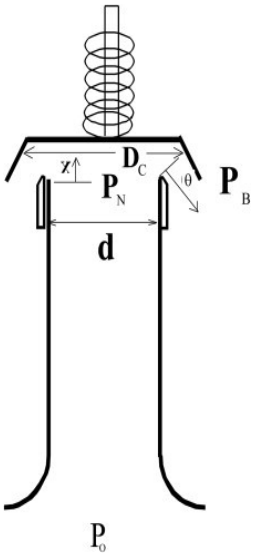


Figura 3. Dettaglio boccaglio-otturatore ref. [5]

Osservando i termini dipendenti dal tempo, si nota che le variabili principali sono la pressione al terminale della PSV e la contropressione, le quali sono strettamente legate con l'efflusso della valvola stessa.
Quando il contributo di un aumento della backpressure e la diminuzione della pressione di valvola sommati ai contributi delle quantità di moto e forza peso raggiungono lo stesso ordine di grandezza del termine di smorzamento viscoso ($k\dot{x}$), il modello considerato acquisisce la caratteristica di un pendolo semplice, eq. (3) e (4):

$$[k\dot{x}] \sim [A_p\big(p_v(t) - p_b(t)\big) + \dot{m}_v|v_{in}| + \dot{m}_v|v_{out}|cos\theta + F_{gravitazionale}] \quad (3)$$

$$m\ddot{x} + s(x - x_0) = 0 \rightarrow x(t) = B * cos\,(\omega t + \phi) \rightarrow \omega = \sqrt{s/m} \quad (4)$$

Dal punto di vista pratico si possono distinguere le principali concause:
1. Sovradimensionamento della PSV
2. Eccessive perdite di carico in ingresso alla PSV
3. Sottostima della contropressione

2.2.1 Sovradimensionamento della PSV

Per sovradimensionamento della PSV si intende l'adozione di una valvola di sicurezza con un orifizio più ampio di quanto necessario allo smaltimento della portata che genera la sovrappressione.

In caso di più scenari di intervento la selezione delle PSV è basata sulla scelta dell'orifizio necessario per lo smaltimento dell'efflusso con portata volumetrica maggiore.

Tuttavia, durante le cause di intervento meno gravose, per le quali occorrerebbe una sezione dell'orifizio nettamente inferiore, la PSV risulterebbe sovradimensionata con la possibilità di innesco dei fenomeni ciclici.

Il sovradimensionamento della valvola di sicurezza si ha anche per "errata manovra", quando si è in presenza di due o più valvole di sicurezza identiche, una in servizio e le altre di riserva. Se si allineassero erroneamente al sistema a pressione un numero di valvole di sicurezza superiore a quanto previsto da progetto risulterebbe di fatto installata una sezione di efflusso sovradimensionata per il servizio da ottemperare.

2.2.2 Eccessive perdite di carico in ingresso PSV

All'atto dello scatto della valvola di sicurezza, (cioè nell'istante in cui $p_v=p_r=p_{set}$) con l'incipiente moto del fluido nel piping di alimento al dispositivo, si genera una caduta di pressione $\Delta p_{inlet,}$ tale per cui $p_r+\Delta p_{inlet} = p_v$; se con l'incremento dell'efflusso si raggiunge la condizione $\Delta p_{inlet} \simeq \Delta p_{reseat}$ ($\Delta p_{reseat} \sim \Delta p_{overpressure}$; tipicamente $\sim 0.1 p_{set}$), l'otturatore si richiude, si ristabilisce l'aumento di pressione nel sistema protetto e si innesca il comportamento ciclico.

La valutazione delle perdite di carico nei condotti di ingresso alla PSV acquisisce un aspetto di primaria importanza, peraltro già adottata come prescrizione nella normativa di settore (API-520 & ISO-4126).

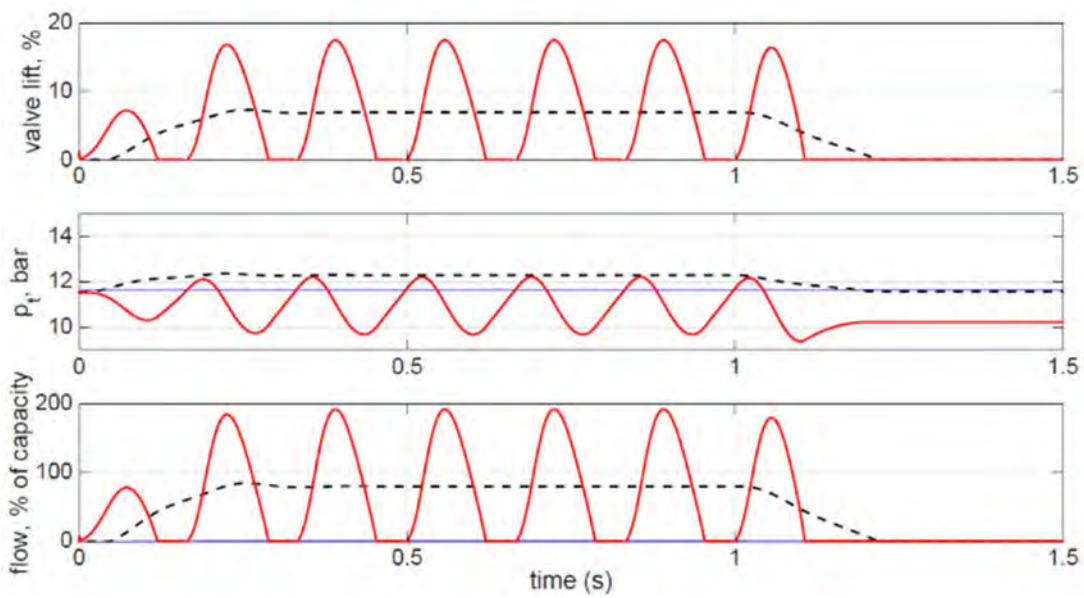


Figura 4. Risultati del modello usando l'instabilità di Helmoltz; il tratteggio indica il caso in cui la ∆pinlet sia trascurata [3].

2.2.3 Sottostima della backpressure

L'influenza della contropressione totale (imposta più generata) si registra maggiormente nell'analisi di valvole convenzionali, tale pressione agendo direttamente sull'area del disco tende a chiudere la valvola, influenzandone la capacità di scarico e nel caso estremo terminando l'efflusso.
La pressione di richiusura tipicamente espressa come frazione della pressione di set (tipicamente Δp_{reseat} ~0.1p_{set} = $\Delta P_{overpressure}$), teoricamente si ha quando:

$$p_{reseat} = (\, p_{set} - \Delta P_{blowdown}) \sim p_{set} * 0.9 \qquad (5)$$

In condizioni statiche il bilancio delle forze agenti sull'otturatore è riportato in eq. (6)

$$A_p * (p_v - p_b) = s(x - x_0) \qquad (6)$$

Esprimendo la p_v in funzione della pressione di taratura:

$$A_p * \left(p_{set} + \Delta p_{overpressure} - p_b\right) = s(x - x_0) \qquad (7)$$

Nei casi in cui la contropressione p_b assume valori superiori al 10% della taratura, l'otturatore tende a richiudersi in quanto annulla il termine di sovrapressione di scarico.
La cattiva stima della contropressione nei sistemi di scarico (es. circuiti blowdown), oltre a errori progettuali, può essere ricondotta alla presenza di scarichi multipli contemporanei, presenza di battenti liquidi nei condotti, accumuli di condense o in particolari casi, riguardanti efflussi multifase, in cui si hanno fenomeni evaporativi allo scarico, i quali aumentano localmente la pressione.
Il caso estremo riguarda la situazione in cui nei condotti di scarico della PSV, per effetto dell'espansione del fluido (caso di efflusso gassoso) si instaura un "choked flow". La velocità nel piping di uscita raggiunge velocità prossime a quella sonica, creando una contropressione critica che può raggiungere valori nettamente superiori rispetto alla backpressure che causa la richiusura della PSV, innescando fenomeni ciclici e un aumento delle sollecitazioni a tutti i componenti meccanici del sistema.

3. Possibili mitigazioni ai fenomeni di chattering

Le numerose variabili coinvolte, spesso dipendenti tra loro, non permettono lo studio deterministico del problema e quindi una stima a priori (in fase progettuale) dei parametri di innesco delle ciclicità.
Lo studio del chattering attraverso l'applicazione di metodi statistici è incompatibile ai fini della progettazione, in quanto presenta oltre alle criticità relative all'interdipendenza dei parametri caratteristici, degli elevati costi computazionali, non giustificabili per la verifica di eventi comunque rari.

$$\dot{m} \propto v_{in}; \quad \Delta P_{inlet} \propto v_{in}^2; \quad \mathrm{P_{backpressure}} \propto v_{out}^2 \rightarrow v_{out} \propto \dot{m}; \quad (8)$$

Pertanto, durante la fase progettuale le possibili mitigazioni più convenienti ed efficaci in un confronto costi-benefici, possono essere dedotte dalle norme di settore (API 520, ISO-4126 e API 521), le quali definiscono alcune prescrizioni utili:

1. Verificare e limitare la caduta di pressione nei condotti di ingresso PSV al 3% della pressione di taratura.
2. Verificare la contropressione generata e quindi verificare che la contropressione totale sia limitata a valori inferiori al 10% della pressione di set della valvola (per valvole convenzionali).
3. Opportuna scelta della tipologia di valvole di sicurezza: bilanciate con soffietto e/o pistone di bilanciamento, o valvole pilotate.

Gli accessori di bilanciamento permettono di rendere l'apertura della valvola indipendente dalla contropressione.

In caso di adozione di valvole POSV[3], oltre all'insensibilità dello scatto alla contropressione, la linea di sensing, dedicata alla presa di pressione direttamente sull'attrezzatura protetta (Es. Serbatoi, collettori principali ecc.), evita aperture instabili dovute alle perdite di carico presenti nelle tubazioni in ingresso valvola.

Il vantaggio nella scelta delle valvole pilotate (POSV) riguarda la loro azione modulante, che permette l'alzata dell'otturatore proporzionale alla sovrappressione, evitando uno scarico eccessivo se non necessario.

4. Adozione di PSV multiple: non è una soluzione generale, ma valutabile caso per caso dal progettista di impianto.

Durante le indagini di sicurezza della fase progettuale (Es. Hazop, Fmea, ecc.) in cui si indentificano le possibili cause di sovrappressione, per le quali si generano efflussi di scarico dagli accessori di sicurezza con valori di portate volumetriche nettamente differenti, il progettista di impianto, laddove possibile, può scegliere l'adozione di più valvole di sicurezza con degli idonei set di taratura differenti. Di seguito si riporta un esempio:

Causa di int.1	**Portata [kg/h]**	**T [°C]**	**Densità [kg/m^3]**	**Viscosità [cP]**		**Area 1 [cm^2]**
Rottura tubi (Efflusso liquido)	170000	100	784	1,7		91,115
Causa di int. 2	**Portata [kg/h]**	**T [°C]**	**Cp/Cv**	**Fatt. Compr.**	**PM [kg/kmol]**	**Area 2 [cm^2]**
Fire (Efflusso gas)	11778	377	1,03	0.83	225	18,305

Tabella 2. Esempio dimensionamento PSV per più cause di intervento

Secondo quanto riportato in Tabella 2 è corretto considerare lo scenario di intervento 1 come dimensionante, pertanto scegliere l'installazione di una PSV equipaggiata con

[3] POSV: Pilot Operated Safety Valve, valvola di sicurezza pilotata

orifizio di sezione uguale o maggiore all'area "1", ma tenendo in considerazione che la seconda causa necessita un'area di efflusso nettamente inferiore ed è caratterizzata da una probabilità di accadimento qualitativamente superiore (Es. in raffinerie: Fire ~10^{-1} Vs Tube failure~10^{-3} eventi/anno [6]), risulterebbe opportuno installare due valvole di sicurezza per la protezione delle attrezzature a pressione.
In questo caso, il progettista potrebbe adottare la soluzione in Tabella 3:

Causa di int.1	**PSV A** 6"x8" **+** **PSV B** 3"x4"	**Pset A [barg]**	**PSV Overpressure**	**Area Orifizio A+B [cm^2]**
Rottura tubi (Efflusso liquido)		3,5	10%	Area A+ Area B 77,91+20.1=98.01
Causa di int. 2	**PSV B** 3"x4"	**Pset B [barg]**	**PSV Overpressure**	**Area Orifizio B [cm^2]**
Fire (Efflusso gas)		3,2	10%	20,1

Tabella 3. Scelta delle PSV

Nell'esempio riportato, la protezione nel caso di "incendio" è assicurata dalla PSV-B, di dimensioni e set minori; invece nel caso di rottura tubi la protezione è garantita dall'intervento in sequenza della PSV-B e della PSV-A, la quale interviene solo alla massima alzata della prima valvola, creando una sezione di efflusso adeguata a smaltire la portata dimensionante.
L'utilizzo di questa tecnica non è generalizzabile, ma deve essere valutata ad hoc dal progettista, anche sulla base di una stima qualitativa delle probabilità di accadimento degli scenari e della realizzabilità in impianto.
In ultima analisi, occorre citare le possibili soluzioni mitigative per l'errato e contemporaneo allineamento di più valvole di sicurezza.
L'installazione di dispositivi di interblocco meccanico come "change over /interlock", seppur oramai in disuso per eccessivi oneri di acquisto e manutentivi, rappresentano delle soluzioni impiantistiche che permettono l'inserimento di un dispositivo di sicurezza e contestualmente escluderne un altro. L'utilizzo di queste soluzioni impiantistiche, per ragioni economiche e manutentive è stato sostituito da istruzioni operative, le quali potrebbero essere trascurate per un eccesso di solerzia degli operatori, i quali erroneamente credono di agire a favore di una maggiore sicurezza.

4. Conclusioni

Alla luce delle cause dei fenomeni di instabilità e dei metodi di prevenzione, la buona regola di progettazione dettata dalle norme tecniche di settore è uno strumento utile, per limitare l'insorgenza delle problematiche causate dalle eccessive perdite di pressione in ingresso valvola e dall'eccessiva back pressure. In questi casi una

scrupolosa attività di studio “a priori” permette di raggiungere ottime stime delle perdite di carico. In fase di progettazione, i software di calcolo fluidodinamico accoppiati con i modelli 3D degli impianti permettono la simulazione di svariati scenari in tempi brevi e relativamente poco costosi, raggiungendo ottime accuratezze rispetto a quanto poi si potrà riscontrare nella realtà operativa.
Altre misure come l’adozione di PSV multiple o altre soluzioni impiantistiche sono lasciate al progettista, il quale deve tenere in considerazione sia aspetti di natura tecnica che economica.
Le azioni mitigative lasciate all’azione del personale operativo, come il corretto numero di dispositivi di sicurezza da allineare al sistema protetto, devono essere accompagnate da un‘opportuna formazione, che non si deve limitare alla sola modalità di manovra in impianto, ma includere le motivazioni, ed eventualmente, i criteri di scelta del progettista per far sì che gli operatori prendano maggiore coscienza dei rischi connessi alle loro azioni per la salvaguardia degli asset di impianto e dei luoghi di lavoro.

Bibliografia e sitografia

[1] https://www.epsc.be - CHATTERING PSV (30/01/2026)
[2] Herink T. et al. "Propylene column pressure relief valves chattering resulting in explosion and fire of the Steam Cracker unit." Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022 vol. 74: 104658.
[3] Hős, C. J., Champneys, A. R., & al., P. K. Dynamic behaviour of direct spring loaded pressure relief valves connected do inlet piping: IV review and recommendations. Journal of Loss prevention in the process industries, 2017, vol. 48; p. 270-288.
[4] Ma, Wei & Ma, Fei & Guo, Rong. Experimental research on the dynamic instability characteristic of a pressure relief valve. Advances in Mechanical Engineering. 2019 vol. 11; p.1-13
[5] Darby R. The dynamic response of pressure relief valves in vapor or gas service, part I: Mathematical model. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. vol.26 p.1262-1268
[6] Energy institute. Guidelines for the safe design and operation of shell and tube heat exchangers to with stand the impact of tube failure. Second edition 2015. London.
[7] Frommann O., Friedel L., Analysis of safety relief valve chatter induced by pressure waves in gas flow. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1998 vol. 11 I-4 p.279-290.
[8] Smith D., Burgess J., Powers C., Relief device inlet piping: beyond the 3 percent rule. Hydrocarbon processing 2011, p59-66.
[9] Smith D., Paul K., Living with oversized spring-loaded vapor relief valves. Process Safety Progress, 2022 vol.41 I-1 p. 146-150.

L’innovazione digitale nella conservazione degli archivi tecnici di un ente di ricerca: sfide e opportunità

P. De Cillis[1], M. Armenise[3], R. Modestino[2], A. Nebbioso[1], D. Sallustio[3]

[1]Inail – Dit
[2]Inail – Uot di Avellino
[3]Inail – Uot di Bari

Sommario
La digitalizzazione degli archivi rappresenta uno dei pilastri fondamentali della transizione digitale della Pubblica Amministrazione, come previsto dal Codice dell’Amministrazione Digitale (CAD). Il presente contributo illustra un progetto di innovazione finalizzato alla conservazione, tutela e valorizzazione del patrimonio documentale tecnico-amministrativo prodotto dalle sedi territoriali degli ex enti ANCC, ENPI e ISPESL, oggi confluiti nelle Unità Operative Territoriali (UOT) dell’INAIL. Tale patrimonio, costituito prevalentemente da libretti e verbali tecnici relativi alle attività di certificazione e verifica degli impianti e delle attrezzature – con particolare riferimento alle attrezzature a pressione antecedenti alla direttiva PED – riveste un rilevante valore storico, tecnico e amministrativo. Il progetto si propone di realizzare un archivio digitale sicuro, interoperabile e conforme al quadro normativo vigente, in grado di migliorare l’efficienza operativa interna, favorire l’accessibilità controllata e garantire la conservazione a lungo termine dei documenti.

1. Introduzione

Il patrimonio documentale prodotto nel corso di decenni dalle sedi territoriali UOT dell’INAIL è il risultato di un’intensa attività di certificazione e verifica svolta su scala nazionale in un arco temporale molto ampio. La documentazione comprende buste, fascicoli, registri e altre unità documentali divise per regioni e province e per settori con estremi cronologici che vanno dal 1938, anno di inizio attività dell’ANCC poi dal 1952 ENPI a seguire dal 1994 dell’ISPESL, fino al 2019 circa, anno dell’attivazione dell’applicativo CIVA.
La conservazione, tutela e valorizzazione di tale patrimonio non rappresentano esclusivamente un’esigenza amministrativa, ma assumono una rilevanza culturale e scientifica di primaria importanza.
I documenti oggetto del progetto, sebbene in molti casi risalenti a periodi antecedenti alle più recenti evoluzioni normative e tecnologiche, mantengono un significativo valore tecnico e giuridico. Essi costituiscono infatti una fonte imprescindibile per la ricostruzione dello storico degli impianti, per le attività di certificazione verifica e controllo, e per la comprensione dell’evoluzione delle pratiche di sicurezza nel tempo, in linea con quanto evidenziato in letteratura sulla funzione degli archivi pubblici [1].

La trasformazione digitale di questi archivi consente pertanto non solo di preservare la memoria documentale, ma anche di garantirne l'accessibilità e l'utilizzo operativo nel contesto attuale, contribuendo alla salvaguardia del patrimonio documentale in ambito digitale, come sottolineato anche a livello internazional [2].

2. Obiettivi del progetto

Il progetto di digitalizzazione si inserisce nel quadro delle linee di ricerca istituzionali e persegue una pluralità di obiettivi strategici:

- valorizzare e rendere maggiormente fruibile il patrimonio archivistico tecnico-amministrativo;
- supportare in modo efficace il personale interno nelle attività di gestione, verifica e consultazione documentale;
- rispondere in maniera tempestiva e strutturata alle richieste provenienti da utenti esterni, nel rispetto dei vincoli normativi;
- favorire l'accessibilità, la trasparenza e il possibile riuso dei dati pubblici, secondo i principi dell'open access.

L'intervento prevede come fase iniziale la digitalizzazione e la metadatazione del materiale cartaceo, cui seguirà il riversamento delle risorse digitali all'interno di un archivio digitale multimateriale, dotato di una componente back-end ad accesso riservato per la gestione completa del ciclo di vita documentale.

L'adozione di un archivio digitale strutturato non risponde quindi unicamente a esigenze di innovazione tecnologica, ma rappresenta uno strumento strategico per migliorare la qualità dei processi decisionali, garantire continuità informativa tra passato e presente e valorizzare un patrimonio documentale che conserva tuttora piena validità tecnico-amministrativa.

3. Dal documento cartaceo all'archivio digitale

Ogni documento amministrativo attraversa un ciclo di vita articolato in tre fasi: archivio corrente, archivio di deposito e archivio storico. La documentazione oggetto del progetto presenta una duplice natura: da un lato continua a essere rilevante per le attività istituzionali di verifica dell'INAIL, dall'altro costituisce un patrimonio storico di inestimabile valore, legato all'evoluzione delle pratiche tecniche e normative nel settore della sicurezza degli impianti.

La creazione di un archivio digitale consente di superare i limiti strutturali degli archivi cartacei tradizionali, riducendo drasticamente i tempi di ricerca e migliorando l'efficienza delle operazioni amministrative. Grazie a sistemi di indicizzazione avanzata e a criteri di ricerca personalizzabili, il personale può individuare rapidamente i documenti di interesse, migliorando la capacità decisionale e la qualità del servizio reso agli stakeholder.

La creazione di un archivio digitale si configura inoltre come un processo di "rigenerazione" del patrimonio documentale, in cui la dimensione digitale non

sostituisce quella tradizionale, ma ne amplia le possibilità di accesso, interpretazione e riuso [3].

4. La digitalizzazione della Pubblica Amministrazione

La digitalizzazione della Pubblica Amministrazione italiana è un processo complesso e stratificato, che ha radici profonde e si è evoluto nel tempo, influenzato da fattori politici, economici e tecnologici. Questo percorso, ancora in corso, ha visto l'alternarsi di spinte propulsive e momenti di rallentamento, ma ha sempre mantenuto l'obiettivo di rendere la PA più efficiente, trasparente e vicina ai cittadini e alle imprese.
Sinteticamente la Fig. 1 rappresenta i momenti salienti di questo processo.

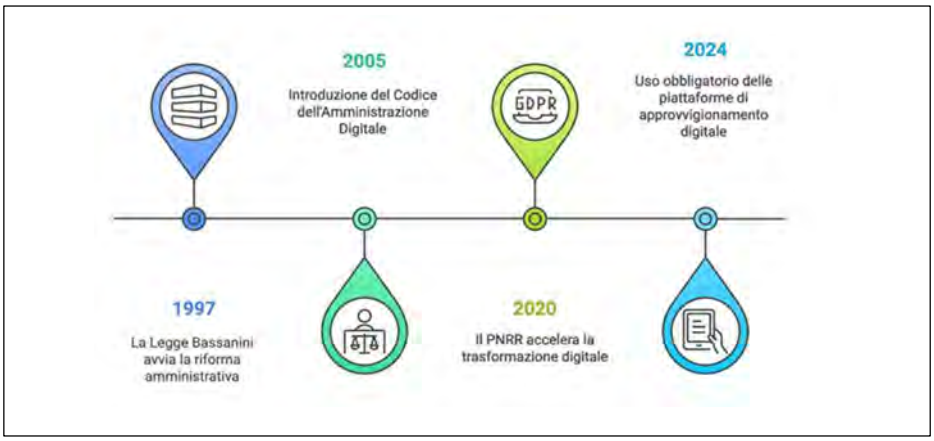


Figura 1

Molto si è fatto in questi anni, e oggi il Piano Triennale per l'Informatica nella PA 2024-2026, pone al centro la protezione dei dati, l'adozione dell'intelligenza artificiale e la resilienza delle infrastrutture critiche [4]. Un impegno rafforzato dall'entrata in vigore della Legge n. 90/2024, delle nuove misure minime di sicurezza ICT definite da AgID [5].e, soprattutto, dal recepimento della Direttiva (UE) 2022/2555, nota come NIS2 (Network and Information Security Directive 2), relativa a misure per un livello comune elevato di cibersicurezza nell'Unione Europea [6], attraverso il D.Lgs. n. 138/2024.
La sicurezza non è più solo un tema tecnico, ma un fattore chiave per garantire servizi digitali affidabili e inclusivi per la Pubblica Amministrazione.
Particolare attenzione viene dedicata alla protezione dei dati sensibili, che rappresentano uno dei bersagli principali per le minacce informatiche. La crescente interconnessione tra sistemi e l'uso massivo dell'intelligenza artificiale rendono necessarie soluzioni avanzate di monitoraggio, prevenzione e risposta agli incidenti.

5. Sicurezza, normativa e protezione dei dati

Un elemento centrale del progetto riguarda la sicurezza informatica e la protezione dei dati personali. L'architettura del sistema dovrà essere progettata secondo i

principi di *Cybersecurity e Privacy by Design*, integrando fin dalle prime fasi misure tecniche e organizzative adeguate.
Il quadro normativo di riferimento è articolato e comprende:

- Codice dell'Amministrazione Digital [7] e le Linee Guida AGID sulla formazione, gestione e conservazione dei documenti informatici;
- Regolamento UE 2016/679 (GDPR), che disciplina il trattamento dei dati personali, anche per finalità archivistiche;
- Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004), che riconosce gli archivi storici come beni culturali da tutelare e valorizzare;
- recenti disposizioni in materia di sicurezza ICT, inclusa la direttiva NIS2.

La digitalizzazione costituisce un nuovo trattamento di dati personali e richiede pertanto un'attenta gestione della *data retention*, l'aggiornamento del registro dei trattamenti, la conduzione di una valutazione d'impatto (DPIA) e l'individuazione dei ruoli privacy, inclusi i Responsabili del Trattamento.

6. Caratteristiche tecniche dello strumento

Il processo di digitalizzazione non si limita alla conversione dei documenti in formato elettronico, ma prevede un approccio strutturato che include: analisi archivistica, metadatazione, definizione di formati sostenibili, selezione dei sistemi di Electronic Records Management Systems (ERMS) software specializzati per la gestione documentale e applicazione del modello Open Archival Information System (OAIS) per la conservazione digitale a lungo termine [8].
Tale approccio risulta coerente con le più recenti esperienze di innovazione digitale applicate agli archivi e alle biblioteche, che evidenziano come l'integrazione tra gestione documentale e tecnologie avanzate rappresenti una leva strategica per la valorizzazione del patrimonio informativo [9] [10].
L'applicativo software da sviluppare, per la completa gestione del patrimonio documentale, deve avere caratteristiche tecniche in grado di rispettare le linee guida per la transizione digitale e soddisfare le esigenze del personale amministrativo dell'Inail.
In particolare, deve:

- permettere la gestione di centinaia di migliaia di occorrenze e garantire ottime performance in fase di ricerca e fruizione, contenuti descrittivi e file multimediali,
- offrire funzionalità di ricerca che garantiscono numerose e alternative modalità d'uso: ricerca libera tramite monocampo, ricerca avanzata/incrociata su più filtri in contemporanea, ricerca su entità recenti inserite o modificate, ricerca per identificativo, salvataggio ricerche personali con possibilità di immediata replica. Altrettanto importante nei filtri di ricerca, già durante la compilazione dei filtri stessi, ottenere le occorrenze per tipologia sia per i campi vocabolari sia per i campi aperti, in modo da suggerire e indirizzare la ricerca già in fase di compilazione dei filtri,

- fornire un albero delle relazioni documentali, interattivo, con possibilità di raggiungere le singole occorrenze collegate e ripercorrere l'intero albero delle relazioni archivistico,
- fornire la possibilità di gestire la collocazione dei documenti, le movimentazioni e lo stato di conservazione.

In relazione alla banca dati, deve permettere:

- l'inserimento di nuovi campi nel database e di nuove relazioni tra campi, anche dopo l'avvio del sistema stesso,
- la modifica delle caratteristiche dei campi, ad esempio rendere il campo ripetibile, ampliare le dimensioni, anche dopo l'avvio del sistema stesso.
- la creazione di nuovi modelli dati, entità inedite,
- la presenza di funzionalità che facilitano l'operato di INAIL, in un percorso di progressiva crescita del materiale documentale gestito.

La gestione dei file multimediali, completamente integrata nel software, deve:

- fornire caratteristiche di Digital Asset Management (DAM), inclusa l'estrapolazione automatica dei metadati tecnici delle immagini, ad esempio dati EXIF (Exchangeable Image File Format) incorporati automaticamente nell'immagine digitalizzata,
- generare automaticamente miniature in relazione all'oggetto digitale al fine di permettere una gestione snella ed efficace dei vari formati,
- generare automaticamente un watermark da applicare all'immagine, dinamico con immagine indicata dal committente, senza inficiare in alcun modo l'originale,
- integrarsi con servizi di Intelligenza Artificiale basati su Large Language Models (LLM), ovvero modelli linguistici avanzati in grado di analizzare contenuti testuali e multimediali, per l'estrazione automatica di informazioni, la generazione di key words e la creazione di relazioni semantiche tra i documenti, in linea con le più recenti applicazioni dell'AI nella gestione dei documenti pubblici [11],
- qualificarsi con l'Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale (ACN), per l'indice di solidità tecnica e architetturale, affidabilità, coerenza istituzionale.

7. Fasi di sviluppo e valutazione economica

Per la realizzazione del progetto si dovrà procedere con lo studio accurato di un campione rappresentativo di documenti appartenenti ai settori di riferimento pressione, riscaldamento, sollevamento, messa a terra, successivamente con la definizione degli standard di metadatazione internazionali, progettazione dell'architettura del repository, personalizzazione dell'applicativo con specifiche peculiarità e funzioni, catalogazione del materiale, digitalizzazione dello stesso secondo formati accessibili, integrazione di strumenti di Intelligenza Artificiale per una ricerca agevolata e più mirata, monitoraggio e controllo del repository secondo statistiche d'uso e di accessibilità.

L'adozione di un sistema di archiviazione elettronica consentirà di conseguire benefici strutturali nel medio-lungo periodo, in termini di riduzione dei costi di gestione degli

archivi fisici, di efficientamento dei tempi di lavorazione da parte del personale, di riduzione del rischio di perdita o danneggiamento della documentazione e, di conseguenza, di un incremento dell'efficienza complessiva dei processi amministrativi e tecnici.
Il progetto, inoltre, è finalizzato alla valorizzazione dell'archivio storico, non solo sotto il profilo culturale, ma anche economico, attraverso la trasformazione del patrimonio documentale in una risorsa strategica misurabile, grazie all'unicità e al valore informativo dei documenti prodotti e conservati nel tempo.

8. Metodologia

La metodologia si fonda su un approccio multidisciplinare che integra competenze archivistiche, informatiche, ingegneristiche, amministrative e organizzative. Le attività sono state articolate in fasi progressive e interdipendenti:

- analisi archivistica preliminare su un campione rappresentativo di documenti appartenenti ai quattro settori di riferimento (impianti a pressione, impianti di riscaldamento, impianti di sollevamento, impianti di messa a terra e scariche atmosferiche), per individuare tipologie documentali, relazioni archivistiche, criticità conservative e requisiti informativi;
- digitalizzazione per definire gli standard qualitativi e formati sostenibili nel tempo in formati idonei alla conservazione a lungo termine, garantendo la fedeltà all'originale e la loro leggibilità;
- metadatazione secondo standard internazionali, al fine di garantire interoperabilità e riuso, attraverso metadati descrittivi, strutturali e gestionali, coerenti con il modello OAIS (Open Archival Information System), standard di riferimento per la conservazione digitale a lungo termine;

Categoria	**Descrizione**	**Esempio**
Identificativo	Codice univoco del documento	ID-IMP-1928-001
Tipologia	Tipo di unità documentale	Libretto tecnico
Data	Data di produzione	15/06/1954
Settore	Ambito impiantistico	Impianti a pressione

Tabella 1. Esempio di schema di metadatazione adottato

- architettura del sistema: il repository digitale deve essere progettato secondo il principio "cloud first" e nel rispetto dei criteri di sicurezza e resilienza. L'applicativo di gestione documentale consente ricerche avanzate, gestione delle relazioni archivistiche e integrazione con funzionalità di Digital Asset Management;
- sicurezza e protezione dei dati: devono essere integrate misure di *Cybersecurity e Privacy by Design*, inclusi controlli di accesso, tracciamento delle operazioni, crittografia e politiche di data retention. È stata inoltre prevista la conduzione di una valutazione d'impatto (DPIA).

9. Casi d'uso e risultati attesi

L'implementazione dell'archivio digitale consente di delineare una serie di casi d'uso concreti, in grado di evidenziare l'impatto operativo e strategico del progetto.

Un primo caso d'uso riguarda il supporto alle attività istituzionali di verifica e controllo, con particolare riferimento alle attrezzature a pressione antecedenti alla direttiva PED. Il personale tecnico-amministrativo potrà accedere in modo rapido e sicuro ai libretti storici degli impianti, ricostruendo con immediatezza lo storico delle verifiche e delle certificazioni. Ciò consentirà una maggiore continuità informativa, riducendo i tempi di istruttoria e migliorando la qualità complessiva delle attività di vigilanza.

Un secondo caso d'uso è rappresentato dalla gestione delle richieste esterne provenienti da cittadini, imprese, professionisti e studiosi. L'archivio digitale permetterà di evadere le richieste in tempi significativamente ridotti rispetto agli archivi cartacei, garantendo al contempo il rispetto dei vincoli di riservatezza e delle tempistiche di consultabilità previste dal Codice dei Beni Culturali.

Un ulteriore ambito applicativo riguarda la valorizzazione storico-scientifica del patrimonio documentale. La disponibilità di documenti digitalizzati e descritti tramite metadati standardizzati favorirà attività di studio, ricerca e analisi storica sull'evoluzione delle tecnologie, delle normative e delle pratiche di sicurezza industriale nel corso del Novecento e dei primi decenni del Duemila.

In termini di risultati attesi, il progetto mira a:

- migliorare l'efficienza dei processi amministrativi e tecnici attraverso una drastica riduzione dei tempi di ricerca documentale;
- aumentare il livello di sicurezza e affidabilità nella gestione dei dati, riducendo i rischi di perdita, danneggiamento o accesso non autorizzato;
- garantire la conservazione a lungo termine dei documenti digitali secondo standard riconosciuti;
- favorire la trasparenza amministrativa e l'accessibilità controllata alle informazioni;
- porre le basi per future integrazioni con sistemi di analisi avanzata e Intelligenza Artificiale.

10. Conclusioni

Il ciclo di vita della documentazione oggetto di studio si trova in una fase intermedia tra l'archivio di deposito e quello storico in quanto è ancora di interesse per l'attività di verifica dell'Istituto ma per alcuni documenti inizia a prevalere il suo valore storico rispetto a quello pratico in quanto risultano un inestimabile tesoro di conoscenze legate all'attività di verifica effettuata negli anni.

In un contesto caratterizzato da enormi quantità di documentazione e dalla necessità di risposte tempestive nel loro reperimento, la possibilità di consultare un archivio digitalizzato riduce drasticamente i tempi di ricerca rispetto ai sistemi cartacei tradizionali. Un archivio digitale, infatti, offre strumenti di indicizzazione e ricerca

avanzata, che permettono al personale di localizzare rapidamente documenti specifici attraverso parole chiave o criteri personalizzati. Questo si traduce in una maggiore capacità di gestire le richieste amministrative, prendere decisioni informate e rispondere prontamente alle esigenze degli stakeholder, sia interni che esterni.
Inoltre, la digitalizzazione migliora anche la sicurezza e l'organizzazione dei dati. Documenti digitali possono essere protetti, riducendo i rischi di perdita o danneggiamento rispetto agli archivi cartacei. In ultimo, ma non per questo meno importante, un archivio digitale facilita la collaborazione tra le Unità Operative Territoriali, consentendo al personale di condividere informazioni in tempo reale e lavorare simultaneamente sugli stessi documenti.
Il progetto di digitalizzazione dell'archivio tecnico dell'INAIL si colloca quindi nel più ampio processo di trasformazione digitale ed innovazione tecnologica della Pubblica Amministrazione, in coerenza con le linee guida nazionali ed europee e con le più recenti evoluzioni della ricerca nel campo della gestione documentale digitale.
Attraverso un approccio metodologico rigoroso, conforme al quadro normativo e supportato da soluzioni tecnologiche avanzate, è possibile coniugare esigenze operative, tutela dei diritti e valorizzazione storico-culturale.
La realizzazione di un archivio digitale sicuro, interoperabile e orientato alla conservazione a lungo termine consente non solo di rispondere alle necessità attuali dell'Istituto, ma anche di costruire una infrastruttura informativa solida e resiliente, capace di supportare l'evoluzione futura dei servizi pubblici e della ricerca scientifica.

Legenda acronimi

- ERMS – Electronic Records Management System
- OAIS – Open Archival Information System
- EXIF – Exchangeable Image File Format
- LLM – Large Language Models
- NIS2 – Network and Information Security Directive

Bibliografia

[1] Reale E. Gli archivi delle amministrazioni pubbliche: stato dell'arte della gestione documentale e dei sistemi di classificazione". JLIS.it. 2017; 8(2): 114-125.
[2] UNESCO. Charter on the Preservation of Digital Heritage. Parigi, 2003.
[3] Barbuti N, Riso S. Rigenerare gli archivi nella dimensione digitale tra tradizione e innovazione: l'Archivio del Capitolo di Laterza. Um. Dig. 2025; 9(20): 165-88.
[4] AgID Agenzia per l'Italia Digitale. Piano Triennale per l'Informatica nella Pubblica Amministrazione 2024–2026, approvato con Comunicato della Presidenza del Consiglio dei ministri (GU Serie Generale n. 40 del 17-02-2024).
[5] AgID Agenzia per l'Italia Digitale. Linee guida sulla formazione, gestione e conservazione dei documenti informatici. Adottate con Determinazione n. 407/2020 e aggiornate con Determinazione n. 371/2021.

[6] Unione Europea. Direttiva (UE) 2022/2555 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 dicembre 2022, relativa a misure per un livello comune elevato di cibersicurezza nell'Unione.
[7] Decreto Legislativo 7 marzo 2005, n. 82 e s.m.i., CAD Codice dell'Amministrazione Digitale.
[8] ISO 14721:2012. Space data and information transfer systems — Open archival information system (OAIS) – Reference model. Ginevra: International Organization for Standardization, 2012.
[9] Kurti E, Kajtazi M. Digital Innovation Challenges: The Case of an Academic Library. The 32nd European Conference on Information Systems (ECIS) 2024 Proceedings: Digital Transformation. Paphos, Cyprus 3-19 June 2024; 18: 2289.
[10] Pasqui V. Biblioteche digitali e trasformazione digitale della PA. DigItalia. 2021; 16(1): 9–37.
[11] Canning D, Jaillant L. AI to review government records: new work to unlock historically significant digital records. AI & Soc. 2025; 40(6): 4433–4445.

Revamping del sistema di flame detection nei bruciatori a Tail Gas – Analisi dei rischi e miglioramento dei sistemi di sicurezza

D.Cadel[1], A. Carro[2], M. Zattini[3], G. Vaccaro[4], A. Carnaccini[2]

[1]EV TECH srl
[2]Inail – Uot di Forlì
[3]Cabot Italiana S.p.A.
[4]Inail – Uot di Palermo

Sommario
La memoria descrive l'esperienza maturata nel progetto di revamping del sistema di flame detection dei bruciatori a Tail Gas di un generatore di vapore asservito ad un impianto di cogenerazione, con l'obiettivo di ridurre le criticità operative dovute a fault non giustificati causati da falsi segnali di assenza fiamma. Il progetto mirava ad aumentare l'affidabilità della rivelazione della fiamma ed a limitare di conseguenza l'intervento della torcia di emergenza, con benefici in termini di sicurezza, continuità di esercizio e riduzione delle emissioni in atmosfera.
Nel presente lavoro si propone un approccio innovativo e conservativo per aumentare l'affidabilità complessiva della catena di sicurezza associata alla rivelazione fiamma, attraverso l'installazione di due flame detector certificati SIL 3, configurati in parallelo con logica OR, mantenendo le logiche di intervento del Burner Management System (BMS) invariate dal punto di vista funzionale. La scelta, pur comportando un prevedibile peggioramento teorico dell'affidabilità in termini di PFH (Probability of Failure per Hour) per architetture 2oo2, risulta infine vantaggiosa in virtù del significativo miglioramento tecnologico dei nuovi sensori adottati rispetto al dispositivo originale.
L'analisi dimostra che l'adozione di un sistema ridondante permette una sensibile riduzione degli spegnimenti spuri e garantisce un miglioramento complessivo della sicurezza funzionale, senza necessariamente introdurre criticità regolamentari o operative. La modifica proposta infatti risulta tecnicamente giustificata, conforme ai requisiti normativi e classificabile come non sostanziale, garantendo così un significativo incremento dell'affidabilità operativa, della sicurezza e una riduzione dell'impatto ambientale.

1. Introduzione

La disponibilità di sistemi di rilevazione di fiamma affidabili rappresenta un elemento critico per l'esercizio dei bruciatori industriali. La funzione dei flame detection è quella di verificare che la combustione si sviluppi in maniera continua e di intervenire tempestivamente qualora la fiamma dovesse estinguersi, evitando l'accumulo di combustibile in camera e prevenendo di conseguenza l'instaurarsi di condizioni potenzialmente pericolose specialmente in termini di rischio esplosione.

Nella maggior parte delle applicazioni, tale funzione viene svolta da un singolo dispositivo UV/IR, connesso a un BMS certificato secondo la IEC 61508. Tuttavia, la presenza di un'unica catena sensore–solver in architettura 1oo1 può presentare vulnerabilità dovute a limiti tecnologici, variabilità del combustibile, fluttuazioni della fiamma o attenuazioni ottiche nella fase di rivelazione.
Il presente studio analizza una soluzione di revamping finalizzata ad aumentare la robustezza della rilevazione tramite la duplicazione del sensore con logica OR verso il BMS, senza modificare la logica di sicurezza originale.

2. Evidenze sperimentali

Sin dalla messa in esercizio del generatore di vapore, il Gestore ha registrato occasionali spegnimenti dei bruciatori di Tail Gas dovuti a interventi non giustificati dei flame scanner originali. Tuttavia, l'installazione nel 2023 di un flame detector più avanzato in affiancamento a quello esistente ha evidenziato che alcuni spegnimenti dei bruciatori non erano legati a una reale assenza di fiamma, ma a limiti tecnologici del sistema di rilevazione che interpretava erroneamente fluttuazioni di segnale transitorie.

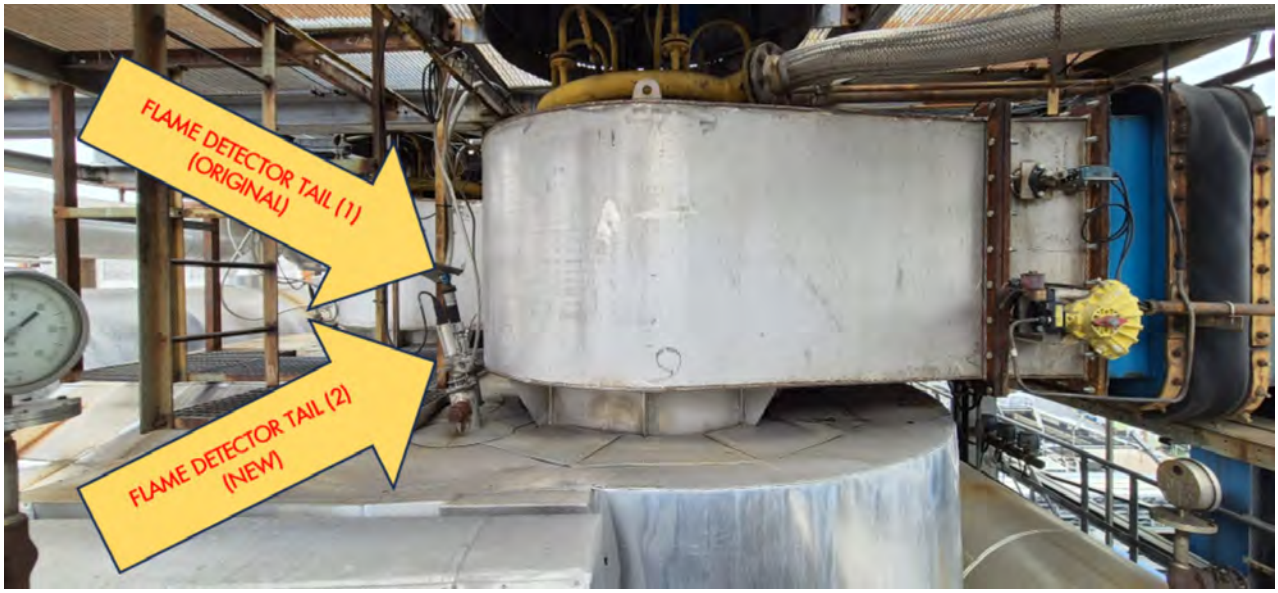


Figura 1. Accoppiamento flame detector su bruciatore durante la fase di test

Le osservazioni hanno mostrato che l'impiego di sensori più moderni e la presenza di due flame detector per ciascun bruciatore, collocati in punti leggermente diversi entro la geometria della camera di combustione, possono ridurre significativamente gli spegnimenti ingiustificati e, di conseguenza, l'attivazione non necessaria della torcia di emergenza dell'impianto.
Il progetto di revamping punta quindi a trasformare l'attuale configurazione sperimentale – con sensori aggiuntivi installati solo per attività di studio e monitoraggio – in una modifica definitiva delle logiche di sicurezza, integrando stabilmente tali soluzioni nella catena di controllo della presenza di fiamma.

3. Analisi del contesto tecnico e regolamentare

L'analisi del contesto tecnico e regolamentare ha permesso di individuare le principali norme europee di settore applicabili ai sistemi di combustione e di rivelazione della fiamma, risultando pertanto rilevanti anche per i bruciatori a Tail Gas oggetto del presente studio:

- IEC 61508 e correlate per il controllore BMS; la norma tratta gli aspetti di carattere generale da considerare quando sistemi elettrici/elettronici/elettronici programmabili sono impiegati per svolgere funzioni di sicurezza.
- UNI EN 13611: Dispositivi di sicurezza e controllo per bruciatori ed apparecchi a gas e/o combustibili liquidi – Requisiti generali; la norma definisce i requisiti generali di sicurezza, progettazione, costruzione, prestazione e prova per i dispositivi di sicurezza, di controllo o di regolazione per bruciatori ed apparecchi a gas o combustibili liquidi.
- UNI EN 298: Sistemi automatici di comando per bruciatori e apparecchi a gas o a combustibile liquido; la norma specifica i requisiti di sicurezza, progettazione, fabbricazione, prestazione e prova per i sistemi automatici di comando, le unità di programmazione, dispositivi di rivelazione di fiamma e i rivelatori ad alta temperatura (HTO), destinati ad essere utilizzati con bruciatori a gas e olio combustibile e apparecchi a gas e a olio combustibile con o senza ventilatore e utilizzo similare. La norma è richiamata esplicitamente anche in art. 294-3bis del d.lgs. 152/06, così come modificato da d.lgs. 102/2022 a riguardo delle dotazioni obbligatorie per il controllo di combustione dei medi impianti di combustione.

I bruciatori a Tail Gas oggetto dell'analisi non rientrano invece nell'ambito di applicazione della norma UNI EN 676, trattandosi di "bruciatori specificamente progettati per essere utilizzati in processi o applicazioni industriali all'interno di cicli produttivi". Ciò nondimeno, la stessa normativa offre spunti e principi di riferimento utili, in quanto ampiamente conservativi, per valutare il caso oggetto di studio.

4. Coerenza delle modifiche proposte con le regole tecniche di riferimento

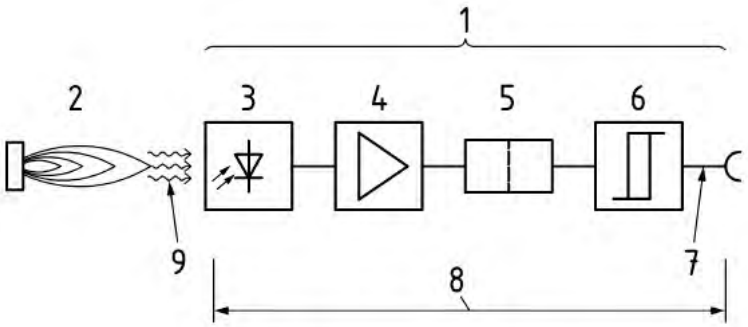
La scelta di adottare due rivelatori di fiamma in logica OR per il controllo dei bruciatori a Tail Gas oggetto del presente studio, già motivata sul piano funzionale e sperimentale, è stata valutata anche alla luce delle norme tecniche applicabili ai sistemi di combustione industriale.

Si precisa che il BMS installato sui bruciatori a Tail Gas oggetto del presente studio è un sistema certificato secondo IEC 61511, NFPA 85, EN 50156-1 ed EN 298, e dotato di blocchi funzionali con qualificazione SIL 3; l'adozione delle norme europee viene assunta come criterio conservativo nelle valutazioni di modifica.

a. Coerenza rispetto a UNI EN 298

La UNI EN 298, che definisce i requisiti delle logiche di sicurezza per i bruciatori, stabilisce la necessità della presenza di un'unità di programmazione e di un sistema di rilevazione di fiamma, senza tuttavia imporre che tale sistema sia unico. La norma, così come la UNI EN 676 per i bruciatori destinati al mercato del riscaldamento, non esclude inoltre la possibilità di duplicare i sensori, ma indica che un singolo sensore è sufficiente ad ottemperare alle finalità normativa da essa richiamate. Pertanto, l'adozione di due dispositivi di rivelazione in presenza di una sola unità di programmazione rientra certamente nelle soluzioni tecnicamente ammissibili.

La UNI EN 298 prevede inoltre la possibilità di installare dei dispositivi di rilevazione di fiamma indipendenti rispetto al controllore di combustione; pertanto, i rivelatori di fiamma oggetto del presente studio risultano conformi.



Key

1	independent flame detector device (see 3.102)	6	threshold
2	flame	7	flame signal (see 3.107)
3	flame sensor (see 3.103)	8	flame failure detection time (see 3.105.2)
4	amplifier	9	sensed flame (see 3.106)
5	filter		

Figura 2. Caratterizzazione flame detector indipendente (EN 298)

b. Coerenza rispetto a UNI EN 13611

In conformità con la UNI EN 298, i dispositivi di sicurezza per la combustione devono rispettare i requisiti costruttivi e di affidabilità stabiliti dalla UNI EN 13611. I rivelatori di fiamma oggetto del presente studio risultano conformi alla suddetta norma.

5. Inquadramento statistico e coerenza delle modifiche proposte

a. Fondamenti di analisi statistica

La sicurezza funzionale dei sistemi di combustione si basa sulla capacità di stimare in modo quantitativo la probabilità che un componente dedicato alla protezione fallisca nel momento in cui la protezione è necessaria. Tale valutazione si fonda su un numero limitato di grandezze statistiche definite dalle norme IEC 61508 e IEC 61511. I concetti fondamentali sono i seguenti:

- il tasso di guasto λ esprime il numero medio di guasti pericolosi nell'unità di tempo (es: [1/h]). È una grandezza statistica che caratterizza il singolo

dispositivo e costituisce la base per il calcolo della probabilità che esso fallisca nello svolgimento del proprio compito durante il funzionamento;

- la probabilità di guasto pericoloso orario PFH rappresenta la quantificazione della possibilità che il sistema fallisca in modo pericoloso durante il funzionamento. Viene usata nello studio di sistemi che devono garantire protezione a fronte di eventi frequenti (high-demand mode) o continui (continuous demand mode), superiori alla singola occorrenza annuale;
- la probabilità di guasto su domanda PFD (Probability of Failure on Demand) è l'equivalente della precedente per sistemi che intervengono molto raramente (low-demand mode);
- il livello di integrità della sicurezza SIL classifica le prestazioni di sicurezza secondo intervalli definiti di PFH/PFD;

SIL	High demand	Low Demand
1	$10^{-6} \leq PFH < 10^{-5}$	$10^{-2} \leq PFD < 10^{-1}$
2	$10^{-7} \leq PFH < 10^{-6}$	$10^{-3} \leq PFD < 10^{-2}$
3	$10^{-8} \leq PFH < 10^{-7}$	$10^{-4} \leq PFD < 10^{-3}$
4	$10^{-9} \leq PFH < 10^{-8}$	$10^{-5} \leq PFD < 10^{-4}$

Tabella 1. Relazione tra SIL, PFH e PFD (IEC 61508)

- la tipologia di architettura MooN descrive il numero di catene che devono essere attive o guaste affinché la funzione sia rispettata o mancata. Essa ha effetto sulla continuità operativa (availability) e l'integrità di sicurezza (reliability) di un sistema.

b. Coerenza statistica delle modifiche proposte

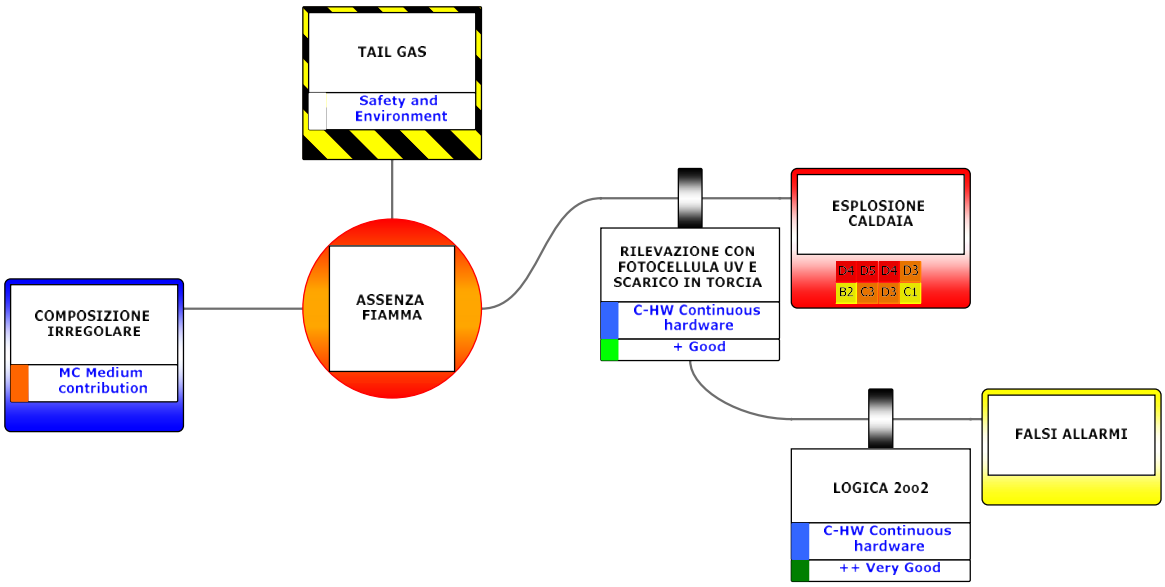


Figura 3. Schema concettuale della modifica

L'analisi seguente ha lo scopo di effettuare un confronto tra flame detector:

- caratterizzati da tecnologie diverse;
- installati in numero e secondo logiche di funzionamento distinte;

per valutare quale configurazione sia in grado di garantire un miglioramento della disponibilità del sistema, senza incorrere in una riduzione della sicurezza. Il monitoraggio è ad alta frequenza durante il funzionamento (regime continuativo, con numero di occorrenze pericolose nell'intorno delle 50 annuali), pertanto si fa uso del parametro PFH.

La configurazione originale del nostro caso di studio prevedeva, ricordiamo, un unico sensore (logica 1oo1) privo di certificazione SIL, che dovrà pertanto essere assegnata a livello ipotetico ai fini della presente valutazione. Considerando la vetustà del componente, la classificazione media associata ad elementi similari [1] e facendo ricorso alla letteratura tecnica di settore [2][3], si è concluso con l'attribuzione di un valore SIL 2 come riscontrabile in Figura 4.

Table 6. Fire and gas detectors input data from generic and manufacturer data sources.

ID	Generic data (PDS Data Handbook, 2013)	Manufacturer data (Certified by Exida)
Equipment	Flame detector	X33AF Multi-spectrum IR flame detector
Failure rate (DU)	5.0×10^{-7}/h	1.24×10^{-7}/h
Failure rate (DD)	1.2×10^{-6}/h	6.34×10^{-7}/h
Failure rate (Spurious)	3.8×10^{-6}/h	2.137×10^{-6}/h
Diagnostic coverage	0.70	0.84
SFF	91%	95.7%
β factor	0.07	–
Equipment	Gas detector, IR point	HC400 IR gas detector
Failure rate (DU)	6.0×10^{-7}/h	1.62×10^{-7}/h
Failure rate (DD)	1.9×10^{-6}/h	1.06×10^{-6}/h
Failure rate (Spurious)	2.2×10^{-6}/h	4.2×10^{-8}/h
Diagnostic coverage	0.75	0.87
SFF	87%	87.2%
β factor	0.07	–

Figura 4. Tasso di guasto del flame detector generico [1][2]

Il valore della PFH si approssima pertanto con la media dell'intervallo corrispondente:

$$PFH_{1oo1} = \lambda_{MEDIO,SIL2} \qquad (1)$$

Ai fini del revamping si opta invece per una coppia di dispositivi installati in parallelo (logica 2oo2), ciascuno con certificazione SIL 3. Eseguendo la medesima

approssimazione appena applicata, e tenendo in considerazione la presenza di più strumenti, vale:

$$PFH_{2oo2} = 2 \bullet \lambda_{MEDIO,SIL3} \qquad (2)$$

I risultati si riportano nella tabella che segue.

Configurazione	**PFH**	**SIL**	**Differenza**
Singolo flame detector (1oo1)	$5{,}5 \bullet 10^{-07}$	2	–
Doppio flame detector (2oo2)	$1{,}1 \bullet 10^{-07}$	2	-80%

Tabella 2. Confronto tra conformazione originale e revamping

Si nota come da un punto di vista statistico la configurazione con doppio flame detector, nonostante una logica di funzionamento sfavorevole che va a raddoppiare il tasso di fallimento globale del sistema, può avvalersi di una tecnologia intrinseca superiore per ottenere un risultato finale migliorativo dell'80% rispetto all'installazione con dispositivo singolo.

6. Conclusioni

Sulla base dell'analisi svolta e della documentazione tecnica e regolamentare analizzata si possono trarre le seguenti conclusioni:

1. la configurazione che prevede l'utilizzo di due flame scanner indipendenti dotati di segnale fail-safe al controllore, posti in parallelo sul medesimo ingresso del BMS (Burner Management System), non è in alcun modo né impedita, né sconsigliata dalle norme tecniche di riferimento, pur non essendo esplicitamente citata negli standard;
2. il ricorso ad un parallelo con logica OR di funzionamento di due flame scanner sarebbe teoricamente peggiorativo in termini di frequenza di accadimento di un guasto potenziale nella rilevazione fiamma, a parità di tecnologia adottata; considerato però che la ridondanza dei flame detector non è ottenuta utilizzando un dispositivo aggiuntivo identico all'originale, ma si è deciso invece si avvalersi dell'aggiornamento tecnologico di entrambi, si è dimostrato che il livello complessivo di prestazione è invece migliorato;
3. l'ipotesi fatta nell'assumere il livello di prestazione del flame detector originale entro l'intervallo di classificazione SIL 2 e non SIL 3, oltre che essere basata su evidenze di letteratura, appare del tutto ragionevole considerato che la massima prestazione espressa sul mercato per dispositivi analoghi, tra i quali quello scelto per il revamping, è proprio SIL 3. Se quindi la prestazione del dispositivo originale fosse stata, o dovesse essere stata, per destinazione d'uso, effettivamente assimilabile a SIL 3, il costruttore avrebbe certamente avuto la massima convenienza ad evidenziarlo nella sua documentazione tecnica, dove invece non appare nessun riferimento ad assegnazione di Safety Integrity Level.

Le evidenze maturate in questa esperienza applicativa hanno quindi dimostrato come sia a volte possibile superare anche limitazioni che in prima battuta appaiono emergere dall'applicazione immediata dei metodi statistici classici come accade, ad esempio, quando applicata una logica 2oo2 in luogo di quella 1oo1 mantenendo dispositivi di sicurezza identici nei due casi.
Ciò può infatti divenire possibile, in alcuni specifici scenari come quello oggetto di studio, passando attraverso una attenta valutazione tecnologica dei dispositivi utilizzati prima e dopo il revamping che abbia cura di riferirsi a valutazioni oggettive e preferibilmente certificate del livello di sicurezza dello strumento utilizzato.
Il lavoro di analisi svolto ha infine dimostrato che le variazioni proposte alla configurazione originale del bruciatore non provocano variazione in difetto dei livelli di sicurezza attesi sui quali si era basata l'analisi dei rischi presente nel fascicolo tecnico originale del generatore di vapore.

Ringraziamenti
Gli autori desiderano ringraziare l'Ing. F. Rusalen per il contributo alle attività di coordinamento tecnico e per il supporto alla stesura dell'articolo.

Bibliografia e sitografia
[1] Håbrekke Solfrid. Hauge Stein. Onshus Tor. Reliability data for safety instrumented systems: PDS Data Handbook 2013 edition. *Sintef Technology and Society*. 2013.
[2] Peter Okoh. Yiliu Liu. Cross-acceptance of fire safety systems based on SIL equivalence in relation to IEC 61508 and EN 50129. *Safety and Reliability*. 2022.
[3] Braband Jens. vom Hövel Rüdiger. Schäbe Hendrik. Probability of failure on demand – The why and the how. *26th International Conference, SAFECOMP*. 2009.
[4] Serie IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. 2010.
[5] Serie IEC 61511. Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector. 2016.
[6] UNI EN 298 ed. 2023. Sistemi automatici di comando per bruciatori e apparecchi a gas o a combustibile liquido. 2023.
[7] UNI EN 13611 ed. 2021. Dispositivi di sicurezza e controllo per bruciatori ed apparecchi a gas e/o combustibili liquidi. 2021.

La norma API 527 per la sicurezza nei processi a idrogeno: una metodologia per la prova di tenuta delle valvole di sicurezza.

S. Carra[1], C. Di Girolamo[2], L. Monica[1], A. Cagnoni[2], A. Colautto[3]

[1]Inail - Dit
[2]Inail - UOT di Piacenza
[3]Inail - UOT di Milano

Sommario
L'idrogeno è ormai un vettore energetico chiave nella transizione industriale e tecnologica e la sua gestione richiede livelli di sicurezza sempre più elevati, soprattutto per componenti critici come le valvole di sicurezza. Le metodologie di prova standard, pur rappresentando un riferimento consolidato, presentano limiti quando applicate a impianti che trattano fluidi pericolosi o atmosfere potenzialmente esplosive.
In questo contesto, in ambito industriale è stato sviluppato un metodo di prova di tenuta basato sull'impiego di una miscela costituita da azoto e idrogeno.
Il presente lavoro si propone di descrivere tale approccio e di mostrare, anche attraverso l'analisi di risultati sperimentali, come esso possa consentire di superare le soglie di sensibilità previste dalla norma API 527, offrendo una rilevazione delle perdite più fine, affidabile e coerente con le esigenze di sicurezza nelle moderne applicazioni.
Il test viene eseguito a temperatura ambiente e alla pressione di prova prevista da API 527, pari al 90% della pressione di taratura della valvola.
I dati sperimentali esaminati hanno permesso di valutare le potenzialità di tale metodologia in termini di gestibilità, ripetibilità e affidabilità nel tempo rispetto alle prove di tenuta più tradizionali.

1. Introduzione

Nell'ambito della sicurezza degli impianti a pressione, la valvola di sicurezza (PSV - Pressure Safety Valve) rappresenta l'estrema difesa contro le sovrapressioni catastrofiche. Tuttavia, anche durante la normale operatività dell'impianto, la capacità della valvola di garantire una tenuta perfetta è fondamentale non solo per l'efficienza del processo, ma per la mitigazione del rischio di fughe del fluido trattato, specialmente quando esso è costoso o infiammabile e dunque potenzialmente pericoloso.
E' il caso dell'idrogeno, il cui utilizzo è presumibilmente destinato a prendere sempre più piede in Europa, alla luce dell'emergente ruolo di vettore energetico a ridotto impatto ambientale alternativo ai classici combustibili fossili.
Secondo il D.M. 329/2004, ai soggetti preposti, tra cui INAIL, spetta il compito di verificare la funzionalità delle valvole di sicurezza al momento delle verifiche di legge. Tale verifica può essere effettuata con prove a banco, simulazioni, oppure, ove non pregiudizievole per le condizioni di esercizio, determinandone l'intervento in opera. La

verifica può consistere anche nell'accertamento di avvenuta taratura entro i limiti temporali stabiliti dal fabbricante e comunque entro i limiti relativi alle periodicità delle verifiche di riqualificazione dell'attrezzatura protetta.
Laddove si voglia verificare la tenuta di una valvola di sicurezza, risultano utili strumenti e metodologie che siano in gradi di valutare la capacità della stessa di mantenere una tenuta ermetica nelle normali condizioni operative, in ottemperanza a quanto stabilito per il cosiddetto *leak test* dalla normativa americana API 527 [1]. Quest'ultimo è attualmente lo standard tecnico maggiormente seguito in ambito industriale, anche in Italia, per le prove di tenuta, soprattutto in ragione del suo alto livello di dettaglio nella definizione delle procedure. A supporto, risultano utili anche la EN ISO 4126-1:2019 [2] (che definisce i requisiti generali per le valvole di sicurezza, incluse le prove di tenuta, seppur in modo più generico, e fornisce alcune definizioni come quella di *pressione di taratura*) e la EN 12266:2012 [3] relativa ad una più ampia gamma di valvole.
E' comunque consentito applicare anche metodi di prova alternativi per i test di tenuta delle valvole di sicurezza, purché un ente regolatore ne attesti la maggiore accuratezza rispetto alle metodologie già in uso. Il presente studio ripercorre l'esperienza di un'azienda italiana, produttrice di valvole di sicurezza, nell'implementazione ed applicazione di un protocollo di leak test diverso da quelli più comunemente utilizzati, basato sull'uso di una miscela di Idrogeno (5%) e Azoto (95%) ed ufficialmente certificato dall'ASME National Board anche per valvole destinate a fluidi pericolosi, incluso l'idrogeno, applicazioni ATEX ed in generale per applicazioni in cui siano richiesti requisiti di tenuta particolarmente stringenti.
La miscela in questione è in realtà già nota nell'ambito della letteratura tecnica e scientifica (è il cosiddetto "forming gas") proprio per il suo utilizzo nei test di tenuta, ma anche in altri ambiti come la calibrazione dei rilevatori di fughe (e.g. sniffer [4]). Sono comunque ancora poche – anche in ambito internazionale - le applicazioni descritte, che siano ad opera dei produttori stessi oppure di laboratori per prove di tenuta conto terzi.
Ad una prima ricerca sul web, ad oggi pochissimi produttori di valvole in Europa dichiarano espressamente l'uso di miscela H_2/N_2 nei test di tenuta, sebbene esista una metodologia consolidata e supportata da pratiche industriali applicate su altri tipi di componenti, ma non codificata come metodo obbligatorio in norme specifiche dedicate alle valvole.
L'approfondimento proposto va dunque nella direzione di far conoscere tale metodica basata su H_2 e N_2 come possibile alternativa a quelle più note come i test con Elio - già ampiamente oggetto di studio anche per l'uso in valvole criogeniche [5,6] - mettendone in evidenza i pregi ma allo stesso tempo evidenziandone eventuali criticità, a partire dall'esperienza sperimentale dell'azienda coinvolta e dalle valutazioni dei tecnici INAIL addetti alle relative verifiche.

2. Prove di tenuta con miscela 95% N_2 - 5% H_2

La metodologia proposta per i test di tenuta su valvole di sicurezza utilizza una miscela di azoto ed idrogeno (95% N_2 - 5% H_2) come fluido tracciante, adottando valori di pressione analoghi a quelli indicati dalla normativa API 527. Nel caso industriale esaminato, il risultato del test viene considerate positivo solo in assenza di perdite (secondo un principio “passa/non passa”), in base alla misura effettuata da un rilevatore certificato, collegato ad uno sniffer elettronico ad alta sensibilità (1×10^{-5} cc/s). E’ richiesto infatti di perseguire l’obiettivo degli "zero defects", con una tolleranza massima di scarti stabilita a 1ppm. L’azienda riferisce che attualmente tale tolleranza viene rispettata (nell’ultimo anno sono state realizzate circa 820.000 valvole di sicurezza con una percentuale di scarti al test idrogeno pari a zero). Sono stati infatti adottati internamente standard di produzione rigorosi, allineati in particolare con i settori farmaceutico e automobilistico. Tutto ciò fa sì che gli standard di accettabilità risultino ben oltre i limiti imposti dalla normativa di riferimento classica, ossia l'API 527.

Dal punto di vista operativo, la prova viene generalmente effettuata manualmente da un operatore, specie nel caso in cui sia richiesta una certa rapidità per produzione in serie. Una bombola contenente la miscela 95% N_2 - 5% H_2 (Figura 1) è collegata tramite un tubicino ad una porzione di tubazione su cui è innestata la valvola da testare tramite connessione filettata, in corrispondenza di un blocchetto di supporto dotato di rubinetto (lasciato aperto in modo da consentire il flusso dal blocchetto alla valvola).

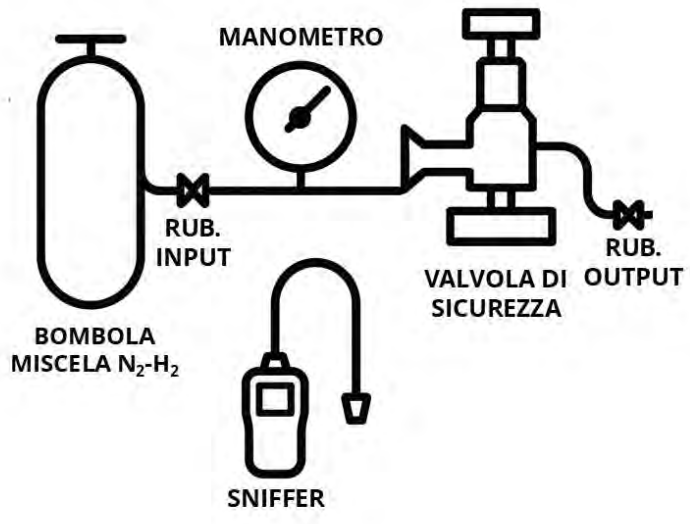


Figura 1. Schematizzazione del set-up di prova per test di tenuta su valvole con miscela 95% N_2-5% H_2.

Sulla tubazione, ai lati del blocchetto, sono posti altri due rubinetti: quello in ingresso è anch’esso lasciato aperto per consentire l’arrivo della miscela in pressione, l’altro invece è inizialmente chiuso (a inizio prova). Un manometro certificato misura la pressione all’ingresso del blocchetto. Un rilevatore mostra a video la perdita rilevata attraverso un classico “naso cercafughe” (sniffer, da ricalibrarsi periodicamente) che

viene via via appoggiato all'uscita della valvola. Quest'ultima viene inizialmente avvitata, con rubinetto di uscita della tubazione chiuso, e poi viene avviato il flusso di miscela attraverso un regolatore di pressione fino al 90% della pressione di taratura, utilizzando lo sniffer per misurare eventuali perdite. A fine test, si apre il rubinetto di uscita e si interrompe l'afflusso di miscela, infine si stacca la valvola e se ne mette una nuova per il test successivo. La zona deve comunque essere "pulita" tramite pistola ad aria compressa in modo da allontanare l'idrogeno eventualmente rimasto in prossimità (incluso quello sicuramente fuoriuscito dal tubicino di collegamento tra valvola e blocchetto sottostante), così da evitare falsi positivi. La procedura è comunque veloce, con un tempo di ripulitura ad aria compressa che si attesta intorno ai 3-4 secondi massimo.
Da questo punto di vista, emerge l'importanza dello spazio di lavoro in relazione alla modalità di trafilamento dell'idrogeno, in quanto il rilevatore appare molto sensibile ai minimi spostamenti di aria in prossimità della valvola. Non si tratta di una problematica facilmente prevedibile e modellabile; precedenti ricerche INAIL [7] hanno infatti mostrato che la condizione di misura ideale (una camera chiusa isolata dai disturbi esterni e con aperture solo verso l'alto) è difficilmente riproducibile nei contesti di lavoro reali, dove anzi addirittura la stessa variazione di portata di emissione può influenzare le turbolenze dell'aria.
Tale problematica dei falsi positivi, risolvibile sul momento tramite la pulizia manuale ad aria compressa, appare più evidente nei casi in cui l'azienda riferisce di utilizzare invece un sistema automatico di rilevamento perdite, in quanto la zona di lavoro, essendo più ristretta e segregata per motivi di sicurezza, risente più facilmente di atmosfere stagnanti. Ciò avviene in particolare per la rilevazione di trafilamenti in ambito refrigerazione, per i quali la norma di riferimento cosiddetta "F-gas" – il Regolamento (UE) n. 517/2014 del Parlamento Europeo sui gas fluorurati ad effetto serra - impone come perdita massima 3 g/anno [8]. In caso di test fallito la valvola scartata viene ricontrollata manualmente per verificare che ci sia una reale perdita o se si tratti solo di un falso positivo. Il sistema memorizza solo il numero di test negativi del lotto e non il valore della misurazione.

3. Metodologie a confronto: analisi comparativa

Quando diverse metodologie di prove di tenuta sono a disposizione, la scelta dipende necessariamente anche dalla specifica applicazione. La normativa, in tal senso, può sempre fornire un aiuto. Lo standard EN 1779:1999/A1:2003 [9], per esempio, definisce criteri per scegliere il metodo di prova, così come i limiti di rilevamento e sensibilità per vari metodi di rilevamento perdite e per diversi tipi di componenti di cui potrebbe essere necessario verificare la tenuta (valvole, regolatori, sistemi in pressione, etc.).
Lo standard industriale API 527 descrive innanzitutto il classico test "a bolle", in cui la valvola viene pressurizzata con aria o azoto a temperatura ambiente ed il lato scarico viene generalmente collegato a un tubo trasparente (con dimensioni fissate) immerso

in acqua, nel quale, se la valvola perde, la pressione crea piccole bolle che vengono letteralmente contate. Durante la prova, della durata di un minuto, una valvola di sicurezza a tenuta morbida non dovrebbe presentare perdite (0 bolle/min). Per una valvola di sicurezza a tenuta metallo-metallo, la portata di perdita di bolle (espressa in bolle/min) non dovrebbe superare alcuni valori tabulati dipendenti dai valori di pressione impostati. Per una valvola di sicurezza con una pressione di taratura superiore a 3.45 barg, il tasso di perdita di bolle deve essere determinato mantenendo la pressione di prova all'ingresso della valvola al 90% della pressione di taratura. Per una valvola tarata a valori pari o inferiori a 3,45 barg, la pressione di prova deve essere invece mantenuta a 0.35 bar al di sotto della pressione di taratura.
Tale metodica, sebbene storicamente accettata e riconosciuta come valida, presenta comunque alcune criticità. Innanzitutto il test prevede il conteggio visivo delle bolle emesse in un minuto, dove una bolla ha generalmente un volume stimato tra 0.15 e 0.30 cc. Una perdita accettata dall'API 527 può arrivare a 40 bolle/minuto, quindi la perdita accettata può essere pari a $2{\cdot}10^{-1}$ cc/s (Equazione 1), che è un valore abbastanza alto in contesti tecnologici avanzati, dove spesso invece è bene che si tengano le perdite ben sotto tale soglia.

$$Leak_{API-bolle} \approx 40 bolle/min \times 0.3 cc/bolla \approx 12 cc/min \approx 2 \cdot 10^{-1} cc/s \qquad (1)$$

Il contatto con acqua può poi dare problemi di corrosione o contaminazione in alcuni materiali.
Con l'utilizzo di tale metodo in caso di produzione in serie, inoltre, avendo molti elementi da testare, si può creare un collo di bottiglia con problemi di tempistiche eccessivamente lunghe. Questo certamente non accade invece nel caso in cui sia applicata la metodologia a miscela 95% N_2 - 5% H_2, dove i tempi sono dell'ordine dei secondi.
In quest'ultimo caso, inoltre, grazie alla bassa viscosità e al ridotto raggio molecolare dell'idrogeno, il gas penetra attraverso micro-fessurazioni tra otturatore e valvola che l'azoto o l'aria non attraverserebbero a parità di pressione. Utilizzando sniffer certificati con sensibilità di 1 x 10^{-5} cc/s, il criterio di accettazione dei test risulta di diversi ordini di grandezza più severo rispetto a quello riportato nell'Equazione 1: si passa da una perdita funzionale ad una tenuta virtualmente ermetica (una perdita di 1 x 10-5 cc/s equivale a meno di 0.3 litri di gas persi in un intero anno, contro i 5000 litri che verrebbero persi accettando una perdita di 10 cc/min come da metodologia API con bolle). Anche un recentissimo studio di Gacek [10] – che analizza le prove di tenuta su contatori per idrogeno puro o miscele utilizzando diversi metodi e tre diversi gas traccianti – suggerisce di sostituire i classici metodi di prova con test ad idrogeno laddove si abbia necessità di evidenziare perdite minime (microleaks).
Tali problematiche risultano comunque significativamente ridotte anche nel caso di utilizzo di un'altra metodologia ormai universalmente riconosciuta come procedura di riferimento del settore, ossia quella basata sull'utilizzo di Elio come fluido tracciante. Seppure le modalità di prova siano simili a quelle previste per i test con miscela 95%

N_2 - 5% H_2, la nuova metodologia ad idrogeno sembra presentare alcuni vantaggi rispetto a quella con Elio, in termini di velocità dei test (ridotto tempo di attesa tra le prove) e di pulizia del segnale misurato. L'Idrogeno (massa molecolare 2,016 g/mol) infatti si muove e attraversa le perdite più velocemente dell'Elio (massa molecolare 4,003 g/mol) e molto più velocemente dell'Azoto (massa molecolare 28,01 g/mol).
L'elio tende inoltre ad "aderire" alle superfici e a saturare l'area di test, generando una sorte di rumore di fondo sul segnale misurato, rendendo difficili le letture immediate da parte degli strumenti e contaminando quindi maggiormente la prova successiva (motivo per cui molti produttori utilizzano camere a vuoto per i test con Elio). L'idrogeno invece, essendo estremamente volatile, si disperde istantaneamente verso l'alto, dando maggiori garanzie che ogni rilevazione dello sniffer sia una perdita reale e non un falso positivo dovuto a residuo ambientale.

4. Analisi dei rischi: sicurezza della miscela e criticità tecniche

In un contesto internazionale che punta ad una rapida transizione energetica verso l'utilizzo di vettori energetici "puliti" come l'Idrogeno, individuare metodologie atte a garantire la tenuta dei relativi impianti è attualmente di primaria importanza non solo per una questione economica, ma soprattutto affinché vengano garantite condizioni di assoluta sicurezza.
E' vero che l'alta velocità di diffusione della molecola di idrogeno fa sì che essa salga rapidamente verso l'alto disperdendosi e riducendo quindi i rischi di accumulo in pozzetti o zone basse, ma ciò non basta a fornire una garanzia totale di sicurezza. In caso di fuoriuscita di idrogeno ad alta pressione, infatti, si ha comunque in generale un alto rischio di accensione, visto che l'idrogeno ha un'energia minima di ignizione **(**Minimum Ignition Energy - MIE) di circa 0.017 - 0.02 mJ in miscela stechiometrica con l'aria (rispetto agli 0.29 mJ del metano ed ai 0.24 mJ della benzina). L'accensione può anche avvenire in assenza di una fiamma o scintilla visibile, per esempio per effetto di energia elettrostatica (la scarica che una persona avverte toccando una maniglia trasporta già circa 10-30 mJ) o per attrito meccanico (il flusso turbolento del gas che fuoriesce da una valvola a velocità sonica, se contiene particolato o polvere, può generare per attrito l'energia sufficiente all'auto-accensione). Una micro-perdita di una valvola con tenuta non perfetta, in un ambiente industriale secco, ha quindi una probabilità statistica di innesco molto alta rispetto ad altri idrocarburi.
A differenza di idrocarburi come metano e propano, la molecola di idrogeno inoltre non contiene carbonio, quindi brucia con una fiamma che emette radiazione quasi esclusivamente nell'ultravioletto (UV) e nell'infrarosso (IR) termico, con pochissima emissione nello spettro visibile, mancando le particelle di fuliggine (carbonio incombusto) che, diventando incandescenti, fornirebbero invece la classica luminosità gialla/arancione. Ne consegue che un eventuale Jet Fire sarebbe invisibile all'occhio umano, motivo per cui è anche necessario utilizzare specifici rilevatori UV/IR al posto di classici sensori ottici.

Alla luce di tali rischi, cosa consente allora di utilizzare in sicurezza la miscela 95% N_2 - 5% H_2? Una miscela di Idrogeno in Azoto è considerata non infiammabile se la concentrazione di idrogeno è inferiore al 5.5% [11], dunque è la miscelazione stessa che – considerata la bassa percentuale di idrogeno - consente di operare in sicurezza in ambienti industriali standard. Ne è anche prova il fatto che queste bombole sono classificate con etichetta verde (Gas Inerte/Non Infiammabile) ai fini di trasporto e stoccaggio. Nonostante il Limite inferiore di esplosività dell'idrogeno puro sia il 4%, nella miscela 95% N_2 - 5% H_2 non si ha l'accensione perché le molecole di Azoto (inerte) agiscono come una zavorra termica, scaldandosi senza reagire e impedendo alle molecole di Idrogeno di raggiungere l'energia di attivazione necessaria per avere una combustione stabile. Nella fase di scarico a fine test, peraltro, il gas passa dall'alta pressione alla pressione atmosferica e la turbolenza del getto lo mescola con l'aria: il 5% corrisponde a 50.000 ppm alla sorgente, ma già ad un metro dallo scarico la concentrazione si abbassa fino all'ordine delle centinaia di ppm.
Anche in caso di rottura netta di una connessione o della valvola sotto test, con rilascio massivo di miscela nell'ambiente di laboratorio, la miscela si mescola con l'aria ambiente, che contiene ulteriore azoto (78%) e ossigeno (21%), per cui si ha un'ulteriore diluizione rispetto all'inerte.
Un rischio reale in caso di rilascio massivo in locale chiuso è invece l'anossia (asfissia), come in caso di rilascio di Azoto puro. E' quindi necessario prevenire e gestire tale rischio, per esempio tramite l'utilizzo di sensori di ossigeno ambientale.
L'utilizzo dell'idrogeno nei test di tenuta deve infine tener conto dei materiali presenti nell'impianto e nelle strutture circostanti, a causa del fenomeno dell'infragilimento da idrogeno (l'idrogeno atomico penetra nel reticolo cristallino dei metalli, riducendone drasticamente duttilità e tenacità). Mentre le valvole di sicurezza sono solitamente realizzate in acciai inossidabili austenitici che resistono bene all'idrogeno, una perdita potrebbe colpire una struttura vicina non idonea (es. un supporto in acciaio al carbonio standard o la staffa di un sensore), inducendo infragilimento localizzato su quel componente e causando crolli o rotture a catena. E' quindi importante valutare preliminarmente anche queste problematiche, al fine di tutelare l'integrità strutturale dell'intero contesto di lavoro.

5. Conclusioni

L'utilizzo di una miscela 5% H_2 – 95% N_2 come tracciante nelle prove di tenuta su valvole di sicurezza appare una promettente soluzione, in aggiunta ad altre metodologie già ampiamente diffuse, per garantire la minimizzazione, se non addirittura l'azzeramento, delle perdite in impianti ad idrogeno o in impianti richiedenti una tenuta pressoché ermetica a causa della pericolosità del fluido di processo (anche in termini di impatto ambientale, come nel caso degli impianti frigoriferi). In molte applicazioni, specie in quelle più severe, l'obiettivo è infatti quello che la valvola non solo protegga l'impianto in caso di sovrapressione, ma rimanga un componente perfettamente stagno durante tutto il ciclo di vita operativo, anche al fine

di prevenire la formazione di atmosfere esplosive (ATEX) in prossimità dello scarico o del corpo valvola.
Se da una parte le dimensioni ridotte e l'elevata volatilità dell'idrogeno consentono di raggiungere una sensibilità molto alta di identificazione della perdita (1×10^{-5} cc/s) e la miscelazione con azoto permette di operare senza rischio di infiammabilità, l'utilizzo della procedura prevede comunque determinate accortezze e valutazioni preliminari, anche basate sulla specifica applicazione.
In particolare, è necessario provvedere all'allontanamento dell'idrogeno residuo laddove non avvenga completamente in modo spontaneo, al fine di evitare falsi positivi, valutando caso per caso lo spazio di lavoro e se sia più conveniente - anche dal punto di vista delle tempistiche previste in base al tipo di produzione - operare manualmente o tramite rilevazione automatica.
E' inoltre importante essere in grado di rilevare e gestire eventuali problematiche di anossia ed essere certi della percentuale di idrogeno presente in miscela in modo da non entrare nel campo di infiammabilità.
E' necessario poi valutare di volta in volta anche i casi specifici in cui la pressione di lavoro dell'impianto possa essere molto alta, quelli in cui le dimensioni delle valvole siano significativamente variabili ed infine quelli in cui sussista eventualmente anche il contemporaneo rischio di danneggiamenti dovuti ad infragilimento da idrogeno nei materiali presenti.
Da questo punto di vista, in prospettiva, si ritiene che risulterebbe utile poter analizzare una più ampia base di dati sperimentali, soprattutto se ottenuti tramite stazioni computerizzate automatiche, attingendo ad ulteriori fonti industriali che utilizzino le varie metodologie citate, al fine di valutare anche statisticamente efficacia, affidabilità, sicurezza e convenienza tecnico-economica di ciascuna di esse, anche in relazione alle specifiche condizioni al contorno caratterizzanti i vari test.

6. Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'Ing. Christian Colombini per aver supportato la ricerca condividendo dati ed informazioni derivanti dalla propria esperienza professionale.

Bibliografia

[1] American Petroleum Institute, API Standard 527 "Seat tightness of pressure relief valves", 2020, API Publishing Services, Washington DC.
[2] EN ISO 4126-1:2019. Safety devices for protection against excessive pressure - Part 1: Safety valves.
[3] EN 12266:2012 Industrial valves - Testing of metallic valves (Parts 1 and 2).
[4] Arai K. Study on composition stability of gas mixture through leak artefact. *Measurement: Sensors* 2021; 18: 100243.
[5] Lyu B., Xu D., Li L., Nishimura A., Liu H., Zhang H., Wang T., Huang R., Huang C. A 20 K cryogen-free leak detection system for cryogenic valves by using a GM cryocooler. *Cryogenics* 2021; 117: 103332.

[6] Meng Z., Jin S., Yu M., Li F. Research and testing on the performance of soft-seal structures in liquid hydrogen globe valves. *Processes* 2025; 13: 3858.
[7] Pera F., Pireddu A., Amicucci G.L., Del Prete E. Concentrazione di idrogeno in ambiente chiuso. Atti del Convegno *SAFAP 2023 Sicurezza ed affidabilità delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo*. Brescia, 22-24 novembre 2023.
[8] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento (UE) 2024/573 sui gas fluorurati a effetto serra*, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea il 20 febbraio 2024.
[9] EN 1779:1999/A1:2003. Non-destructive testing - Leak testing - Criteria for method and technique selection.
[10] Gacek Z. Leakage testing of gas meters designed for measuring hydrogen-containing gas mixtures and pure hydrogen. *Energies* 2025; 18: 4207.
[11] EN ISO 10156:2017. Gas cylinders - Gases and gas mixtures - Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets.

Evoluzione di tecnologie informatiche IT e tecnologie operative OT nella transizione digitale e pericolo di incidente rilevante

P. Agnello[1], S. Ansaldi[3], P. Bragatto[2], R. Setola[2]

[1]Inail - Dit
[2] Università Campus Bio-Medico Roma
[3]Esperto della materia

Sommario
L'articolo descrive come, nelle industrie di processo, i sistemi OT (Operational Technology) e IT (Information Technology) — un tempo separati — siano oggi sempre più integrati a causa della transizione digitale, con benefici in termini di efficienza, affidabilità e redditività. Tuttavia, questa integrazione comporta nuovi rischi di attacchi informatici ed errori non intenzionali, che nei siti Seveso possono avere impatti sulla sicurezza fisica, come perdita di contenimento e rilascio di sostanze pericolose. Anche se non sono frequenti gli incidenti gravi dovuti a cause informatiche, si osservano numerosi eventi minori e anomalie, che dovrebbero essere considerati segnali di rischio emergente. I risultati mostrano che la protezione dei sistemi OT e IT è ancora insufficiente, nonostante la maggior parte dei problemi derivi oggi da errori o incidenti non intenzionali. In conclusione, sono fornite alcune indicazioni per gestire meglio la sicurezza dei sistemi OT e IT nei siti Seveso.

1. Introduzione

Il software è sempre più utilizzato per controllare funzioni critiche nelle industrie e gli errori in questi sistemi possono contribuire direttamente agli incidenti. Negli stabilimenti Seveso, questi errori possono avere gravi conseguenze per i beni, le persone e l'ambiente. Il software, o meglio il livello informatico che include hardware e software, è essenziale per organizzare tutte le attività relative alla sicurezza all'interno dello stabilimento, tra cui la gestione della documentazione e della formazione, la pianificazione della manutenzione, la gestione del magazzino e la reportistica di sicurezza. Ancora più importante è il software installato a bordo dei sistemi elettronici di regolazione e controllo, distribuiti nell'impianto. La robustezza dei sistemi software non è meno importante per la sicurezza dell'integrità dei sistemi di contenimento primario, della funzionalità delle macchine rotanti, dell'affidabilità dei sistemi di controllo elettrici ed elettronici e dell'adeguatezza dei fattori umani e organizzativi. A differenza di altri sistemi, il software non è soggetto a forme di degrado fisico, ma può essere soggetto a configurazioni errate, difetti di progettazione e implementazione che potrebbero emergere anche a distanza di tempo, a utilizzi impropri per interfacce utente mal progettate o scarsamente documentate e a obsolescenza, dovuta all'incapacità di adattarsi ai cambiamenti del contesto esterno. Il degrado fisico è possibile per le componenti hardware, ma viene

solitamente trascurato, poiché l'obsolescenza è molto più rapida. La crescente complessità e le interdipendenze rendono possibili attacchi da parte di agenti software dannosi, solitamente introdotti intenzionalmente. Software con difetti interni, scarsamente documentati, mal utilizzati e non protetti da agenti esterni possono essere la causa principale di interruzioni operative prolungate e persino perdite di contenimento, con gravi conseguenze per l'uomo e l'ambiente. Il problema del software difettoso come causa di incidenti è ben noto da precedenti indagini [1] Oggi, con la digitalizzazione di tutte le attività, il problema della vulnerabilità del software deve essere affrontato in termini più generali, pensando al complessivo livello informatico. Questo è un termine più ampio e include la parte hardware che supporta il software. Per il controllo del rischio di incidenti rilevanti, il "livello Informatico" non è meno importante dei componenti chimici, meccanici, elettrici e gestionali, sui quali è ancora concentrata tutta l'attenzione degli operatori.

1.1 Tecnologia dell'informazione IT e tecnologia operativa OT

Il termine "livello informatico" è molto generico e rappresenta un "ombrello" che include l'Information Technology (IT) e la Operation Technology (OT). I sistemi OT includono hardware e software per monitorare e controllare le operazioni industriali (come DCS, PLC, SCADA, sensori e robotica). I sistemi IT gestiscono invece le funzioni aziendali legate ai dati — comunicazioni, vendite, finanza, risorse umane, ecc. Nei siti Seveso, la sicurezza è garantita da barriere tecniche (basate su OT, per prevenire perdite e incidenti) e da barriere organizzative (basate su IT, per gestire procedure e documentazione). Poiché entrambe le tipologie di sistemi sono cruciali per la prevenzione degli incidenti rilevanti, OT e IT devono essere considerate risorse fondamentali per la sicurezza complessiva. Tradizionalmente isolate, OT e IT si stanno oggi integrando grazie alla Quarta Rivoluzione Industriale e all'Industrial Internet of Things (IIoT), con notevoli vantaggi in termini di efficienza, affidabilità, sicurezza e redditività [2]. La stretta integrazione tra OT e IT comporta nuovi rischi, in particolare di sicurezza informatica. Nelle industrie di processo, questi rischi non si limitano alla perdita o divulgazione di dati, ma possono anche compromettere i sistemi di controllo, causando perdite di contenimento e rilascio di sostanze pericolose, con gravi effetti su lavoratori, ambiente e risorse.

1.2 Stato dell'arte

Il rischio legato alle debolezze del livello informatico, sia IT che OT, rappresenta un rischio emergente per le industrie interessate dalla direttiva Seveso ed è pertanto fondamentale disporre di dati più numerosi e affidabili per monitorare lo scenario e comprendere la reale portata del fenomeno, al fine di definire indicazioni concrete per gestire il rischio con largo anticipo. La rilevanza della sicurezza informatica per i sistemi IT è stata riconosciuta a livello globale, come sottolineato dal vasto numero di studi sull'argomento e da diverse iniziative legislative come, ad esempio, la direttiva

UE NIS2. Tuttavia, solo di recente si è assistito a un'attenzione specifica sulla sicurezza informatica OT a causa di alcuni episodi come il fermo di 10 giorni del più grande oleodotto degli Stati Uniti [3]. Tuttavia, al momento sono ancora pochi i dati disponibili sul rischio informatico presso l'impianto Seveso, di fatto solo precoci allarmi piuttosto che prove concrete, ma è importante raccogliere questi dati, organizzare le informazioni ed estrarre conoscenze che possano essere utili a chi deve prendere decisioni. Nella letteratura scientifica sono presenti alcune rassegne eccone due apparse di recente: la prima di Stergiopoulos ed altri [4] riguarda solo il settore oil & gas con 42 eventi, tra upstream, midstream e downstream. Metà con gravi conseguenze. Attacchi più frequenti: malware e phishing esterno; iniezione interna. Impatto su logica di controllo, disponibilità e proprietà. 10 conseguenze a cascata con perdite ingenti. La seconda revisione di Iaiani ed altri [5] copre vari settori e copre 82 casi: 35 eventi sono accidentali, 47 intenzionali. In breve, si può affermare che una buona valutazione del rischio informatico è oggigiorno di fondamentale importanza per le industrie di processo [6] e per gli stabilimenti Seveso. I dati disponibili in letteratura si riferiscono sempre a eventi con conseguenze importanti, mentre è molto più difficile reperire dati su incidenti minori o quasi incidenti.

1.3 Obiettivi

L'obiettivo di questo lavoro è raccogliere dati concreti sui rischi legati alla vulnerabilità del livello cyber, sia OT che IT, senza dover attendere incidenti gravi. La maggior parte degli eventi registrati sono involontari. Comprendere i segnali deboli provenienti dal settore Seveso può aiutare a comprendere in anticipo l'emergere di questo nuovo rischio, per controllarlo meglio.

2. Materiali e metodi

2.1 Dati disponibili

A tal fine, è fondamentale raccogliere costantemente dati su anomalie, quasi incidenti e incidenti minori che si verificano nel funzionamento degli impianti e correlati a eventi informatici. Una fonte affidabile di informazioni proviene da INAIL/EsOpIA, un archivio contenente oltre seimila segnalazioni di incidenti e quasi incidenti, raccolte con cura negli ultimi vent'anni durante le ispezioni presso i circa mille impianti Seveso in Italia.

Gli ispettori Seveso insistono nel segnalare i quasi incidenti perché ritengono che sia un'importante opportunità per imparare dall'esperienza. Pertanto, in INAIL/EsOpIA si possono trovare anche molte informazioni sulle azioni correttive intraprese dall'azienda per evitare il ripetersi di guasti, che possono essere utili all'intera comunità Seveso. In questo archivio sono raccolti circa 6000 eventi [7]. Sfruttando questo repository unico, possiamo indagare quanti eventi siano riconducibili a problemi informatici. Lo studio distingue gli incidenti dovuti a intenzioni ostili da quelli involontari. Tra questi ultimi, le criticità sono dovute alla scarsa qualità del

software, all'inaffidabilità dell'hardware, all'inadeguata gestione degli accessi, alla negligenza e alla sciatteria degli operatori.
I documenti disponibili nel repository INAIL/EsOpIA sono di qualità variabile e la relazione causale non è sempre ben descritta, ma l'uso di metodi di apprendimento automatico consente di estrarre informazioni non così evidenti a una lettura diretta. In questo modo è possibile costruire un modello causale credibile di potenziali incidenti innescati da eventi informatici [8]. Per un confronto più ampio, si considerino incidenti e infortuni segnalati in altri database di incidenti, tra cui il francese Barpi/ARIA e l'europeo eMars.

2.2 Metodi

Sono stati utilizzati due metodi per esplorare i repository degli incidenti sopra menzionati. Il primo è finalizzato a individuare i guasti verificatisi e a comprenderne cause e conseguenze. Il secondo è un po' più avanzato e si concentra sul ruolo effettivo del software nella dinamica degli incidenti.
Il primo obiettivo è individuare nei database degli incidenti (ARIA o ESOPIA) gli eventi, gli incidenti o i quasi incidenti causati da qualsiasi problema a livello informatico, inclusi guasti software e attacchi informatici. Per raggiungere questo obiettivo, come primo passo, sono state selezionate alcune parole chiave e ricercate tra i numerosi eventi registrati nei database. Le parole chiave ricercate includono "software", "cyber", "malware" e "virus". Il termine "software" è comune e spesso presente nel testo, ma non è correlato all'incidente. L'evento è stato incluso solo se tra le cause segnalate era presente un guasto software.

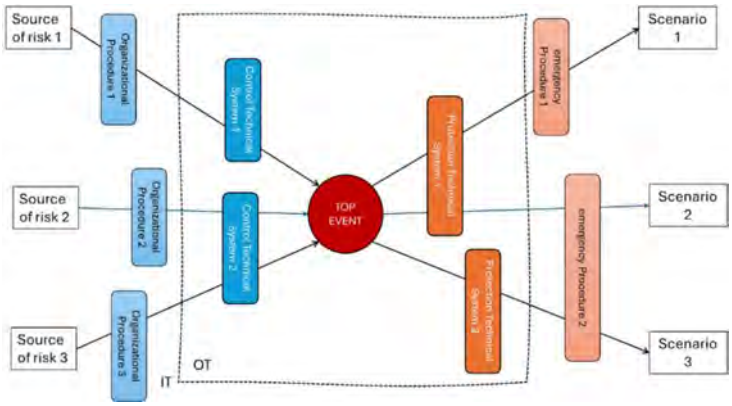


Figura 1. Modello a farfalla per barriere di sicurezza preventive e protettive contro i rischi informatici.

Poiché EsOpIA è in grado di individuare le relazioni causali nascoste nel documento, è importante disporre di un modello definito a priori per affrontare l'analisi automatica. A tal fine, è stato scelto il metodo bow-tie. Il bow-tie posiziona l'evento principale al centro, a sinistra le barriere che impediscono il verificarsi dell'evento principale, a destra le barriere che mitigano le conseguenze quando si verifica l'evento principale. L'evento principale può essere la perdita di contenimento o l'interruzione del servizio, che in alcuni casi può essere non meno importante. La nostra analisi si concentra sul livello cyber, che unisce OT e IT. Altre barriere non sono

state analizzate, in quanto esulano dallo scopo del documento. La Figura 1 riassume in un'unica immagine l'importanza del livello cyber, secondo lo schema bow-tie. Al centro si trova l'evento principale. A sinistra ci sono i sistemi di protezione, più esterni i sistemi IT che supportano la parte procedurale e organizzativa, più interna la parte OT che presiede al controllo diretto del processo e alla prevenzione (es. interblocchi). A destra, all'interno, c'è la parte OT, che presiede ai vari sistemi di protezione (es. sistemi automatici a diluvio), esternamente c'è la parte IT, che presiede alla gestione delle emergenze (es. sistemi di telecomunicazione di emergenza). IT e OT come avete capito sono essenziali a ogni livello.

3. Risultati

3.1 Esperienza operativa in Italia

In EsOpIA sono stati registrati 65 eventi nel periodo 2007-2022. Nessun evento è chiaramente collegato ad attacchi intenzionali, ma la maggior parte di essi è dovuta a errori di codifica nel software dei sistemi OT. Le cause plausibili degli errori includono specifiche software inadeguate e negligenza da parte degli sviluppatori. In diversi casi gli errori si sono verificati perché non è stata considerata una situazione specifica; in questo caso è stata adottata la classificazione "errore di progettazione del software", per distinguere questi casi dagli errori di implementazione del software. Ci sono anche alcuni eventi classificati come "crash software". Si tratta di casi brevemente descritti, e non è possibile capire se si tratti di errori o difetti nel software o della presenza di virus o altri software dannosi. Il termine "uso improprio del software" è stato utilizzato per gli eventi originati da un uso improprio del software. Le cause includono un'interfaccia utente scadente o una formazione inadeguata. Ci sono anche casi interessanti dovuti a software con versioni obsolete o incompatibili, che sono stati classificati come "obsolescenza software". I guasti nei sistemi IT, classificati come "guasti del software IT", non hanno un impatto diretto sui sistemi fisici, ma possono compromettere le procedure di sicurezza diventando una causa remota di perdita di materiali. Come accennato, non sono stati rilevati attacchi informatici in EsOpIA. Ciò non significa che non vi siano stati attacchi informatici negli impianti Seveso italiani, ma piuttosto che questi, fortunatamente, non hanno avuto conseguenze che hanno coinvolto materiali pericolosi e, di conseguenza, non vi è alcun obbligo di segnalarli agli ispettori Seveso.

Le conseguenze sono state raggruppate in cinque tipologie di gravità crescente. Non sono state assegnate conseguenze quando l'evento segnalato non era un quasi incidente, ma solo una situazione potenzialmente pericolosa. "Discontinuità operativa" significa che l'operazione è stata interrotta per un intervallo di tempo, solitamente poche ore, nel peggiore dei casi un paio di giorni. "Perdita di contenimento" significa che si è verificata una forma di rilascio di materiali pericolosi (ad esempio una perdita) senza altre conseguenze per le persone, le risorse e l'ambiente. "Apparecchiature danneggiate" significa che una conseguenza diretta o

indiretta del guasto del software è stato un danno, solitamente riparabile. “Incendio” significa che un incendio è stato causato direttamente o indirettamente da un guasto del software, senza ulteriori conseguenze. Non sono state segnalate conseguenze ambientali. Nella Tabella 1 sono mostrate le modalità di guasto del software e le relative conseguenze, come specificato in EsOpIA. È importante aggiungere che tutti gli eventi segnalati sono relativi a impianti chimici di tipo batch.

Conseguenze→ ↓Modalità di errore	nessuna	Discon-tinuità operativa	perdita conteni-mento	bene danneg-giato	Incendio
Err. Software OT – codifica	5	13	10	1	2
Obsolescenza del software OT		3			
Err. Software OT – progettazione	3	6	5	1	1
Uso improprio del software OT		2	1		
Err. Software OT – sistema		5			
Err. Software IT	4	2	1		
TOTALI	12	31	17	2	3

Tabella 1. Modalità di guasto informatico ed effetti fonte EsOpIA.

Analizzando nel dettaglio il contenuto dei report, è stato studiato l’impatto degli eventi informatici sulle diverse barriere di sicurezza, secondo lo schema bow-tie delineato nel capitolo 3. I risultati sono stati riassunti nella Tabella 2. La tabella è organizzata come segue: la prima riga rappresenta i guasti delle barriere verificatisi nella sequenza di incidenti, nella seconda riga i successi delle barriere che hanno interrotto la sequenza che avrebbe portato all’incidente grave. Le prime quattro colonne rappresentano le barriere preventive, le ultime quattro quelle protettive. Tra le barriere preventive e protettive, il top event. Dalla seconda riga della tabella, in 36 casi l’intervento manuale ha arrestato le conseguenze del guasto, in 7 casi è stato un sistema meccanico, un disco di rottura o una valvola ad arrestare la sequenza. Solo in 13 casi si è verificato l’evento top e le procedure di emergenza hanno evitato conseguenze gravi.

	Barriere preventive >>>>				Top Event	<<<< Barriere protettive			
	Barriere IT procedure	Barriere OT controlli aut	intervento manuale	Sistemi fisici		Sistema fisico	intervento manuale	Barriere OT controlli aut	Barriere IT procedure
Barriere fallite	7	53	2	4	13	0	0	0	0
Barriere di successo	2	0	36	7		1	0	1	11

Tabella 2. Analisi Bowtie, fonte EsOpIA. Le barriere a livello informatico sono in blu.

3.2 Esperienza operativa in Francia

Una preziosa fonte di informazioni sugli incidenti è il BARPI/ARIA, che copre gli eventi segnalati in Francia e in Europa. Tra le migliaia di incidenti segnalati da anni, stanno

iniziando a comparire alcune perdite di contenimento causate da un evento informatico. Nel 2019 è stato pubblicato un avviso con quattro casi: un impianto di trattamento delle acque reflue colpito da un malware di criptovaluta; un guasto del sistema di allerta; un guasto del sensore causato da un circuito obsoleto e da un PLC programmato in modo errato. Negli anni successivi si sono verificati altri episodi che, sebbene non raccolti, sono reperibili direttamente nel database, ad accesso aperto. Nella ricerca sono state utilizzate le stesse parole chiave del paragrafo 3.1. Attualmente, nel database si trovano 12 eventi dovuti ad attacchi informatici, 1 con conseguenze gravi. I record trovati nel database sono molto concisi e l'unica distinzione è stata tra attacchi a livello OT e attacchi a livello IT. Sono inoltre presenti 12 eventi dovuti a malfunzionamenti del software, 3 con gravi conseguenze per i lavoratori. Per i guasti software è stata utilizzata la stessa classificazione della Tabella 1. È importante notare che sono stati considerati tutti i settori industriali. A differenza di EsOpIA, dei 24 eventi considerati, solo 11 riguardano impianti chimici; 4 riguardano impianti di gestione dei rifiuti, 3 impianti eolici, 3 impianti a gas e il resto è suddiviso tra impianti di produzione di esplosivi, idroelettrici e cementifici. Per le modalità di guasto sono state utilizzate le stesse classificazioni della Tabella 1, con l'aggiunta di due modalità di attacco informatico per i sistemi IT e per i sistemi OT.

Conseguenze→ ↓Modalità di errore	nessuna	Discon-tinuità operativa	perdita di conte-nimento	bene danneg-giato	incendio
Err. Software OT			4	2	3
Obsolescenza software OT			1		
Uso improprio software OT			1		
Err. Software IT			1		
Attacco informatico OT	2	3	1		
Attacco informatico IT	4	2			
TOTALI	6	5	8	2	3

Tabella 3. Modalità di guasto informatico ed effetti, fonte BARPI/ARIA

3.3 Esperienza operativa in Europa

La Direttiva Seveso impone alle autorità nazionali di caricare un rapporto dettagliato di qualsiasi incidente rilevante nel database eMars, un database gestito dal Centro Comune di Ricerca (JRC) della Commissione Europea. Al momento non ci sono incidenti correlati ad attacchi informatici. Ci sono solo alcuni eventi in cui l'inadeguatezza del software è stata inclusa tra le cause. Nella tabella 4 sono riepilogati i 6 eventi accaduti nel periodo 2010-2021, secondo lo schema "modalità di guasto e conseguenze" utilizzato per la tabella e la tabella 3. È necessario sottolineare che in eMars ci sono solo incidenti con conseguenze molto gravi e la maggior parte degli eventi correlati al software ha conseguenze al di sotto dei limiti richiesti per la segnalazione in eMars. Ovviamente, non ci sono eventi senza conseguenze e anche l'interruzione delle operazioni non è rilevante. Purtroppo, in due casi, le conseguenze

hanno incluso la perdita di vite umane. Degli eventi considerati, 3 si sono verificati nel settore petrolifero e del gas, 2 nell'industria chimica e 1 nel settore metallurgico.

Conseguenze→ ↓Modalità di errore	perdita contenimento	bene danneggiato	incendio	vittime
Err. Del software OT – codifica	1			
Obsolescenza software OT	1		1	1
Err. Software OT – progettazione	1		1	1
Uso improprio software OT	2			
Err. Software IT	1			
TOTALI	6		2	2

Tabella 4. Modalità di guasto informatico ed effetti fonte eMARS

4. Discussione e conclusioni

4.1 Problemi emergenti

Nei documenti analizzati, sia in EsOpIA e nelle altre fonti, è evidente che errori di progettazione e sviluppo del software sono la causa di oltre la metà degli incidenti nel livello informatico. Alla fine, due terzi degli eventi registrati sono dovuti a errori in una o più fasi dello sviluppo del software (progettazione, codifica e test). Più della metà degli errori è dovuta a errori di codifica, i cosiddetti "bug". È interessante sottolineare che i guasti software sono ricorrenti negli impianti di piccole e medie dimensioni, che hanno un minore potere contrattuale nei rapporti con i fornitori di software. In EsOpIA troviamo, ad esempio, una reazione esotermica inaspettata che, senza l'intervento manuale dell'operatore, potrebbe portare a un "runaway". Un'indagine sull'evento ha rivelato che la causa era un errore nel software che calcolava la massa del prodotto caricato in base ai dati di flusso. Il software incriminato è entrato in funzione solo in caso di malfunzionamento delle celle di pesatura e non era mai stato testato.

Il 5% degli eventi considerati è correlato all'aggiornamento effettuato in modo negligente o intempestivo. Anche in EsOpIA si verifica un caso simile, con conseguenze minori. Una versione aggiornata del software di controllo DCS, appena caricata, ha causato un comportamento anomalo dei sistemi di termoregolazione, con il riscaldamento indesiderato di tre reattori e la rottura di una serpentina.

L'interfaccia utente dei software OT può essere più complessa rispetto a quella dei software più diffusi. Questo può essere una delle cause dei frequenti errori segnalati, insieme alla scarsa o nulla formazione sull'utilizzo del software. Circa il 6% degli eventi considerati è dovuto a queste cause. In un evento EsOpIA, ad esempio, il supervisore, a seguito del blocco di un singolo computer, ignorando l'interoperabilità dei vari computer nella sala controllo, ha bloccato tutti i reattori che potevano ancora essere gestiti da altri computer nella sala controllo. In altre parole, una soluzione di sicurezza, come l'interoperabilità, è stata vanificata dalla mancanza di formazione.

Il software di gestione negli impianti Seveso coinvolge molti aspetti della sicurezza: manutenzione, formazione, carico e scarico. Alla fine, almeno il 10% degli eventi registrati è dovuto a problemi del software di gestione che producono gravi effetti sulla sicurezza. In EsOpIA, ad esempio, vengono segnalati problemi relativi alle etichette dei prodotti. Si registra un caso di inversione dei dati nelle etichette dei prodotti e un altro caso di etichette senza il nome. In entrambi i casi, gli errori sono stati intercettati, ma vi lasciamo immaginare che altrimenti ci sarebbero state gravi conseguenze. Dalle prove raccolte, il problema degli attacchi informatici sembra ancora circoscritto. Molti stabilimenti Seveso, infatti, non rappresentano un business appetibile per i criminali. In ARIA, gli impianti di trattamento dei rifiuti e i parchi eolici sono gli impianti più coinvolti, per la presenza di eco-attivisti che li prendono di mira.

4.2 Osservazioni e suggerimenti

L'elevata digitalizzazione dei processi industriali ha reso le imprese più efficienti, ma anche più vulnerabili dal punto di vista software, sia per i sistemi IT che OT. Le differenze tra grandi aziende e PMI sono significative: le prime dispongono di maggiori risorse per sviluppo e manutenzione del software, mentre le seconde risultano più esposte a problemi e vulnerabilità. Lo studio dei quasi incidenti serve a individuare problemi emergenti che oggi appaiono minori, ma che nel tempo potrebbero causare gravi incidenti. È quindi importante considerare anche l'affidabilità del software nell'analisi del rischio, al pari della strumentazione fisica. Sebbene nei siti soggetti alla Direttiva Seveso III non si siano ancora verificati incidenti rilevanti dovuti a cause informatiche, i dati indicano che il rischio legato al software è in aumento, sia in Italia che in Francia, e non deve essere sottovalutato.

Per quanto riguarda gli operatori che utilizzano sistemi digitali per la gestione e il monitoraggio dei processi industriali, si raccomanda che i software siano personalizzati in base alle specifiche esigenze dell'azienda. Gli sviluppatori devono conoscere a fondo i processi, i rischi e le procedure operative. La progettazione deve avvenire con il coinvolgimento costante di esperti di processo e di apparecchiature. I test preliminari devono essere completati senza criticità. Eventuali problemi vanno analizzati e risolti prima del rilascio. I sistemi devono includere console di verifica continua del corretto funzionamento, gestite da personale formato per riconoscere segnali e anomalie. È essenziale garantire modularità e indipendenza tra le parti critiche per evitare che un guasto locale comprometta l'intero sistema. Nel caso di anomalia, essa va sempre investigata, distinguendo se deriva da errori software o da deviazioni del processo operativo.

Gli auditor e gli enti di controllo che vanno a verificare la sicurezza degli impianti dovranno aggiungere alle normali liste di feedback quegli elementi di analisi approfondita dei sistemi IT e OT implementati in azienda per verificare che tutto sia "sotto controllo". Sarà utile, ad esempio, chiedere quanti e quali interventi di manutenzione, o interruzioni, nell'utilizzo dei sistemi software, ci siano stati in un dato periodo e se sia stata valutata e compresa l'entità dei danni a cui potrebbero portare.

È inoltre necessario verificare l'adeguata preparazione degli operatori di console nel rilevare scostamenti nei parametri che potrebbero causare problemi. Dovranno essere inoltre approfonditi gli aspetti di "indipendenza" dei processi dalle piattaforme software di riferimento qualora siano presenti "bug" che ne compromettano il corretto funzionamento.
Questo studio si propone di fornire spunti utili anche per un aggiornamento normativo. In attesa di un aggiornamento della normativa Seveso che consideri esplicitamente i rischi derivanti dall'interferenza tra rischi informatici e rischi di processo [9], è utile che i fattori informatici siano ora considerati nell'identificazione e nell'analisi dei rischi nei rapporti di sicurezza. Nella pratica attuale dei rapporti di sicurezza Seveso, gran parte dell'attenzione è ancora rivolta all'affidabilità delle barriere fisiche e, in misura minore, a quelle organizzative e procedurali. L'attenzione alla vulnerabilità delle barriere informatiche è ancora molto scarsa, anche se il problema, come dimostrano i dati riportati nell'articolo, è in continua crescita. Anche la politica per la prevenzione degli incidenti rilevanti (MAPP) dovrebbe includere riferimenti espliciti alle problematiche informatiche. Il sistema di gestione della sicurezza dovrebbe includere procedure e istruzioni operative per impedire che errori o atti intenzionali in ambito informatico abbiano ripercussioni sulla sicurezza di processo. Si auspica che questi suggerimenti vengano recepiti dal legislatore europeo, che potrebbe conferire carattere vincolante alla valutazione delle vulnerabilità informatiche nell'area Seveso.

Bibliografia

[1] Wong, WE, Debroy, V., & Restrepo, A. (2009). The role of software in recent catastrophic accidents. IEEE reliability society 2009 annual technology report, 59(3)

[2] Ansaldi, SM, Agnello, P., Bragatto, P. (2018). Smart safety systems: Are they ready to control the hazard of major accidents. WIT Trans. on the Built Env., 174, 169-180.

[3] Beerman, J., Berent, D., Falter, Z., Bhunia, S. 2023. A review of colonial pipeline ransomware attack IEEE/ACM 23rd Int. symp. on cluster, cloud, internet computing 8-15

[4] Stergiopoulos,G., Gritzalis,D., Limnaios,E. 2020. Cyber-attacks on the Oil & Gas sector: A survey on incident assessment and attack patterns. IEEE Access, 8, 128440-128475.

[5] Iaiani M., Tugnoli A., Bonvicini S., Cozzani V. (2021) Major accidents triggered by malicious manipulations of the control system in process facilities Safety Science 134, 105043

[6] Nobili, M., Fioravanti, C., Guarino, S., Ansaldi, SM, Milazzo, MF, Bragatto, P., & Setola, R. (2023). DRIVERS: A platform for dynamic risk assessment of emergent cyber threats for industrial control systems. IEEE 31st Med. Conf. on Control and Automation (MED) 395-400

[7] Ansaldi, SM, Agnello, P., Pirone, A., Vallerotonda, MR (2021). Near miss archive: a Challenge to share knowledge among inspectors and improve Seveso inspections. Sustainability, 13(15), 8456
[8] Simone, F., Ansaldi, SM, Agnello, P., Patriarca, R. (2023). Industrial safety management in the digital era: Constructing a knowledge graph from near misses. Computers in Industry, 146, 103849
[9] Bragatto, P., Agnello, P., Ansaldi, S., Setola, R. (2026). Vulnerabilities of information and operational technologies and control of major accident hazard. Safety and Reliability, 1–29.

Valutazione dell'efficienza di sistemi di prova Small Punch Creep Test (SPCT)

A. Alvino[1], A. Antonini[1], S. Budano[2], D. Lega[1], A. Di Gianfrancesco[2], F. Troiani[2]

[1]Inail - Dit
[2]Compusystem Srl, Roma.

Sommario
Lo sviluppo di una procedura corretta e ripetibile per l'esecuzione di misure con la metodica dello small punch creep test (SPCT) è stato oggetto di notevoli sforzi, culminati con il rilascio dello standard EN 10371:2021. Ad oggi, tuttavia, sussiste ancora un notevole interesse nell'acquisizione di informazioni per valutare l'incertezza di misura dei dati sperimentali acquisiti durante le misure.
Nel caso dello SPCT, l'incertezza di misura è associata a più fattori, i più importanti dei quali sono correlati con la preparazione del provino miniaturizzato, con il materiale di cui è composto il provino stesso e, non ultimo, con l'incertezza complessiva degli strumenti di misura, direttamente dipendente dal tipo di macchina di prova adoperato. Attualmente nei laboratori Inail sono installate e funzionanti tre macchine SPCT, che sono formalmente in grado di eseguire la prova secondo la norma, pur essendo state progettate e costruite con tre tecnologie significativamente diverse.
Questo lavoro illustra le attività sperimentali svolte per valutare l'efficienza di questi tre sistemi di prova. I differenti approcci tecnologici adottati in fase di progettazione hanno restituito risposte interessanti in termini di prestazioni; riguardo alle incertezze di misura, le variabili più impattanti su tale grandezza si sono rivelate il sistema di vuoto/atmosfera inerte, il controllo della temperatura forno/provino, ed i dispositivi di misura dello spostamento/inflessione del provino.

1. Introduzione

La metodologia di prova *Small Punch Test* (SPT) è una tecnica sperimentale miniaturizzata impiegata per la valutazione delle proprietà meccaniche e del comportamento allo scorrimento viscoso (creep), che è stata recentemente standardizzata (CEN EN 10371, ASTM E3205-20, RCC-MRx) e viene sempre più utilizzata in ambito di ricerca e sviluppo per determinare le proprietà di trazione e creep, ed in particolare per la caratterizzazione a creep del materiale esercito per valutarne la vita residua. La prova SPCT utilizza provini miniaturizzati, in forma di dischi con spessore t dell'ordine di 0,3–0,5 mm, cosicché la campionatura da analizzare può essere estratta dai componenti in esercizio in modalità 'non distruttiva'. Normalmente ci si avvale di provini con t=0.5mm, vincolati tra due matrici e deformati mediante un punzone sferico sottoposto a forza costante F (*Force F*) (indentazione), in ambiente termicamente controllato, ossia alla temperatura T tipica

delle condizioni operative del componente con cui è realizzato il materiale in prova. Durante il test viene registrato lo spostamento del punzone, (*Displacement* ν) e l'effettiva deformazione del provino Deflessione (*Deflection u*) in funzione del tempo fino alla sua rottura o a un tempo o a deformazione predefiniti, ottenendo la curva caratteristica di scorrimento viscoso nel tempo, tipica delle prove di creep. L'andamento della curva *Deflection vs time* presenta le tre fasi:

- Creep primario: penetrazione repentina del punzone nel dischetto in prova causato dall'applicazione della forza.
- Creep secondario: deformazione costante nel tempo.
- Creep terziario: inizio del processo di rottura, penetrazione del punzone nel dischetto.

A differenza della prova di creep standard, eseguita utilizzando un provino sollecitato con carico uniassiale, nella prova SPCT lo stato tensionale indotto è multiassiale, dovuto alla sfericità del punzone. Numerosi studi hanno dimostrato la possibilità di correlare i parametri ottenuti dallo SPCT con quelli derivanti da prove uniassiali tradizionali, attraverso opportune relazioni di conversione basate su modelli empirici o semi-analitici. In ogni caso la prova di SPC risulta particolarmente vantaggiosa nei casi in cui la disponibilità di materiale sia limitata o quando sia necessario prelevare campioni direttamente da componenti in esercizio, per valutarne la vita residua, l'analisi del degrado microstrutturale, consentendo il confronto tra diversi stati di evoluzione metallurgica dell'acciaio, con costi e tempi significativamente inferiori rispetto alle metodologie standard [1-5]. Nonostante i numerosi vantaggi offerti dallo Small Punch Creep Test, la tecnica presenta alcuni limiti che ne condizionano l'applicazione e l'interpretazione dei risultati. Come accennato, il principale aspetto critico è rappresentato dalla complessità dello stato tensionale indotto nel provino, che risulta fortemente multiassiale e non direttamente assimilabile alla condizione uniassiale delle prove di creep convenzionali. A questa problematica si potrebbe aggiungere quella derivante dalla miniaturizzazione del provino la cui estrazione potrebbe risultare poco rappresentativa specialmente per materiali non troppo omogenei, o non uniformemente esposti a medesime condizioni ambientali e di esercizio. Di conseguenza, l'estrazione di parametri meccanici equivalenti a quelli derivabili dalle prove di creep tradizionali richiede l'impiego di modelli di correlazione, la cui accuratezza dipende dalla disponibilità di dati di calibrazione specifici per il materiale analizzato. Ulteriori fonti di incertezza sono legate alla sensibilità della prova, alle condizioni di preparazione del provino, alla finitura superficiale e all'allineamento del sistema punzone–matrice: tutti fattori che possono influenzare significativamente la riproducibilità dei risultati. Le prospettive future dello SPCT sono orientate principalmente verso una maggiore standardizzazione della metodologia di prova e delle procedure di analisi, nonché verso lo sviluppo di modelli numerici avanzati basati su simulazioni agli elementi finiti, in grado di descrivere con maggiore accuratezza il campo di tensioni e deformazioni nel provino. L'integrazione dello SPCT con tecniche di caratterizzazione microstrutturale e con approcci di *machine learning*

per l'elaborazione dei dati sperimentali potrebbe ulteriormente migliorare la capacità predittiva della tecnica. In tale contesto, lo SPCT è destinato a consolidarsi come strumento complementare alle prove tradizionali, particolarmente efficace per la valutazione rapida delle proprietà di creep e della vita residua di componenti critici.
A tale proposito il laboratorio di Dipartimento Innovazioni Tecnologiche (DIT) di INAIL si è dotato di 1+2 sistemi di prova SPC. Il primo sistema, seppure datato, ha consentito di acquisire le conoscenze metodologiche sulla tematica, la conduzione delle prove e l'elaborazione ed interpretazione dei dati sperimentali, rivelandosi utilissimo per la progettazione e realizzazione delle due successive evoluzioni del sistema di prova. Sulla base delle esperienze acquisite è state realizzata una seconda macchina SPC con soluzioni tecnologiche molto innovative rispetto alla prima ed infine una terza macchina in via di acquisizione da parte INAIL, comunque già operativa con tecnologia estremamente innovativa.
È necessario evidenziare che, essendo la metodologia SPC focalizzata verso uno specifico settore investigativo molto focalizzato e di nicchia, le macchine di prova non suscitano ancora un interesse commerciale dei fornitori dei tradizionali sistemi di prova materiali, risultando più delle attrezzature a disegno 'prototipale' e messe a punto dai ricercatori/laboratori del settore.

2. Nucleo del sistema

In figura 1 è riportato lo schema del sistema di applicazione del carico durante la prova come indicato dalla normativa EN 10371:2021, mentre in figura 2 è riportata la foto reale delle parti costituenti il dispositivo di bloccaggio del campione e del punzone.



A Punzone; B Provino; C Elemento sferico; D Elemento ceramico per misura deflessione; E Termocoppia

Figura 1. Schema del Test Setup e del provino

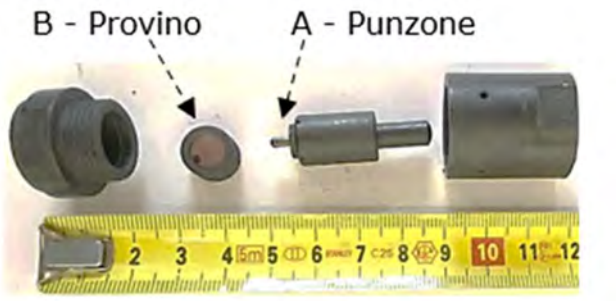


Figura 2. Foto del Test Setup in scala reale realizzato in superlega di nichel

Questi componenti sono il 'nucleo' del sistema, concorrendo a contenere il provino e alla sua indentazione e sono realizzati in Nimonic 80 per avere un'elevata resistenza alle alte temperature. L'indentazione del provino, inizio della prova SPC, è avviata

dopo aver raggiunto la temperatura imposta, che deve rimanere costante per l'intera durata del test. Il punzone viene azionato ed indenta il dischetto fino a raggiungere il valore di forza *F* imposto, che rimane costante fino alla rottura del provino, o al raggiungimento di un valore di deflessione imposto, o a tempo di prova prestabilito. La forza viene applicata con delle masse tarate (peso morto) o con un attuatore controllato da una cella di carico tarata.

3. Macchine di prova. Aspetti generali.

Nel laboratorio DIT di Inail sono disponibili le seguenti facilities per la conduzione delle prove di Small Punch Creep:

- Macchina di prova SPUTT 500, società costruttrice MMV Repubblica Ceca, anno di messa in servizio anno 2010
- Macchina di prova VI-2025 – SP, Vacuum Induction, anno di messa in servizio 2025, società costruttrice COMPUSYSTEM (disponibile nel laboratorio e in via di acquisizione da parte di INAIL).
- Macchina di prova X – 1906 – SPCT, società costruttrice ITALSIGMA (IT), messa in servizio da COMPUSYSTEM, anno 2020.

3.1. Macchina di prova SPUTT 500

La macchina è illustrata in figura 3. Le caratteristiche principale di questo sistema di prova sono: F_{max}=400N, T_{max}=600°C. La prova inizia portando a temperatura il provino con un forno a resistenza a 2 sezioni. La temperatura del forno (camera di prova) è regolata e controllata da 2 unità a microprocessore. Le 2 termocoppie (TC) di misura, di tipo 'K', sono posizionate nella camera del forno. In fase di taratura viene acquisita la correlazione tra la temperatura
del forno e quella del provino alloggiato nel Test Setup: non c'è un controllo diretto con TC della temperatura sul provino. La forza di prova F di prova viene applicata con le masse identificate come 'peso morto'. La misurazione della deflessione (Deflection u) è misurata per via 'indiretta' con l'ausilio di una leva che aziona un misuratore di deformazione (LDT *Linear Displacement Transducer*). Nella camera di prova viene insufflato gas inerte (argon) per contenere l'ossidazione del provino. La regolazione del flusso del gas è eseguita con il solo manometro della bombola. Il sistema acquisisce digitalmente le variabili e il tempo di prova.

3.2. Macchina di prova VI-2025 – SP

Il concept per la realizzazione di questo sistema è stato focalizzato per superare i limiti derivanti dalle tecnologie standard con cui sono realizzate le macchine tradizionali a 'peso morto'. Il sistema è dotato di un attuatore elettrico servo-controllato da un algoritmo a loop-chiuso ricavato dal firmware del PLC di comando e controllo del sistema di prova.
A corredo, la macchina, illustrata in figura 4, dispone di 2 attuatori intercambiabili:

1. attuatore con velocità max 0.6 mm/sec, corsa 290mm, F_{max}=4200N. Utilizzato per le prove di creep (SPC Small Punch Creep) per poter avviare l'indentazione con velocità relativamente rapida;

2. attuatore con velocità ridotta a 0.03mm/sec, corsa 100mm, F_{max}=4900N. Utilizzato per l'effettuazione di prove quasi statiche, identificate con l'acronimo SP (Small Punch o SPT) con il punzone che indenta molto lentamente il provino.



Figura 3. Macchina di prova SPC SPUTT 500



Figura 4. Macchina VI-2025-SP in configurazione SPCT.

La macchina ha richiesto un'impegnativa attività di messa in servizio dovuta alle nuove strumentazioni utilizzate (sistema di riscaldo e camera del vuoto) che hanno comportato il manifestarsi di problematiche collaterali. La principale è stata la valutazione della "tara", per l'insorgenza di un livello di "precarico occulto" dovuto all'applicazione del vuoto. La depressione risulta agire sui componenti meccanici dell'asse del carico generando una forza di compressione che va a sommarsi a quella impostata per l'esecuzione della prova.
Per effettuare la misurazione della "tara" è stato dunque necessario eliminare - o quantomeno minimizzare - l'attrito tra l'alberino di applicazione della forza e il cuscinetto da vuoto nel passante della camera di prova in depressione e successivamente misurare la forza generata dal vuoto. È stata progettata, realizzata e tarata con pesi morti, una mini-cella di carico strumentata con 4 strain-gauge, 2 per la misura della deformazione lungo l'asse della forza e 2 ortogonalmente per verificare la flessione della lamina che generano misurazioni spurie, figura 5. La cella è stata collocata nella camera di prova nella stessa posizione del test-setup, figura 6. Infine, è stata realizzata una flangia con il passante da vuoto per il passaggio del cavo di collegamento tra la cella ed il sistema di misura.
Sono state effettuate numerose acquisizioni di dati per verificare la ripetibilità delle misurazioni. La calibrazione effettuata è riportata nel grafico di figura 7. Le misurazioni effettuate hanno consentito di determinare il valore della "forza occulta" generata dal vuoto (offset) pari a F=20.57N.



Figura 5. Cella estensimetrica realizzata ad hoc per la misura della forza generata dal vuoto

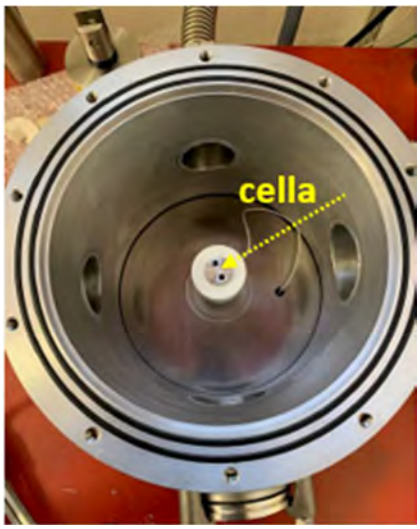


Figura 6. Posizione della cella estensimetrica all'interno della camera di prova

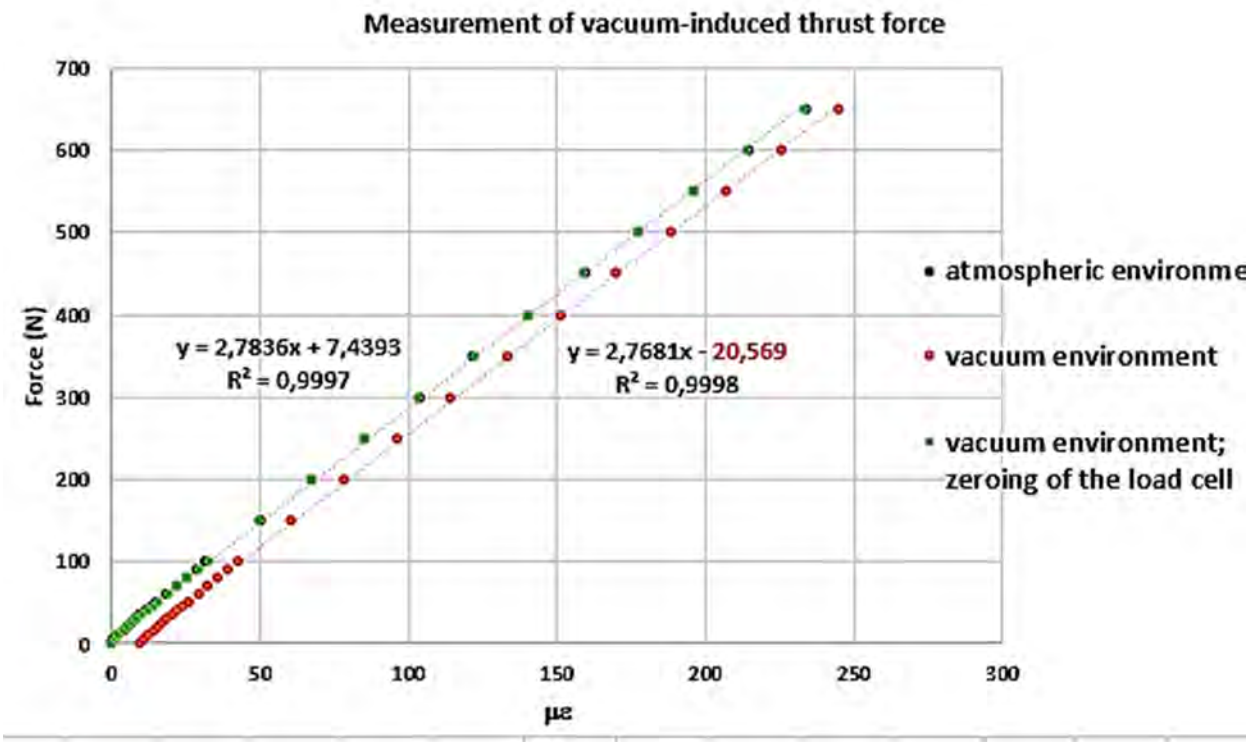


Figura 7. Misurazione della forza occulta generata dai componenti della linea di applicazione del carico:
punti neri (celati e sovrapposti ai punti verdi): misurazioni effettuate senza il vuoto
punti rossi: misure effettuate con il vuoto, che evidenziano la forza occulta (offset) generata dal vuoto stesso
punti verdi: misurazioni della forza applicata in vuoto corretta con l'offset

3.3. Macchina di prova X – 1906 – SPCT

Anche se le caratteristiche principali, F_{max}=500N, T_{max}=600°C, risultano pressoché similari alla SPUTT 500, la macchina di prova X – 1906 – SPCT, mostrata in figura 8, è un sistema di nuova generazione. È realizzata con 4 colonne diametro 50mm e 3 ripiani (piastre di dimensioni 570x600mm, spessore 20mm), opportunamente dimensionate per ottenere un'elevata rigidezza del telaio. L'elettronica di controllo utilizza un PLC (*Programmable Logical Controller*) per comandare e controllare il sistema di prova e un PC per il software di interfaccia utente. Sulla piastra centrale sono ricavati i passanti per l'alloggiamento di 2 termocoppie (TC tipo K) una all'interno del Test Setup ed una seconda a diretto contatto del provino. Quest'ultima ha una connessione diretta con il sensore per la misurazione della deflessione LDT, figura 8b, che consente la misurazione diretta della temperatura del provino. La misurazione diretta della deflessione del provino (*Deflection* ν) è ottenuta per mezzo di un LDT con il sensore posizionato al centro del provino. La figura 8c riporta la foto del Test Setup con all'interno il provino ed il punzone per l'indentazione.

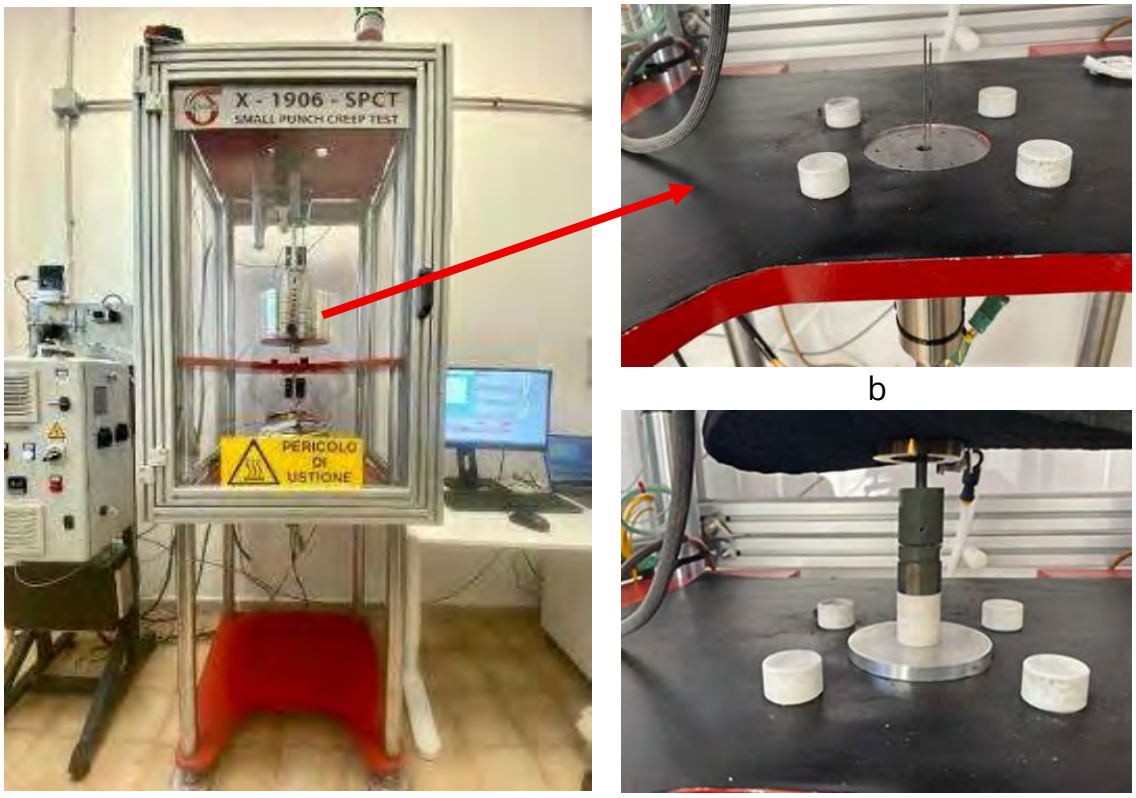


Figura 8. a) Macchina di prova X–1906–SPCT; b) Particolare della piastra centrale con i passanti per la TC e il sensore LDT; c) Posizionamento del test set-up con all'interno il provino e l'indentatore.

Il sistema è inoltre dotato di un controllore e misuratore del flusso del gas inerte.
Un software dedicato, tramite interfaccia utente su PC, consente la gestione completa dei parametri di prova da parte dell'operatore ed acquisisce le variabili in formato testo e data base.

Questa macchina presenta alcuni vantaggi rispetto alla SPUTT 500:

- nessuna manualità dell'operatore nel posizionamento delle masse;
- sistema gestito in automatico per l'avvio e l'arresto della prova.

4. Metodologia di prova

La prova di SPC è condotta applicando la procedura riportata dallo standard EN 10371:2021 [6]. L'obiettivo della prova è ricavare una valutazione qualitativa del degrado subito dal materiale a seguito di lunghi periodi di esercizio in regime di creep e quindi di riduzione di vita operativa del componente. Le prove sono programmate per simulare le condizioni di lavoro, in termini di temperatura e di sforzo operativi. Lo studio di interesse del Laboratorio III DIT è focalizzato per lo più su acciai con elevato contenuto di cromo (p.es. Grado 91) utilizzati nelle tubazioni delle centrali ultra-supercritiche (USC) o nelle centrali turbogas con recupero di vapore (GVR) per la produzione di energia elettrica, operativi alla temperatura massima T_{max}=600°C. Le misurazioni della temperatura e della deflessione del provino, sulle macchine X – 1906 – SPCT e VI-2025, sono effettuate utilizzando la stessa soluzione tecnica, ossia con la misurazione diretta della temperatura e dell'indentazione del provino in fase di prova.

Sebbene siano stati utilizzati diversi materiali durante lo sviluppo della norma EN e dei relativi coefficienti per la stima delle proprietà di trazione e creep, manca ancora un set completo di dati relativi ai test Small Punch Tensile e Creep che possano essere utilizzati da un laboratorio per certificare la propria macchina per prove su piccoli punzoni. Poiché Nimonic 75 è già stato certificato come materiale di riferimento, sia per prove di trazione BCR-661B [7] e per prove uniassiali di creep BCR-425 [8], nel febbraio 2025 è stato avviato un Round Robin Interlaboratorio (ILS RR) per qualificare Nimonic 75 come materiale di riferimento anche per i test di small punch. Il progetto ILS RR, supportato da INUMAT, ECCC, Workshop 64, CENELEC mira a produrre valori di riferimento consensuali con incertezza dichiarata per la qualificazione delle apparecchiature di prova e dei laboratori. L'obiettivo del progetto è verificare l'attendibilità della normativa EN 10371 verificando la riproducibilità dei risultati ottenuti da diversi laboratori, utilizzando diverse macchine di prova e quindi soluzioni tecniche dissimili, ma analoghi approcci metodologici. La partecipazione comprende:

- nello studio dello Small Punch Creep Test 13 laboratori: JRC- Petten, Belgio, Italia, Germania, Spagna, Polonia, Finlandia, Gran Bretagna e Giappone.
- Small Punch Tensile Test: 21 laboratori di tutti i continenti: sono presenti Brasile, Sud Africa India e Australia, oltre alle nazioni già citate per lo SPCT.

Il coordinamento è curato da SCK CEN (Belgian Nuclear Research Centre, Belgium) e JRC Petten, (Netherland). Ritenendo indispensabile il confronto con l'eccellenza dei laboratori di SP in Europa e non solo, INAIL e Compusystem hanno concordato di partecipare al suddetto progetto intercontinentale.

Le prove sono eseguite secondo EN 10371 (SP e SPC), ASTM E691-21 per Round Robin (RR) in supporto alla revisione e allo sviluppo della norma EN 10371 del codice

nucleare francese RCC-MRx. Per garantire la comparabilità, i laboratori partecipanti seguono protocolli di prova e campioni armonizzati, inviano dati grezzi ed elaborati e saranno valutati utilizzando un piano di analisi statistica predefinito. I primi risultati sono in fase di valutazione. Entro quest'anno, si prevede di concludere l'analisi e pubblicare i risultati. I risultati saranno inoltre molto utili per la prossima revisione della norma EN 10371, prevista per aprile 2026. Il laboratorio di INAIL, Dipartimento Innovazioni Tecnologiche, in stretta collaborazione con Compusystem, partecipa per l'esecuzione di 6 prove: 3 + 3 SPCT e 3 SPT, con l'impiego delle 2 macchine X – 1906 – SPCT e VI-2025. Le prove sono eseguite su provini preparati da JRC estratti dalla lega certificata BCR-425 (Nimonic 75), nominalmente uguali per tutti i laboratori. I provini hanno dimensioni nominali: diametro D_s=8 mm, spessore h_0=0.5 mm, massa M= 0.2 g. Le tolleranze dimensionali ammesse dalla normativa sono: $D_{s\,-0.1}^{\;0}$, $h_{0\,-0.05}^{\;+0.05}$

Lo spessore del provino deve essere misurato in 5 posizioni, ossia al centro e in quattro punti sul bordo, disposti secondo i punti cardinali. Per le misurazioni effettuate in laboratorio, su un set di 3 provini, è stato utilizzato un micrometro millesimale e una bilancia Sartorius CP5225 sensibilità 0.01g risoluzione 10^{-5}g. Le misure ottenute sono riportate in tabella 1. Il diametro nominale D_s misurato ha fornito il valore di 7.93mm per tutti e tre i dischetti.

Provino	Spessore Medio (mm)	Massa (gr.)
1	0.5030 ± 0.00158	0.2070
2	0.5038 ±0.00837	0.2075
3	0.5044 ±0.00094	0.2063
Media	**0.5037 ±0.0011**	**0.2069**

Tabella 1. Misurazioni effettuate sul set di 3 provini

La misurazione della massa fornisce una rapida e "mediata" valutazione sulla eventuale disomogeneità di un provino rispetto al suo "nominale gemello".
Il set di misurazioni riportate con la minima dispersione dei valori dimensionali del provino, minimizza quantomeno gli errori accidentali o sistematici che si dovessero ripetere per incapacità nella fase di estrazione, laddove è possibile contenerli.

5. Attività sperimentale

5.1. Macchina di prova SPC X-1906 Small Punch

La prima fase per la messa in servizio della macchina di prova SPC X-1906 è stata focalizzata sul perfezionamento del ciclo termico per il raggiungimento della temperatura di prova (o di set point). Sebbene il forno risulti collegato e controllato con un sistema di regolazione a microprocessore, è stato necessario individuare e impostare con buona precisione i parametri PID (Proporzionale, Integrativo e

Derivativo) del regolatore per evitare l'effetto pendolo. Di conseguenza è stata avviata una fase sperimentale per individuare i parametri di controllo del ciclo termico per minimizzare *l'overshoot* termico. Limitare la salita di temperatura sopra il valore di target definito per la prova e ottimizzare il tempo di riscaldo. L'attività sperimentale si è chiusa definendo il profilo di cicli termici in funzione di T_{max}, ed in particolare per 3 valori: T_{max}=400°C, T_{max}=500°C e T_{max}=600°C. In figura 9 è riportata la registrazione del ciclo termico relativo ad una prova SPCT condotta a T=600°C.

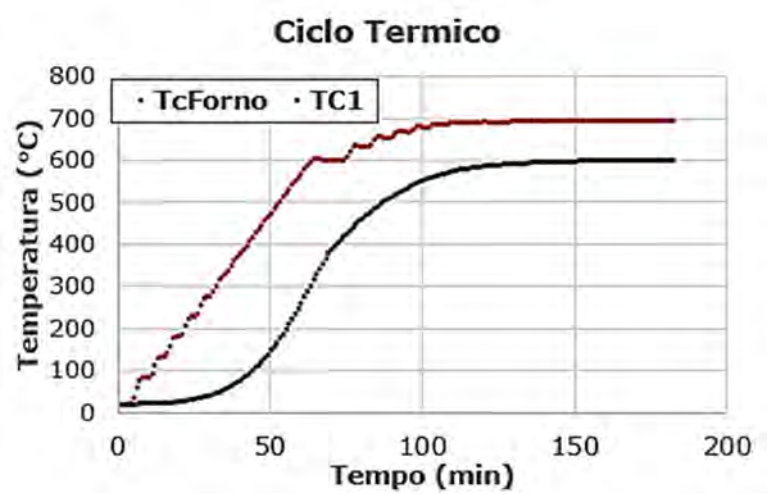


Figura 9. Ciclo termico ottimizzato. In rosso la registrazione della temperatura del forno; in nero quella della temperatura del provino.

Il software del PLC richiama automaticamente il ciclo termico in funzione della temperatura di prova inserita. La rampa di riscaldo è quindi suddivisa in fasi. Ciascun intervallo è seguito da una fase di mantenimento in attesa del raggiungimento del valore di T della fase per poi proseguire fino al raggiungimento del valore di set-point. Tale accortezza ha consentito di agire sui parametri di regolazione ed ottenere un'ottima risposta del sistema di controllo, come illustrato.
L'ottimizzazione del ciclo termico ha consentito di ridurre il tempo di riscaldo ed evitare la deriva della temperatura *T*. La normativa EN 10371 indica i valori massimi permessi di deviazione, in funzione di T_{max}. Per la temperatura di prova T_{max}<600°C la deviazione ammessa è $T\pm2$°C, nel range 600<*T*<800°C è $T\pm3$°C. La successiva fase di preparazione del sistema SPCT X-1906 ha riguardato la taratura del sensore di misurazione della deflessione (LDT) e la verifica dell'assialità della linea delle masse applicate al provino. L'attività sperimentale è stata condotta prelevando i provini da un tallone di acciaio martensitico grado 91 forgiato. I valori di set-point impostati per questa serie di con provini in acciaio sono le seguenti: *T*=600°C, *F*=450N.
In figura 10 è riportato il grafico deflessione vs tempo acquisito nel corso della prova (*deflection u vs t*). Si può notare la fase del creep primario con rapida crescita iniziale della deflessione, il creep secondario con velocità di deformazione pressoché

costante e il creep terziario, che porta alla rottura finale del provino. In figura 11 è riportata la foto del Setup a fine prova con la completa penetrazione del provino.

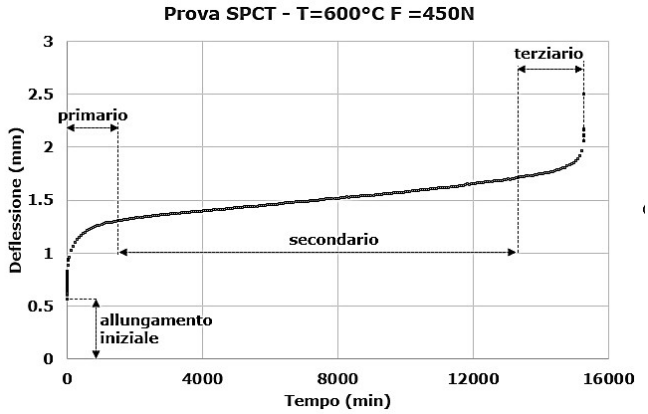


Figura 10. Grafico deflessione vs tempo della prova effettata a T=600°C e F=450N



Figura 11. Foto del test setup e del provino a completa penetrazione

I risultati ottenuti dimostrano l'affidabilità del sistema di prova. L'elevata sensibilità e precisione della misurazione della deflessione è già stata documentata da Budano ed altri [9] in un altro lavoro.

5.2. Macchina di prova VI-2025-SP

Nel 2024 Compusystem ha completato lo sviluppo della macchina di prova VI-2025-SP, per la cui progettazione e la realizzazione sono state condivise alcune soluzioni tecniche (misurazione diretta sul provino della deflessione e della temperatura) già sviluppate e perfezionate nella macchina SPC X-1906; il macchinario è stato tuttavia sviluppato sulla base di un approccio del tutto innovativo, con l'utilizzo di periferiche con tecnologia avanzata per il loro specifico utilizzo:

- un sistema di riscaldo a radiofrequenza (induzione) per una versatile programmazione della rampa di riscaldo, con una rapida risposta del sistema, sia in fase di riscaldo, effettuato tramite spira, che di raffreddamento, non ostacolato dalla coibentazione dei comuni forni a resistenza. Il sistema RF (Radio Frequenza) in teoria non ha limiti di temperatura di prova, al contrario di un forno a resistenza, se non quelli relativi al decadimento delle proprietà meccaniche del materiale costituente il Test Setup;
- una camera di prova sottovuoto che garantisce una migliore protezione all'ossidazione a caldo del provino;
- la programmazione del comando della forza applicata con possibilità di esecuzione di prove di SP e di SPCT.

Come per la macchina SPC X-1906 il software di comando e controllo, su piattaforma PLC ed utente piattaforma PC laptop, è stato progettato e sviluppato da Compusystem così come la messa in servizio.

In figura 12 è riportato il grafico della prova di SP effettuata su un provino in superlega base nichel Nimonic 75, T=600°, velocità $\dot{w}$ = 1 mm/min.

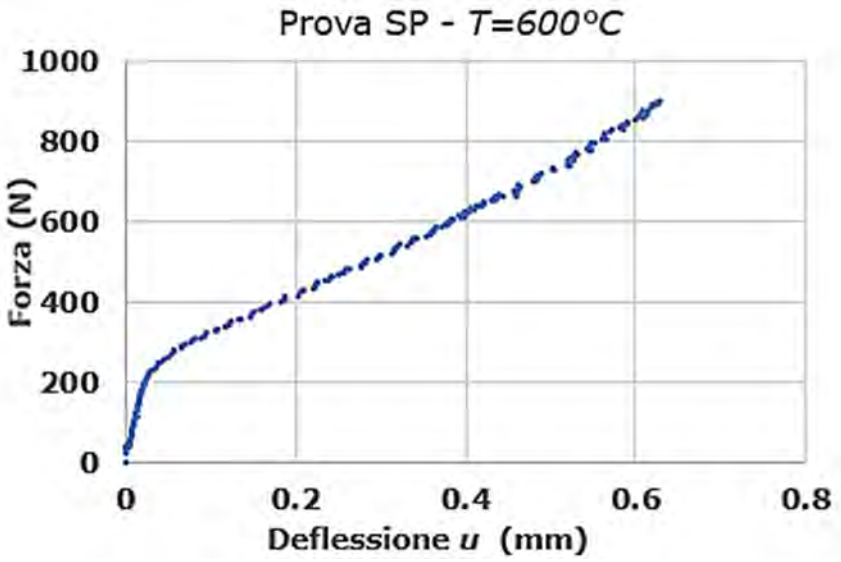


Figura 12. Grafico di una prova SP eseguita su provino di Nimonic 75, T=600° C

Poiché la normativa per la conduzione della prova di Small Punch (SP) prescrive l'applicazione di una forza monotona in compressione nel tempo con velocità $\dot{w}$ molto lenta, nell'intervallo: $0.2 \leq \dot{w} \leq 2.0$ mm/min, è stato necessario richiedere al fornitore un attuatore supplementare con caratteristiche diverse da quelle standard utilizzate per la prova di creep (SPCT), che invece richiede l'applicazione della forza di set-point con velocità superiori di almeno 1 ordine di grandezza.

6. Considerazioni generali e discussione

Un ulteriore elemento che concorre a valutare l'efficienza dei sistemi di prova è la gestione della fase registrazione digitale delle variabili di prova, specificatamente per le prove di lunga durata nel tempo, come quelle di creep. Le macchine a controllo servo-meccanico, come quelle disponibili nel laboratorio III sono progettate per tempi di prova medio-brevi: $0 < t_{max} < 5000 \div 8000$ ore. Tali valori, anche per quelli inferiori a quelli massimi di progetto, richiedono comunque una precisa impostazione dell'intervallo temporale per la registrazione digitale dei dati di prova, con l'obiettivo di documentare il massimo delle informazioni possibili senza sovraccaricare il sistema informatico. Da una parte, infatti, una enorme quantità di dati comprometterebbe la post-elaborazione utilizzando gli strumenti standard di front-end (tipo MS-Excel), dall'altra, viceversa, un numero limitato di valori rischia di non mettere in evidenza e seguire l'evoluzione dei fenomeni metallurgici che si verificano durante una prova.

L'andamento della curva di creep rientra esattamente in questa casistica: essa, infatti, si evolve nelle tipiche 3 fasi con tempistiche completamente diverse: la fase di creep primario, velocissima, della durata di alcuni minuti, comunque prevedibile ad inizio prova; il creep secondario, la cui durata si protrae a lungo nel tempo (centinaia di ore) ed infine il creep terziario, della durata di minuti, ma caratterizzato da un inizio

scarsamente definibile. Proprio per la registrazione dei dati nel creep terziario è stato implementato l'algoritmo del buffer circolare (coda circolare logica LIFO): un timer dedicato risulta attivo con una rate di lettura elevato ma dimensioni ridotte per registrare 240 secondi di prova, sufficienti per acquisire l'ultimo periodo del test.
Il confronto tra le curve di creep ottenute con le due macchine di creep VI-2025-SP e X – 1906 – SPCT è riportato in figura 13. Il gap di forza applicata ΔF=100N risulta, come da attendersi, maggiormente danneggiante con il protrarsi della prova. I 2 andamenti ottenuti son ben rappresentativi dell'affidabilità del test in corso.
In figura 14 sono riportate a confronto 2 curve Forza vs Deflessione ottenute da prove SPC e SPCT effettuate sulla macchina VI-2025-SP, alla temperatura T=600°C, utilizzando i 2 attuatori disponibili. La SPC è avviata con velocità $\dot{u}$ = 1 mm/sec mentre la prova SP con $\dot{u}$ = 0.003 mm/sec.
È interessante osservare la corrispondenza tra le 2 tipologie di prova del punto di transizione F_e tra la condizione elastica e plastica, (F_e *Elastic Plastic Transition Force)*.

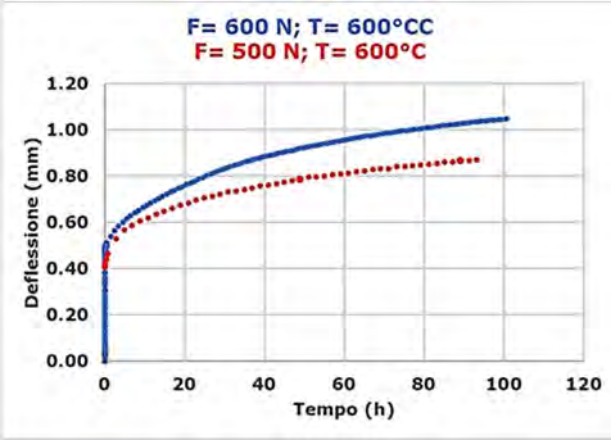


Figura 13. Curve di SPCT ottenute a vita breve a parità di temperatura ma diversi valori della forza applicata.
Blu: macchina VI-2025-SP
Rossa: macchina X – 1906 - SPCT

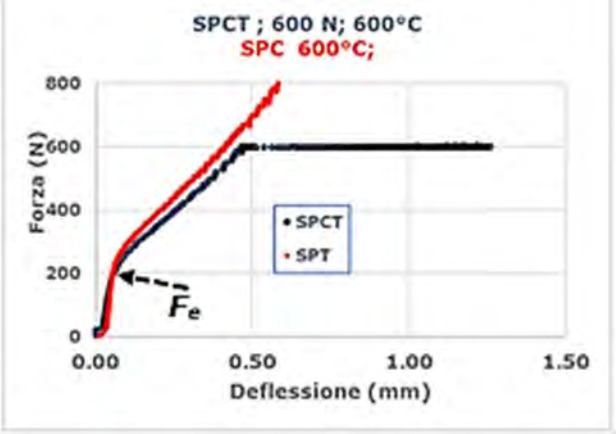


Figura 14. Confronto tra 2 curve di prova. Macchina di prova VI-2025-SP
Blu: SPCT
Rossa: SPC

7. Conclusioni

La metodologia di prova SPCT ha come grande vantaggio l'impiego di provini miniaturizzati - ricavati in genere da componenti in esercizio senza comprometterne la funzionalità – ed è pertanto classificata come prova non distruttiva. Analogamente alle prove standard di creep, le informazioni acquisite dalle prove di SPCT, opportunamente elaborate e verificate, possono fornire utili indicazioni per la valutazione della vita residua dei componenti eserciti in impianti industriali per la generazione di energia. Il laboratorio INAIL Dipartimento Innovazione Tecnologica ha implementato il laboratorio per la conduzione di prove di Small Punch Creep Test con 2 nuovi sistemi di prova SPCT, testandone precisione e ripetibilità delle misure e valutando le varie migliorie tecniche apportate. Sebbene la metodica dello small

punch test risulti essere descritta della normativa EN 10371:2021, numerose attività sono ancora in corso o in fase di avvio per migliorarne l'aspetto tecnologico; una di esse prevede una serie di prove inter-laboratorio (ILS Round Robin) a cui partecipa anche INAIL con le sue macchine.

Bibliografia

[1] M. Bruchhausen et al.:*Small Punch Testing – An Innovative Approach to Mechanical Characterization of Materials*, Springer, 2016.

[2] P. Hähner et al.:*Recent developments of small punch testing and its applications*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics.

[3] CEN Workshop Agreement CWA 15627: *Small Punch Test Method for Metallic Materials.*

[4] Dobes, Milicka: *Application of small punch test in creep testing*, Materials Science and Engineering

[5] S. Holmström et al.: Creep strength and minimum strain rate estimation from Small Punch Creep tests. Material Science & Engineering A (2018) 161-172.

[6] UNI EN 10371:2021 – Materiali Metallici – Prova di microimbutitura. Giugno 2021

[7] https://crm.jrc.ec.europa.eu/en/crms/BCR-661B

[8] https://crm.jrc.ec.europa.eu/en/crms/BCR-425

[9] S. Budano, A. Di Gianfrancesco, F. Troiani, A. Alvino, A. Antonini, A. Tonti: Development of a new Small Punch Creep Testing Machine: A Proceedings of 5th Int. Conference on Creep and Fracture (Virtual Conference) Held 19th – 20th Oct 2021; ISBN: 978-1-7399925-0-7.

Evoluzione dei sistemi di tenuta per air fin cooler con plug headers: un'esperienza applicativa di successo

R. Gigante[1], F. Torriani[2], C. Sozzi[3]
[1] General Packing Italy, Carugate, Italia
[2] General Packing Italy, Carugate, Italia
[3] General Packing Italy, Carugate, Italia

1. Introduzione

Il presente studio descrive l'innovativo sistema di tenuta Euroseal® GP-Plug e Kap-Seal, sviluppato per mitigare le criticità operative e manutentive degli air fin cooler con piastre a fori e tappi filettati in impianto (air fin cooler with plug headers).

2. Stato dell'arte.

Gli air fin cooler con plug headers offrono, rispetto ad altre tipologie di air fin cooler, il vantaggio di agevolare le ispezioni dei tubi durante le attività di manutenzione, grazie alla presenza di fori ispettivi sulle testate. Tali fori possono costituire il punto più vulnerabile dello scambiatore, rappresentando potenziali punti di perdita dell'apparecchio.

La tenuta tra il tappo e la piastra dell'air fin cooler è generalmente garantita da una rondella metallica (Figura 1). Le rondelle metalliche tradizionali presentano diverse limitazioni, in quanto per garantire prestazioni ottimali devono essere soddisfatte specifiche condizioni:

- La rondella metallica deve essere priva di imperfezioni superficiali e difetti geometrici. Di solito, è ricavata da tranciatura o taglio di lamiera, anziché da tornitura, e presenta, pertanto, una finitura inadeguata.

- La rondella deve possedere specifiche caratteristiche di rugosità superficiale e durezza per garantire prestazioni adeguate. Ottenere tali condizioni non è sempre agevole, soprattutto in presenza di accoppiamenti con materiali particolari (ad esempio leghe di nichel), per i quali risulta difficile assicurare una durezza inferiore rispetto a quella del tappo e della piastra.

- Sono necessarie elevate coppie di serraggio per raggiungere il carico di assetto della rondella e deformarne la superficie metallica, così da consentirne l'adattamento alle irregolarità superficiali della piastra e realizzare la tenuta.

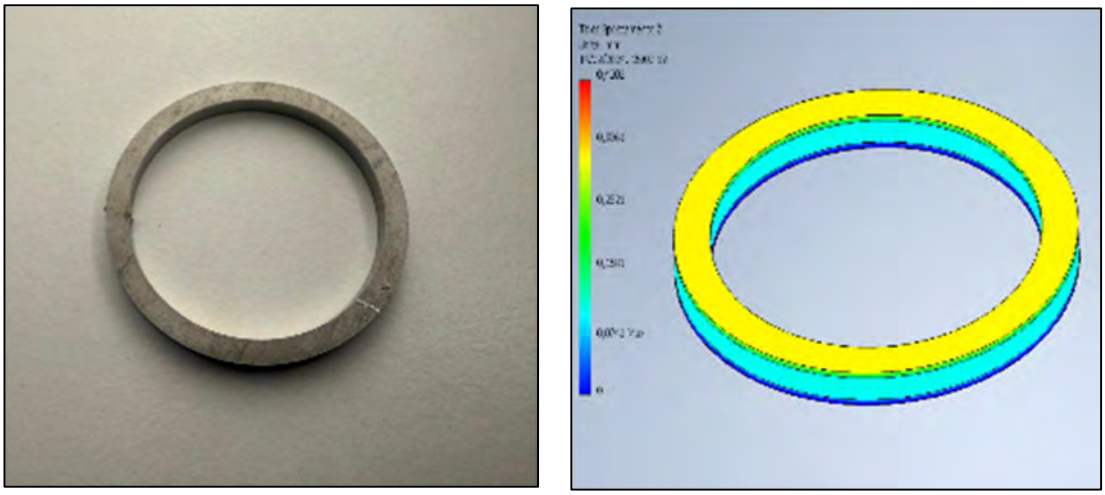


Figura 1. Rondella metallica standard (sinistra); distribuzione superficiale del carico sulla rondella metallica standard (destra).

I tappi tradizionali (Figura 2) non agevolano il corretto funzionamento della rondella, in quanto privi di una geometria che ne consenta il centraggio. L'assenza di un invito di centraggio rende difficoltosa la verifica del corretto posizionamento della rondella durante l'installazione (Figura 3), in caso di utilizzo di chiavi a impulsi o avvitatori pneumatici. Un centraggio inadeguato della rondella comporta una distribuzione non uniforme del carico e una compressione insufficiente, compromettendo l'efficacia della tenuta.

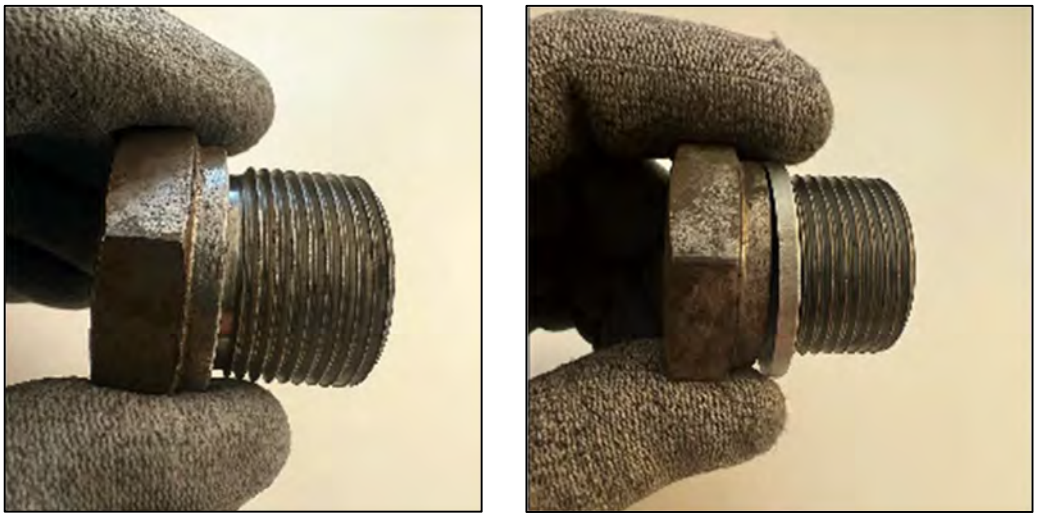


Figura 2. Tappo standard (sinistra); tappo std. con rondella std. (destra). Su entrambe le figure si riscontra l'assenza di una geometria per il centraggio della rondella e un inadeguato centraggio della stessa.



Figura 3. Testa del tappo su banco prova in officina (sinistra); Pistola per installazione del tappo sul banco prova dove risulta evidente l'impossibilità di verificare il corretto centraggio della rondella (destra).

3. Criticità dei sistemi tradizionali

Le problematiche più frequenti riscontrate durante le fasi di apertura e chiusura dei tappi ispettivi sono le seguenti:

- Tappi grippati a causa dell'eccessiva coppia di serraggio applicata o eventuale presenza di fenomeni ossidativi della zona filettata.



Figura 4. Tappo grippato che è stato rimosso salvaguardando la filettatura della madrevite della piastra.

- Rottura della testa esagonale:



Figura 5. Testa esagonale di un tappo grippato che è stato rotto nel corso del suo tentativo di rimozione.

- Errato centraggio della rondella:



Figura 6. Rondella non centrata sulla piastra

- Danneggiamento della sede di tenuta della guarnizione:



Figura 7. Sede di tenuta danneggiata

In ambito manutentivo, tali fenomeni rappresentano una criticità, richiedendo interventi onerosi quali:

- Lamatura delle superfici di tenuta, al fine di ripristinare le corrette condizioni geometriche e di finitura della piastra, necessarie per garantire il funzionamento adeguato della guarnizione.
- Rimozione del tappo grippato tramite trapanatura, operazione che comporta il rischio di danneggiare la madrevite e rendere quindi necessaria la maggiorazione del foro.
- Maggiorazione del diametro del foro di almeno 1/8", con successiva maschiatura.



Figura 8. Interventi manutentivi sulle piastre

Questi interventi comportano un incremento dei tempi di fermata e dei relativi costi di manutenzione, nonché l'insorgenza di oneri gestionali aggiuntivi derivanti dalla presenza di tappi maggiorati sullo scambiatore.
In presenza di danni particolarmente gravi, tali da impedire l'applicazione degli interventi sopra descritti, si potrebbe rendere necessario ricorrere a soluzioni definitive, quali l'installazione di scatole a saldare per il contenimento delle perdite. Una tale soluzione, tuttavia, compromette definitivamente lo scambiatore, che dovrà essere sostituito alla successiva finestra utile di intervento.

4. Sistema di tenuta Euroseal®: Kap-Seal e GP-Plug

Al fine di superare i limiti sopra evidenziati, suggeriamo l'adozione di un sistema innovativo composto dal tappo GP-Plug e dalla guarnizione Kap-Seal, caratterizzati dai seguenti elementi:

- La Kap-Seal (Figura 9) è una guarnizione metallica di tipo camprofile rivestita in grafite, progettata per garantire la tenuta con coppie di serraggio significativamente inferiori rispetto a una guarnizione metallica tradizionale. Le scanalature concentriche consentono una migliore concentrazione del carico superficiale, mentre il rivestimento in grafite incrementa la deformabilità della guarnizione, assicurando un carico di assetto più basso rispetto alle guarnizioni metalliche convenzionali.

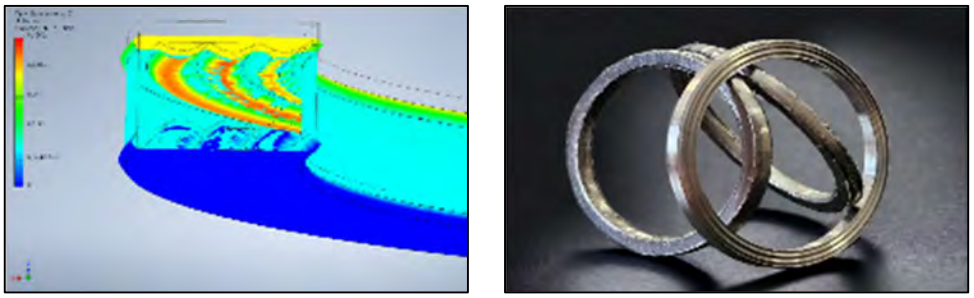


Figura 9. Distribuzione del carico sulla superficie della Kap-Seal (sinistra); Kap-Seal (destra)

- Il tappo GP-Plug (Figura 10) è dotato di un sistema di invito autocentrante che consente il corretto posizionamento della guarnizione Kap-Seal, garantendo una distribuzione uniforme del carico applicato durante il serraggio.

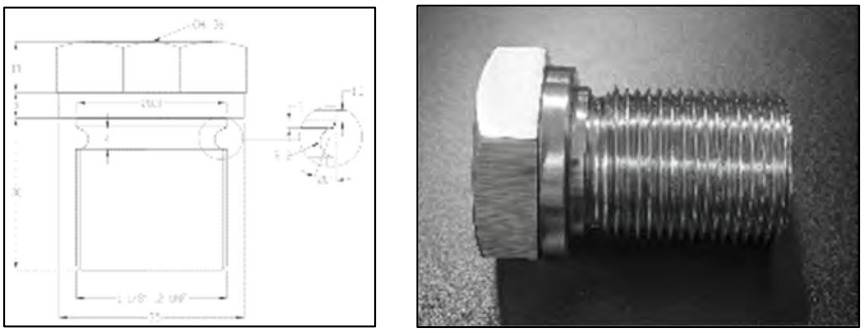


Figura 10. Dettaglio costruttivo GP-Plug (sinistra); GP-Plug (destra)

I vantaggi derivanti dall'utilizzo di questo sistema sono i seguenti:

- Inferiore carico di assetto minimo: grazie al sistema di autocentraggio e alla tipologia di guarnizione, è possibile applicare coppie di installazione inferiori. Questo riduce le sollecitazioni sulla madrevite, diminuisce la probabilità di grippaggio del tappo e facilita le successive operazioni di rimozione dello stesso durante la fase ispettiva/manutentiva.

- Superiore adattabilità alle irregolarità e imperfezioni della piastra: il rivestimento in grafite consente di ottenere prestazioni di tenuta superiori anche in presenza di finiture o geometrie non più ottimali, rispetto alle guarnizioni metalliche tradizionali.
- Maggiore affidabilità del sistema di tenuta: la riduzione delle sollecitazioni meccaniche e la migliore adattabilità della guarnizione contribuiscono a diminuire gli interventi manutentivi necessari, con una conseguente riduzione dei costi di gestione nel ciclo di vita dell'apparecchiatura.

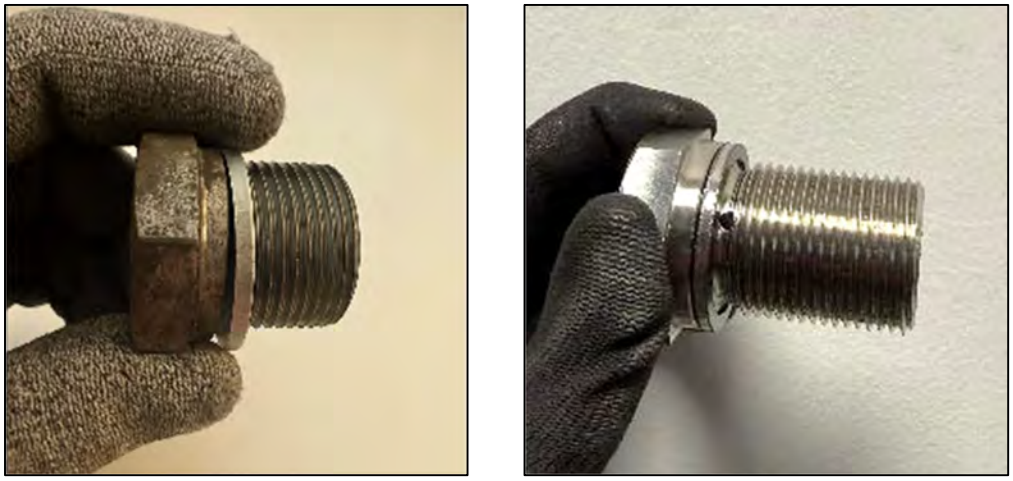


Figura 11. Tappo std. e guarnizione std. (sinistra); GP-Plug e Kap-Seal(destra)

5. Risultati dei test sperimentali

Sono state eseguite diverse prove sperimentali per dimostrare l'affidabilità del sistema:

- Test di tenuta a 200 bar con serraggi variabili da 600 Nm fino a 75 Nm (Figura 12);
- Test a 330 bar con elio (97%, 40°C, 1h) evidenziando tenuta anche con gas ad alta permeabilità;
- Prove a 25–50 bar presso costruttori di air coolers per verificare la tenuta al 50% del carico minimo consigliato (Figura 12);

- Test di rottura a torsione del GP-Plug;

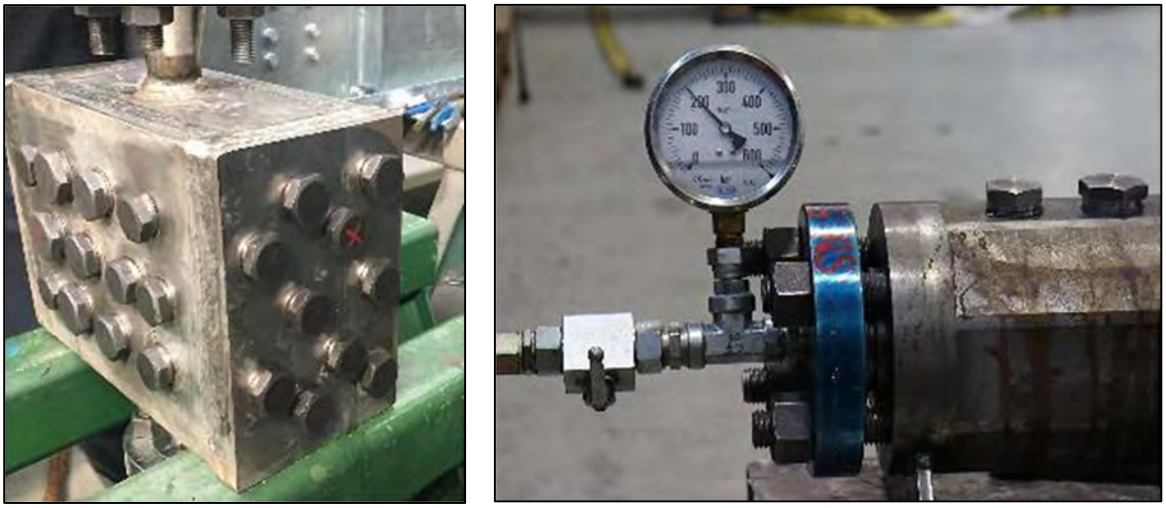


Figura 12. Banco prova costruttore air cooler per test a 50 bar (sinistra); Banco prova per test a 200 bar (destra).

6. Applicazioni industriali



Figura 13. Banchi air fin cooler con installati GP-Plug e Kap-Seal in raffineria

Il sistema è adottato da numerose raffinerie e costruttori, in contesti caratterizzati da elevati requisiti di sicurezza, frequenti cicli manutentivi e onerosi fermi impianto. Ad oggi sono stati installati:

Anno	**Gp-Plug**	**Kap-Seal**
2022	29638	48541
2023	26289	28529
2024	31854	34236
2025* dati al 23/09/2025	41915	113373

7. Conclusioni

Il sistema Euroseal® GP-Plug/Kap-Seal rappresenta un'evoluzione significativa nei sistemi di tenuta dei tappi ispettivi degli air fin cooler con plug headers, consentendo di superare le principali criticità riscontrate delle soluzioni tradizionali attualmente installate in impianto. L'adozione combinata di una guarnizione metallica camprofile rivestita in grafite e di un tappo dotato di geometria autocentrante permette di ottenere una tenuta affidabile con carichi di serraggio sensibilmente inferiori rispetto alle guarnizioni metalliche convenzionali. Tale caratteristica si traduce in una riduzione delle sollecitazioni sulla madrevite della piastra, limitando il rischio di grippaggi, deformazioni permanenti e danneggiamenti delle superfici di tenuta della piastra. L'inferiore coppia di serraggio richiesta e la migliore adattabilità del sistema GP-Plug/Kap-Seal alle imperfezioni delle superfici delle piastre, consentono di estendere la vita utile dello scambiatore e di ridurre la necessità di interventi correttivi invasivi, quali lamature o maggiorazioni dei fori.

La possibilità di riutilizzare il tappo GP-Plug, unitamente all'impiego di rivestimenti protettivi in PTFE (Figura 14), contribuisce inoltre a preservare le filettature da fenomeni ossidativi e a facilitare le operazioni di apertura e chiusura nel tempo. La diffusione di questo sistema di tenuta presso raffinerie e costruttori di air fin cooler, supportata da un numero crescente di installazioni in esercizio, conferma la validità della soluzione proposta in termini di affidabilità operativa, riduzione dei costi di manutenzione e miglioramento della sicurezza complessiva dell'apparecchiatura.



Figura 14. Tappi GP-Plug rivestiti in PTFE

Industrial Cyber Shield: Protezione delle Reti Industriali nell'Era dell'Industria 4.0

S. Guarino[1], S. Perone[1], R.F.S. Buttiglione[1], E. del Prete[2], R. Setola[1]

[1]Università Campus Bio-Medico di Roma - Facoltà Dipartimentale di Ingegneria
[2]Inail - Dit

Sommario
Il settore industriale sta attraversando cambiamenti significativi a causa dell'avvento e diffusione del paradigma Industria 4.0. Tuttavia, nonostante i noti vantaggi in termini di maggiore efficienza e ottimizzazione della produzione, tale transizione sta comportando nuove sfide in termini di sicurezza e protezione degli impianti industriali. L'integrazione dei sistemi SCADA con dispositivi intelligenti open source, connessi a Internet e accessibili da remoto per la supervisione dei processi, espone infatti gli impianti a rischi non trascurabili per la loro operatività.
Per affrontare queste sfide, il progetto Industrial Cyber Shield (ICS), finanziato dall'Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (INAIL), ha sviluppato un sistema di risposta alle intrusioni in grado di rilevare e rispondere agli attacchi in corso all'interno di reti SCADA. Il sistema è composto da due moduli principali: il modulo Orchestrator, che supervisiona l'intero processo gestendo il coordinamento e il processo decisionale, e il modulo Shield, che è direttamente integrato con l'infrastruttura cyber-fisica per identificare attacchi informatici e anomalie fisiche e implementare le contromisure più appropriate in tempo reale. In particolare, i moduli shield sono stati implementati in modalità inline a protezione dei Programmable Logic Controller (PLC), dispositivi di campo incaricati di controllare il processo fisico. Il traffico di rete viene analizzato in tempo reale tramite *Snort*, configurato come sistema di Intrusion Detection sulle interfacce dell'Odroid, mentre reti neurali dedicate monitorano le anomalie fisiche sull'impianto. Gli eventi riconosciuti vengono inviati all'orchestrator attraverso un broker Kafka, il quale risponde fornendo le opportune istruzioni di risposta.

1. Introduzione

La digitalizzazione dei processi industriali ha portato enormi vantaggi in termini di efficienza operativa, ma ha contemporaneamente esposto le infrastrutture critiche a minacce cyber sempre più sofisticate. I sistemi SCADA, tradizionalmente progettati con paradigmi di closed-loop isolation, si trovano ora interconnessi a reti esterne per esigenze di monitoraggio e manutenzione remota [3]. Questa evoluzione ha generato nuovi vettori di attacco, dai quali difendersi risulta critico non solo per la continuità operativa, ma anche per la sicurezza fisica dei lavoratori.

Le soluzioni di cybersecurity convenzionali, prevalentemente incentrate su approcci perimetrali e sistemi di rilevamento centralizzati, faticano a offrire risposte adeguate agli ambienti industriali moderni. La natura distribuita ed eterogenea delle infrastrutture SCADA richiede paradigmi di protezione che combinino capacità di rilevamento locale, con bassa latenza e alta trasparenza operativa, insieme a coordinamento centralizzato per la gestione avanzata degli incidenti [4]. È in questo contesto che si inserisce il progetto Industrial Cyber Shield (ICS), sviluppato nell'ambito del programma INAIL BRIC 2022 da un consorzio di ricerca comprendente l'Università Campus Bio-Medico di Roma, l'Università Parthenope e INAIL [5].
Il progetto ICS propone un'architettura basata su un modello di edge-computing a due livelli, specificamente concepita per rilevare e contrastare attacchi cyber e anomalie sui dati di processo in gruppi di dispositivi industriali connessi. L'obiettivo generale è duplice: prevenire situazioni di pericolo per i lavoratori attraverso indicazioni operative e, ove possibile, intervenire automaticamente per mettere il sistema in condizioni di sicurezza. A livello locale, dispositivi di campo operano in modalità inline tra i controllori logici programmabili (PLC) e la restante rete SCADA, applicando algoritmi di rilevamento sia rule-based, tramite Snort IDS, che anomaly-based, mediante reti neurali Long Short-Term Memory (LSTM) sui dati di processo [2]. A livello centralizzato, un orchestrator coordina la correlazione degli eventi, l'analisi avanzata e l'attivazione di risposte automatiche di mitigazione. La comunicazione tra i dispositivi di campo locali e l'orchestrator centralizzato è implementata attraverso il protocollo Kafka, garantendo affidabilità, scalabilità e sicurezza, essendo tutte le comunicazioni cifrate attraverso coppie di chiave pubblica e privata.
La validazione sperimentale è stata condotta presso il laboratorio di automatica dell'Università Campus Bio-Medico di Roma su un testbed di distribuzione idrica. Il presente articolo illustra il progetto ICS nei suoi aspetti tecnici e implementativi, descrivendo l'architettura complessiva, i componenti di rilevamento e risposta, e i risultati della validazione sperimentale.

2. Architettura del sistema ICS

2.1 Testbed di riferimento

Il progetto è stato pensato e realizzato presso l'Università Campus Bio-Medico di Roma su un testbed di distribuzione idrica composto da 8 serbatoi, 6 pompe, 22 elettrovalvole, 8 sensori di pressione e 4 sensori di flusso [6]. Il processo fisico è governato da 4 PLC interconnessi in una rete SCADA che utilizzano il protocollo di comunicazione Modbus TCP/IP, standard de facto nelle reti industriali per lo scambio di dati tra dispositivi di campo e sistemi di supervisione. La supervisione dell'impianto avviene in tempo reale tramite una workstation centrale dotata di HMI

(basata su software Movicon7) e Historian. In Figura 1, è mostrata una vista del testbed e dello schema di rete.

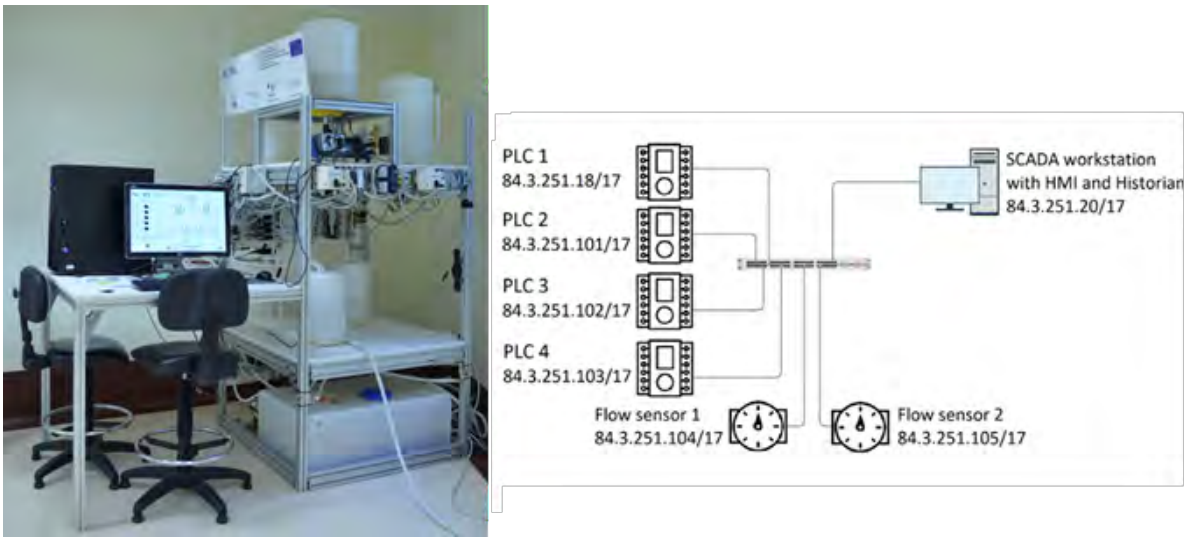


Figura 1. Testbed di distribuzione idrica presso l'Università Campus Bio-Medico di Roma

2.2 Architettura

L'architettura del progetto, riportata in , è caratterizzata da un sistema a due livelli. Il primo, denominato livello di campo, ha lo scopo di proteggere i controllori logici (PLC), rilevando ed eventualmente contrastando potenziali minacce alla sicurezza

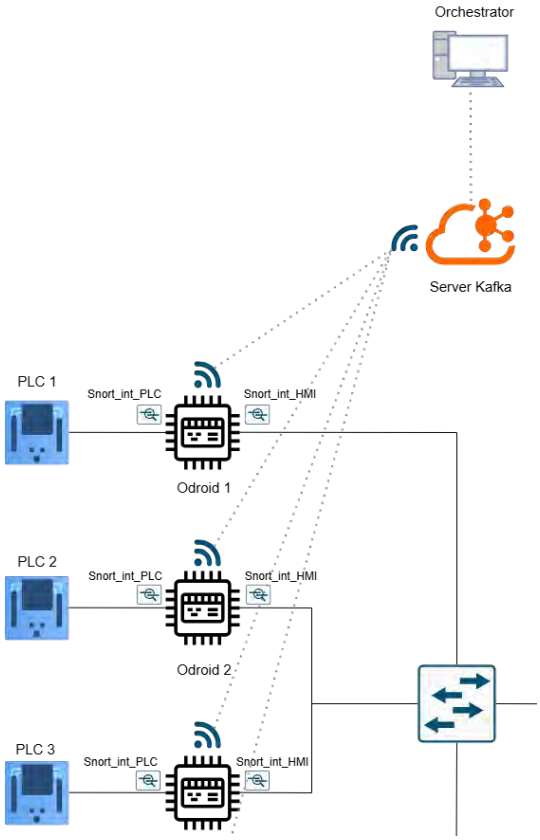


Figura 2. Architettura di ICS

dell'impianto, come anomalie di processo o attacchi informatici. Il secondo, invece, ha lo scopo di coordinare e gestire il corretto funzionamento dei dispositivi di campo, denominati *shield*, definendo le policy di funzionamento così come le azioni da adottare a seguito del riconoscimento di attacchi e/o anomalie di processo. Al fine di proteggere ciascuno dei 4 PLC del testbed idrico, sono stati implementati 4 dispositivi shield Odroid H4+, ognuno dei quali comunica con un unico dispositivo orchestratore attraverso un broker Kafka.

2.2.1 Dispositivo di campo: shield

I dispositivi di campo sono configurati in modalità *inline* con l'obiettivo di disaccoppiare a livello di rete i singoli PLC dalla restante porzione della rete SCADA. A tal fine, ogni shield instaura un bridge di rete tra le due interfacce, garantendo da un lato la corretta comunicazione tra il PLC e i restanti dispositivi della rete SCADA, e dall'altro la possibilità di analizzare ed eventualmente filtrare il traffico di rete, qualora un attacco informatico venga riconosciuto. Gli shield sono stati sviluppati su dispositivi Odroid H4+, ognuno dei quali dispone di 3 interfacce di rete: le due interfacce in configurazione bridge tra il PLC e la rete SCADA, e una terza interfaccia di tipo wireless per la comunicazione con il dispositivo *orchestrator*.
Lo scopo del dispositivo shield è quindi di:

2.1 Garantire una comunicazione trasparente e a bassa latenza tra il PLC e la rete SCADA.
2.2 Riconoscere efficacemente attacchi informatici e/o anomalie di processo attraverso l'analisi del traffico di rete, applicando filtri mirati per proteggere l'integrità dell'impianto.
2.3 Comunicare all'orchestrator gli eventi riconosciuti al fine di poter ricevere in tempo reale la contromisura da adottare

Per garantire una protezione completa, il sistema adotta due strategie complementari per il riconoscimento di anomalie di processo e attacchi informatici. Per quanto riguarda le anomalie di processo, l'approccio si basa su reti neurali ricorrenti *Long Short-Term Memory* (LSTM) con lo scopo di rilevare anomalie sul

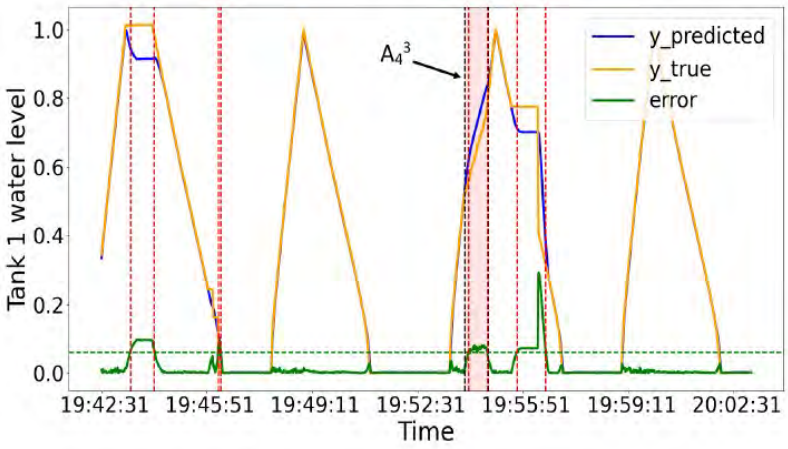


Figura 3. Riconoscimento di una anomalia di processo sul serbatoio

processo di riempimento e svuotamento dei serbatoi idrici. Nello specifico, sono state addestrate otto reti distinte, una per ciascun serbatoio del testbed, utilizzando dataset storici relativi ai cicli nominali di riempimento e svuotamento. Questo addestramento permette al sistema di apprendere il comportamento nominale dell'impianto e di identificare deviazioni significative in tempo reale. Durante la fase operativa, il dispositivo shield intercetta istante per istante il contenuto dei pacchetti Modbus in risposta dal PLC verso la HMI, estraendo dal payload i livelli correnti dei serbatoi. Tali valori vengono quindi confrontati con le predizioni generate dal modello LSTM: uno scostamento rilevante tra il valore misurato e quello atteso viene segnalato come anomalia di processo. In Figura 3, è mostrato un esempio di riconoscimento di anomalia sul serbatoio 1 del testbed idrico.

Il riconoscimento degli attacchi informatici è affidato a Snort, un *Intrusion Detection System* (IDS) *rule-based* ampiamente consolidato, che permette l'integrazione di regole personalizzate per identificare minacce note. Nell'ambito del progetto, sono state configurate regole specifiche per rilevare tre categorie principali di attacchi:

- Denail of Service (DoS), nelle sue due varianti TCP flood ed ICMP flood. Tali attacchi mirano a saturare le risorse di rete o di sistema, rendendo i dispositivi bersaglio irraggiungibili o non operativi; nel contesto industriale, essi possono compromettere la disponibilità dei PLC e della comunicazione SCADA.
- Scansione, nelle sue cinque varianti: Null scan, FIN scan, SYN scan, XMAS scan e ICMP scan. Tali attacchi consistono nell'enumerazione sistematica di host, porte e servizi attivi sulla rete, con l'obiettivo di raccogliere informazioni sull'infrastruttura in preparazione a fasi di attacco successive.
- Arp poisoning: tecnica di avvelenamento della cache ARP che consente a un attaccante di intercettare, modificare o bloccare il traffico di rete tra dispositivi legittimi, abilitando scenari di tipo man-in-the-middle particolarmente critici nelle reti industriali flat.

L'architettura prevede l'esecuzione di istanze Snort su entrambe le interfacce di rete del *bridge* (lato PLC e lato SCADA). Questa configurazione a doppio monitoraggio è essenziale in quanto da un lato permette di localizzare con precisione l'origine dell'attacco e dall'altro consente di verificare l'efficacia delle contromisure, osservando se il traffico malevolo viene bloccato prima di raggiungere il dispositivo target. A ogni rilevamento positivo corrisponde l'attivazione immediata di un allarme sonoro-visivo locale per allertare gli operatori.

Per l'implementazione delle contromisure, è stato adottato *nftables*, il moderno framework di filtraggio pacchetti di Linux. La scelta è motivata dalla sua capacità di ispezionare e filtrare il traffico recuperando informazioni a diversi livelli dello stack TCP/IP, dal livello 2 (es. MAC address) fino ai livelli 3/4 (IP, protocolli e porte). Le azioni di risposta si concretizzano nell'applicazione dinamica di regole di *firewalling* sul bridge di rete dello shield. L'obiettivo è intercettare e bloccare i

pacchetti malevoli sull'interfaccia esterna, impedendo che raggiungano il PLC. Si riportano di seguito le azioni di filtraggio specifiche per ognuno degli attacchi rilevabili da Snort.

- Attacchi DoS/DDoS
    - TCP flood: limitazione del throughput di rete per il traffico TCP.
    - ICMP flood: limitazione del throughput di rete per il traffico ICMP.
- Attacchi di scansione. Indipendentemente dalla tipologia di attacco (Null scan, FIN scan, SYN scan, XMAS scan, ICMP scan), si distinguono tre casistiche principali:
    - Se l'indirizzo IP dell'host che esegue la scansione non è nella lista degli indirizzi autorizzati nella rete SCADA, viene filtrato l'indirizzo IP malevolo notificato da Snort.
    - Se l'indirizzo MAC dell'host che esegue la scansione non è nella lista degli indirizzi autorizzati nella rete SCADA, viene filtrato l'indirizzo MAC malevolo notificato da Snort.
    - Se entrambi gli indirizzi MAC ed IP sono tra quelli autorizzati nella rete SCADA, non verrà eseguita alcuna azione in quanto questa comporterebbe la chiusura di connessioni tra dispositivi leciti. In tal caso, l'orchestrator notificherà l'operatore di un attacco in corso che non può essere gestito automaticamente dallo shield.
- Attacco ARP poisoning. Si distinguono due casistiche:
    - Se l'indirizzo MAC dell'host comunicato da Snort non è nella lista di quelli autorizzati nella rete SCADA, viene filtrato l'indirizzo MAC.
    - Se l'indirizzo MAC dell'host comunicato da Snort è nella lista di quelli autorizzati nella rete SCADA, non viene eseguita alcuna azione sullo shield in quanto questa comporterebbe la chiusura di connessioni tra dispositivi leciti. In tal caso, l'orchestrator notificherà l'operatore di un attacco in corso che non può essere gestito automaticamente dallo shield.

Infine, qualora lo shield perda la comunicazione con l'orchestrator, questo eseguirà una policy di default che può essere personalizzata dall'operatore. Tali policy possono andare da una semplice notifica all'operatore fino all'interruzione forzata del bridge di rete con conseguente blocco del traffico.

2.2.2 Dispositivo di orchestrazione: orchestrator

Il dispositivo orchestrator ha un triplice scopo:

- Inviare file di configurazione iniziale ad ogni shield al fine di fornire le corrette informazioni per il rilevamento di attacchi
- Rimanere in ascolto per ricevere notifiche di attacco istante per istante dagli shield
- Inviare le azioni di risposta opportune per il filtraggio del traffico di rete con il tool nftables.

La comunicazione tra l'orchestrator e gli shield è abilitata attraverso un broker Kafka ed è interamente cifrata al fine di garantire la riservatezza delle informazioni scambiate. L'adozione di Kafka, in particolare, consente lo scambio di informazioni sulla base di topic specifici. In tal modo, ogni shield comunicherà attacchi e riceverà le risposte su propri specifici topic, così da garantire che ciascun dispositivo possa accedere esclusivamente alle informazioni di proprio interesse.
Relativamente all'invio del file di configurazione, ogni shield in fase di accensione riceve le seguenti informazioni:

- L'indirizzo IP del PLC da proteggere
- Gli indirizzi IP e i relativi indirizzi MAC dei dispositivi connessi alla rete SCADA
- La soglia massima accettabile per il tasso di pacchetti al secondo

Sulla base delle informazioni di configurazione ricevute, ogni shield inizializza le proprie regole IDS locali per rilevare le tre classi di attacco.
Quando Snort identifica un attacco, l'informazione viene trasmessa all'orchestrator che, in risposta, invia comandi specifici per l'attivazione delle contromisure. Tali comandi sono script Bash codificati in Base64 che, una volta eseguiti dallo shield, inseriscono dinamicamente le regole di filtraggio nftables appropriate per neutralizzare la specifica minaccia rilevata. Il monitoraggio simultaneo sulle due interfacce del bridge (verso il PLC e verso la rete SCADA) permette di classificare l'evoluzione dell'attacco in tre scenari distinti:

1. Attacco attivo e non mitigato (rilevato su entrambe le interfacce): indica che il traffico malevolo sta attraversando il bridge e raggiungendo il PLC. È la condizione critica iniziale che innesca la richiesta di intervento.
2. Attacco mitigato con successo (rilevato solo sull'interfaccia esterna/SCADA): conferma che la regola di firewalling è attiva e sta bloccando il traffico malevolo *prima* che attraversi il bridge, proteggendo efficacemente il PLC nonostante l'attacco persista sulla rete esterna.
3. Attacco terminato (non rilevato su alcuna interfaccia): indica la cessazione dell'attività ostile. In questo caso, l'orchestrator può ordinare la rimozione delle regole di blocco per ripristinare la normale operatività.

Il primo scenario si verifica quando un attaccante tenta di accedere al segmento di rete del PLC dalla rete SCADA. In assenza di adeguate contromisure sul bridge, l'attacco lo attraversa, generando il medesimo evento Snort su entrambe le interfacce monitorate. In seguito al rilevamento, l'orchestrator invia la contromisura appropriata per bloccare il passaggio dell'attacco sul bridge, impedendo così all'attaccante di raggiungere il PLC. In particolare, l'orchestrator invierà un messaggio JSON5 codificato in BASE64 con all'interno il codice Bash per l'inserimento della regola nftables.
Il secondo scenario, invece, può verificarsi in seguito alla ricezione della contromisura e della sua implementazione. Se l'attacco viene rilevato esclusivamente sull'interfaccia esterna (lato SCADA) ma non su quella interna, significa che la regola nftables sta bloccando con successo il traffico malevolo sul

bridge. In questo caso, l'orchestrator notifica l'operatore che l'attacco è contenuto ma ancora attivo sulla rete esterna, mantenendo il filtraggio in attesa della sua conclusione. Se invece l'attacco continua ad essere rilevato su entrambe le interfacce nonostante la contromisura, significa che il filtraggio non è efficace e il PLC è ancora esposto. L'orchestrator scala immediatamente la priorità dell'evento, allertando l'operatore della persistenza di una minaccia critica non gestita automaticamente.
Infine, quando l'attacco scompare da entrambe le interfacce, si deduce che l'attività ostile è cessata. Di conseguenza, l'orchestrator invia un comando di rollback allo shield per rimuovere le regole di filtraggio temporanee, ripristinando la piena trasparenza del bridge e la normale operatività dell'impianto.

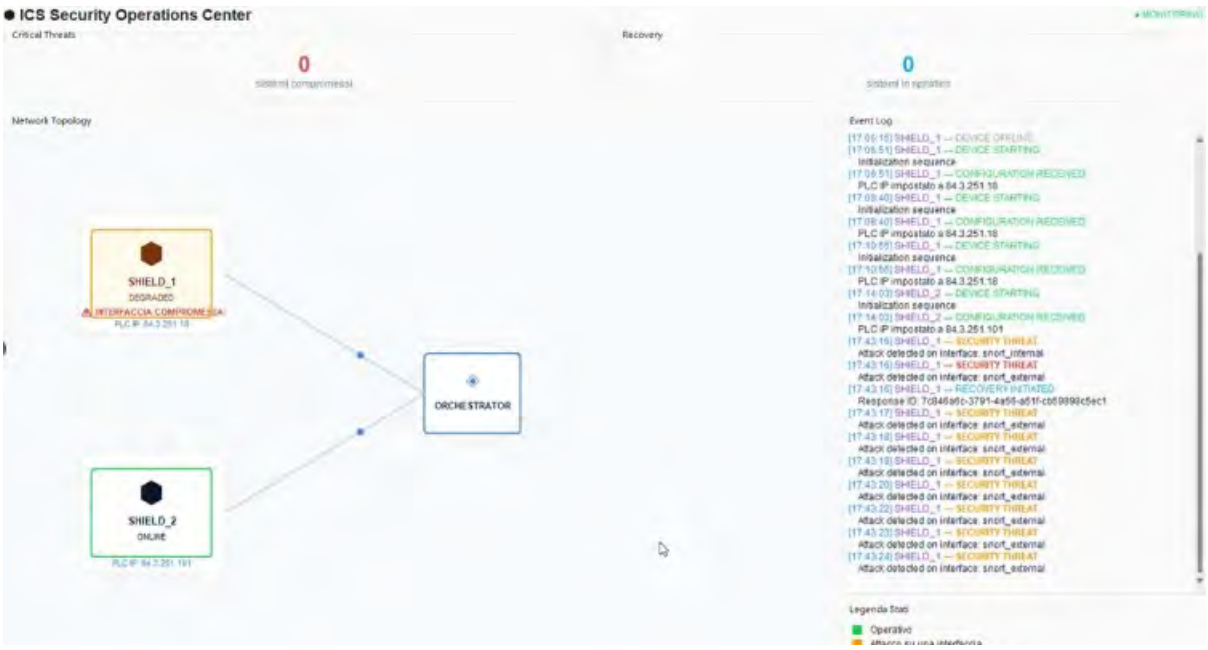


Figura 4. Dashboard dell'orchestrator riportante il riconoscimento di un attacco control il primo

Si noti, infine, come siano state definite contromisure solo per attacchi informatici e non per anomalie di processo. Per queste ultime, infatti, la gestione è demandata interamente all'operatore umano, che deve intervenire fisicamente sull'infrastruttura; questa scelta progettuale mira a evitare che un'azione automatica non supervisionata possa inavvertitamente aggravare lo stato dell'impianto o compromettere la sicurezza fisica.

3. Risultati

La validazione sperimentale è stata condotta implementando due shield Odroid H4+ a protezione dei primi due PLC dell'impianto (). Ciascun dispositivo è interfacciato con una scheda Arduino dedicata al pilotaggio di due distinti allarmi sonoro-visivi, utilizzati per discriminare immediatamente tra rilevamenti di attacchi

informatici e anomalie fisiche di processo. Durante i test, sono stati simulati scenari offensivi utilizzando una macchina virtuale Kali Linux per generare le tre classi di attacchi informatici previste, mentre le anomalie di processo sono state indotte manipolando fisicamente le valvole manuali del testbed. I risultati confermano la piena efficacia del sistema: in tutti gli scenari testati, gli shield hanno correttamente identificato le minacce, attivando gli allarmi locali e trasmettendo le notifiche all'orchestrator, il quale ha risposto inviando le contromisure necessarie per bloccare il traffico malevolo. In è mostrata la dashboard dell'orchestrator che evidenzia la corretta sequenza operativa, dalla distribuzione iniziale delle configurazioni fino al rilevamento real-time di un attacco in corso sul primo shield. In è invece riportato il riconoscimento di anomalie di processo. La dashboard locale, visualizzata direttamente sui display degli Odroid, monitora l'andamento dei cinque serbatoi gestiti dal primo PLC. L'esempio mostra un'anomalia forzata sul primo serbatoio: il sistema reagisce evidenziando in rosso il grafico del livello compromesso e attivando simultaneamente l'allarme dedicato, garantendo così un feedback immediato agli operatori presenti in loco.

A conclusione della validazione, è stata misurata la latenza aggiuntiva causata dall'inserimento dello shield tra il PLC e la rete SCADA. I risultati mostrano che il ritardo introdotto è trascurabile, nell'ordine di un millisecondo, confermando che il sistema aumenta la sicurezza cyber dell'impianto senza rallentare lo scambio dei messaggi critici per il controllo del processo. [1].

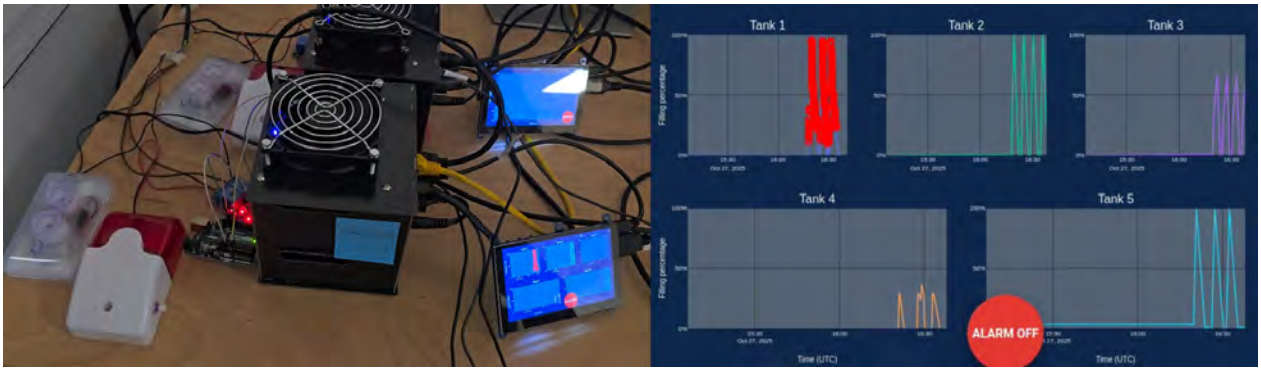


Figura 5. Dashboard de primo Odroid riportante una anomalia riconosciuta sul primo serbatoio

4. Conclusioni

Il progetto Industrial Cyber Shield ha dimostrato come un approccio architetturale a due livelli – basato su dispositivi di campo locali (shield) integrati in modalità inline con coordinamento centralizzato (orchestrator) – rappresenti una soluzione efficace per la protezione delle reti SCADA moderne. L'implementazione di rilevamento ibrido, combinando analisi rule-based mediante Snort e anomaly-based mediante reti neurali LSTM, consente di identificare sia attacchi informatici noti che anomalie di processo precedentemente non osservate. La capacità di rispondere automaticamente agli attacchi informatici attraverso regole nftables, riducendo al

contempo l'intervento manuale a situazioni critiche non gestibili automaticamente, rappresenta un avanzamento significativo nel panorama della sicurezza industriale. I risultati della validazione sperimentale sul testbed di distribuzione idrica confermano l'efficacia del sistema: tutti gli attacchi simulati sono stati riconosciuti e neutralizzati senza introdurre latenze critiche (dell'ordine del millisecondo) sulla comunicazione tra PLC e rete SCADA. L'adozione del broker Kafka per la comunicazione cifrata tra shield e orchestrator garantisce scalabilità e sicurezza, consentendo l'estensione dell'architettura a impianti più complessi con maggior numero di dispositivi controllati.

Bibliografia

[1] R. F. S. Buttiglione, A. Gallo, S. Perone, E. D. Prete and R. Setola, "A Real-Time Data Capture Probe for Anomaly Detection in Industrial Cyber-Physical Systems," 2025 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR), Chania, Crete, Greece, 2025, pp. 707-712, doi: 10.1109/CSR64739.2025.11129988.

[2] L. Faramondi, F. Flammini, S. Guarino, R. Setola, "A hybrid behavior- and Bayesian network-based framework for cyber–physical anomaly detection", Computers and Electrical Engineering, Volume 112, 2023, 108988, ISSN 0045-7906, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108988.

[3] S. D. Antón, D. Fraunholz, C. Lipps, F. Pohl, M. Zimmermann and H. D. Schotten, "Two decades of SCADA exploitation: A brief history," 2017 IEEE Conference on Application, Information and Network Security (AINS), Miri, Malaysia, 2017, pp. 98-104, doi: 10.1109/AINS.2017.8270432.

[4] A. Abid, F. Jemili, O. Korbaa (2023). Distributed deep learning approach for intrusion detection system in industrial control systems based on big data technique and transfer learning. *Journal of Information and Telecommunication*, *7*(4), 513–541. https://doi.org/10.1080/24751839.2023.2239617

[5] https://www.coseritylab.it/ics/index.php/it/

[6] L. Faramondi, F. Flammini, S. Guarino and R. Setola, "A Hardware-in-the-Loop Water Distribution Testbed Dataset for Cyber-Physical Security Testing," in IEEE Access, vol. 9, pp. 122385-122396, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3109465.

La web content analysis per un'efficace diffusione delle informazioni relative alle attrezzature a pressione e agli impianti di processo

F. Ceruti[1], D.G. Cogliani[1], A. Nebbioso[1], G. Saputi[2]

[1]Inail - Dit
[2]Inail – Dcr

Sommario
Per accrescere la consapevolezza sui rischi nei luoghi di lavoro e di conseguenza raggiungere l'obiettivo di ridurre il fenomeno infortunistico, è indispensabile promuovere un'efficace divulgazione delle informazioni di salute e sicurezza sul lavoro.
In quest'ottica, quello delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo è un settore particolarmente rilevante perché interessa un'ampia casistica in termini di tipologia, dimensioni e complessità degli stabilimenti. Inoltre, le attività industriali esercitano un'influenza diretta nel contesto nazionale, sia per l'elevato numero di lavoratori direttamente ed indirettamente coinvolti, che per il valore dei prodotti.
In questa memoria sarà illustrato un progetto portato avanti dall'Inail e basato sull'analisi dei contenuti del sito web dell'Istituto, uno dei canali utilizzati per il trasferimento delle conoscenze anche nell'ambito delle attrezzature a pressione.
L'obiettivo del progetto è tracciare la diffusione della ricerca attraverso la web content analysis, esaminando i contenuti presenti su siti web, social media, blog, forum e altre piattaforme online, trasformandoli in dati analizzabili e confrontabili e strutturandoli secondo indicatori chiave di prestazione (KPI). Nel presente lavoro verranno illustrati i risultati di questa analisi, integrati con le informazioni ricavabili dall'applicativo Civa, così da supportare l'interpretazione e la comprensione delle opinioni degli utenti in merito alle attività connesse con le attrezzature a pressione e gli impianti di processo e dell'impatto di tali tematiche, al fine di valutare il successo nel raggiungimento di obiettivi specifici definiti all'interno della strategia digitale.

1. Complessità tecnica del settore delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo: integrazione tra sicurezza sul lavoro e terza missione

Il settore delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo rappresenta un contesto di elevata complessità sia tecnica che gestionale, contraddistinto da stringenti requisiti in materia di sicurezza, affidabilità e conformità normativa. In fase di progettazione, le attrezzature a pressione devono essere opportunamente dimensionate per sopportare molteplici sollecitazioni, spesso soggette a variazioni nel tempo. Tale esigenza comporta l'applicazione rigorosa di codici e normative riconosciuti, i quali ne disciplinano gli aspetti fondamentali; tuttavia, la mera conformità formale non risulta sufficiente a garantire l'integrità dell'impianto senza

un'accurata analisi dei potenziali fenomeni di danneggiamento che, nel tempo, potrebbero compromettere la resistenza strutturale delle apparecchiature. La gestione integrata del ciclo di vita delle attrezzature introduce ulteriori elementi di complessità: assicurare l'integrità meccanica non può limitarsi alle fasi di progettazione e costruzione, ma deve estendersi anche all'esercizio mediante programmi sistematici di ispezione, manutenzione e monitoraggio. Questi richiedono competenze specialistiche avanzate e l'elaborazione di dati provenienti da fonti eterogenee, incrementando così la complessità gestionale degli impianti.
Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda l'interazione tra componenti tecniche e fattori umani. Anche in presenza di impianti realizzati secondo i più rigorosi standard, errori operativi, lacune nella formazione o decisioni organizzative inappropriate possono originare possibili scenari incidentali. Pertanto, la sicurezza sul lavoro deve essere considerata elemento imprescindibile nell'ingegneria dell'impianto, comprendendo la progettazione, la definizione di procedure operative sicure, la formazione specialistica del personale e la promozione di una solida cultura della sicurezza.
In questo quadro complesso si inserisce il concetto di terza missione, intesa come l'insieme delle attività con cui università, enti di ricerca e istituzioni tecniche contribuiscono allo sviluppo sociale, economico e culturale del territorio. Nel settore delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo, la terza missione può svolgere un ruolo fondamentale nel trasferimento delle conoscenze, nella diffusione della cultura della sicurezza e nel supporto all'innovazione industriale. Attraverso collaborazioni con le imprese, formazione continua, consulenza tecnica e divulgazione scientifica, il sapere frutto dell'attività di ricerca può tradursi in pratiche operative più sicure ed efficienti. La terza missione contribuisce, inoltre, a colmare il divario tra teoria e pratica, favorendo l'aggiornamento professionale di tecnici e promuovendo una visione integrata della sicurezza che tenga conto non solo degli aspetti tecnologici, ma anche di quelli umani e organizzativi. In un settore in cui le conseguenze di un incidente possono essere drammatiche, la diffusione di competenze avanzate e di una solida cultura in materia di sicurezza sul lavoro diventa strumento imprescindibile per la prevenzione degli infortuni.
Il settore delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo, pertanto, richiede un approccio integrato e multidisciplinare per garantire elevati livelli di sicurezza e la terza missione è elemento chiave di tale approccio: mettendo in relazione conoscenza, industria e società, contribuisce a rendere questo settore non solo tecnologicamente avanzato, ma anche più sicuro.

2. Il ruolo della divulgazione online nella riduzione del fenomeno infortunistico

Il trasferimento delle conoscenze, nel quadro di una capillare diffusione della cultura della sicurezza, si attua attraverso una divulgazione efficace delle informazioni in materia di salute e sicurezza sul lavoro e ha un ruolo strategico nell'accrescere la consapevolezza dei lavoratori, favorendo la corretta percezione del rischio e conseguentemente l'adozione di comportamenti preventivi.

La letteratura scientifica mostra come la qualità della comunicazione incida direttamente sulla capacità dei lavoratori di riconoscere i pericoli e valutare correttamente le conseguenze potenziali delle proprie azioni [1]. Una comunicazione inefficace, causata ad esempio da un linguaggio troppo tecnico, da scarsa accessibilità o da eccessiva frammentazione, può generare incomprensioni, sottostima dei rischi e comportamenti non conformi alle procedure di sicurezza.
Attualmente, gli strumenti privilegiati per il trasferimento delle conoscenze sono rappresentati dai canali online, come siti web, social media, blog e forum, che consentono di raggiungere un pubblico molto ampio e diversificato. Una strategia comunicativa strutturata su questi canali può contribuire a modificare i comportamenti degli utenti e può essere di fatto utilizzata per diffondere consapevolezza sui rischi nei luoghi di lavoro.
Anche nel campo della sicurezza industriale, la divulgazione online può assumere un ruolo fondamentale, facendo da ponte tra la normativa tecnica, spesso percepita come complessa o esclusivamente burocratica, e l'operatività quotidiana di chi opera nell'ambito delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo.
In quest'ottica, le norme tecniche, che un tempo erano accessibili solo a consulenti e uffici tecnici, sono ora invece raggiungibili da un pubblico molto più ampio, attraverso blog specializzati, webinar e canali YouTube, che le rendono disponibili in un linguaggio comprensibile anche alle piccole e medie imprese. La diffusione online di contenuti multimediali, come video dimostrativi, tutorial e simulazioni, ad esempio, ha il vantaggio di rendere più concrete le conseguenze di comportamenti o operazioni rischiose.
La tempestività degli aggiornamenti permette, inoltre, di ridurre i tempi legati alle uscite di nuove versioni normative, rendendo di conseguenza più immediate anche le applicazioni pratiche.
Per favorire l'efficace divulgazione delle informazioni, è necessario progettare una corretta strutturazione dei contenuti online, anche attraverso l'analisi delle informazioni già pubblicate, identificando i contenuti più efficaci e quelli da migliorare, individuando eventuali problemi di usabilità, valutando l'interesse degli utenti per le varie tematiche.

3. La web content analysis in un progetto dell'Inail

L'analisi del contenuto web (*WCA*) è una metodologia di ricerca nata dall'evoluzione della tradizionale analisi del contenuto applicata ai media classici (stampa, radio, TV), che si propone come metodo per l'osservazione e l'analisi sistematica del contenuto online [2]. Grazie a questa tecnica è possibile raccogliere e trasformare le informazioni presenti sulle piattaforme online in dati strutturati, al fine di comprendere tendenze, opinioni, significati e impatto delle tematiche trattate, per supportare decisioni strategiche [3].

La Web content analysis può essere svolta con appositi strumenti di Web analytics, che si utilizzano appunto per raccogliere, misurare, analizzare e interpretare i dati relativi all'attività del pubblico di un sito web.
L'impiego degli indicatori chiave di prestazione (KPI) consente, inoltre, di confrontare i risultati e di individuare i punti di forza e di debolezza nella strategia comunicativa adottata.
La finalità è quella di:
- mappare gli interessi e i comportamenti di navigazione degli utenti;
- identificare le aree del sito che hanno necessità di essere ottimizzate, rendendo il sito più intuitivo e coinvolgente;
- basare le decisioni strategiche su dati oggettivi;
- monitorare le performance.
Nel progetto dell'Inail si utilizza l'approccio della WCA per analizzare i contenuti pubblicati sul sito dell'Istituto, con l'obiettivo di valutare, monitorare e ottimizzare la diffusione delle informazioni relative alle tematiche di salute e sicurezza sul lavoro.
La prima parte del progetto ha seguito le fasi di seguito descritte.
1. Raccolta dati: estrazione del range di dati tramite applicativi specifici di web analytics;
2. Pulizia dati: elaborazione dei dati, per eliminare errori comuni (duplicati, valori mancanti, incongruenze, errori di sintassi);
3. Definizione dei KPI (Key Performance Indicator): individuazione degli "indicatori chiave di prestazione" ritenuti utili;
4. Strutturazione dati: riorganizzazione del dataset (i dati aggregati in modo dettagliato, con l'utilizzo di metriche e dimensioni stabilite sulla base dei KPI individuati).
Il risultato è stata una serie di statistiche, che sono risultate utili a misurare l'impatto, la diffusione e l'engagement delle tematiche di ricerca e sicurezza sul lavoro online.
Elemento fondamentale del progetto è stato l'utilizzo dei KPI, metriche specifiche e misurabili che sono state utilizzate per valutare il successo nel raggiungimento di obiettivi specifici definiti all'interno della strategia digitale.
L'integrazione dei KPI con lo strumento di Web analytics, infatti, ha permesso di rendere i KPI misurabili, interpretare i dati raccolti, comprendere le performance rispetto ai KPI individuati, determinare le strategie da intraprendere e monitorare nel tempo il successo delle strategie attuate.

4. Dati: analisi e risultanze

Tra le altre, sono oggetto dell'indagine le specifiche sezioni del sito Inail che illustrano l'attività di ricerca svolta dall'Istituto nell'ambito delle tematiche relative alle attrezzature a pressione, agli impianti di processo e agli impianti Seveso:

- *Sicurezza delle attrezzature*
- *Stabilimenti a rischio d'incidente rilevante*
- *Impianti di trasformazione, produzione e processo*

- *Tecnologie diagnostiche per la sicurezza*

Particolare attenzione è dedicata, inoltre, all'area "*Certificazione verifica*", deputata a fornire informazioni su queste attività svolte dai Dipartimenti di ricerca e dalle Unità operative territoriali Inail e a dare indicazioni specifiche relativamente alle procedure per la certificazione e/o la verifica delle varie tipologie di macchine, apparecchi, utensili ed impianti utilizzati nei luoghi di lavoro.
Infine, un focus specifico è riservato all'applicativo *CIVA,* la piattaforma online di Inail per la richiesta dei servizi di certificazione e verifica di impianti e apparecchi.
L'integrazione dei dati estrapolati dalle pagine web con quelli provenienti dall'applicativo consente, infatti, di approfondire la comprensione delle opinioni degli utenti e di valutare il successo delle iniziative intraprese rispetto agli obiettivi definiti nella strategia digitale.
L'analisi dei dati finora raccolti ha permesso di ottenere una rappresentazione dettagliata della diffusione dei contenuti oggetto di indagine, di cui sono riportate di seguito le relative tabelle, relativamente ai KPI di traffico e ai KPI di coinvolgimento.

KPI di Traffico

Sono utilizzati per quantificare i visitatori e le loro azioni sulla piattaforma web.
Nello specifico, per questi indicatori sono indagate le metriche PAGEVIEWS (numero di visualizzazioni della singola pagina), VISITS (numero di sessioni in cui gli utenti hanno visitato il sito), UNIQUE VISITORS (numero di singoli individui che hanno visitato il sito) e la dimensione REFERRER (da quale canale provengono i visitatori).
La tabella 1 riporta i dati complessivi dell'area *Sicurezza sul lavoro*, che illustra tutte le tematiche di ricerca del Dipartimento Innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti prodotti e insediamenti antropici dell'Inail.

	Page Views		Visits		Unique Visitors	
	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Segments Page: 1 / 1 Rows: 50 1-1 of 1						
1. Area sicurezza sul lavoro	23.476	19.638	11.845	10.995	10.172	9621

Tabella 1. Traffico nell'area *Sicurezza sul lavoro*

Confrontando questi dati generali con quelli specifici delle tematiche oggetto di questa memoria (tab.2), si rileva che il traffico in entrata per la selezione "attrezzature a pressione, impianti di processo e impianti Seveso" rappresenta un range che va dal 30% al 40% del traffico totale di tutta l'area Sicurezza sul lavoro.

	Page Views		Visits		Unique Visitors	
	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Segments Page: 1 / 1 Rows: 50 1-4 of 4	↓ 7698	5425	5023	3520	4521	3209
1. Sicurezza delle attrezzature	3047	2884	2010	1921	1852	1760
2. Stabilimenti a rischio di incidente rilevante	2274	807	1631	537	1383	459
3. Impianti di trasformazione, produzione e processo	1779	1388	959	805	887	741
4. Tecnologie diagnostiche per la sicurezza	598	346	423	257	399	249

Tabella 2. Traffico nelle sezioni dell'area *Sicurezza sul lavoro* relative alle tematiche attrezzature a pressione, impianti di processo e impianti Seveso

Il dato generale relativo alla numerosità delle visite nelle sezioni delle tematiche di ricerca oggetto di indagine riflette il forte interesse da parte degli utenti per le materie in questione, nonostante i dati sul traffico appena illustrati facciano notare, dal 2024 al 2025, un lieve calo di pagine visualizzate, di visite totali e di singoli visitatori in quasi tutte le sezioni indagate.
Nella tabella 3 sono, invece, riportati i dati dell'area *Certificazione e verifica*, relativi alle sole sezioni di interesse.

	Page Views		Visits		Unique Visitors	
	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Segments Page: 1 / 1 Rows: 50 1-4 of 4	131.160	114.658	65.597	59.799	44.300	45.417
1. Certificazione e verifica HP	114.396	100.046	54.418	49.646	34.741	36.566
2. Primo impianto/messa in servizio attrezzature in impianti nucleari	13.511	12.440	8849	8445	7484	7317
3. Riqualificazione serbatoi GPL con metodo EA	1714	862	1142	667	961	578
4. Riqualificazione attrezzature soggette a scorrimento viscoso	1539	1310	1188	1041	1114	956

Tabella 3. Traffico nelle sezioni dell'area *Certificazione e verifica*

È confortante il numero significativo di visualizzazioni in quest'area, che conferma l'interesse strategico per il settore, dimostrando l'esigenza da parte degli utenti di informazioni di servizio operative e concrete, come ad esempio quelle relative alle procedure ed agli adempimenti normativi.
Per quanto riguarda la dimensione Referrer, si è constatato che la maggior parte del traffico in entrata sulle pagine indagate proviene dal motore di ricerca Google. Questo dato è di estrema utilità per capire su quali canali (social, motori di ricerca…) concentrare in futuro la diffusione di queste tematiche.

KPI di Coinvolgimento

Sono utilizzati per valutare come gli utenti interagiscono con i contenuti una volta arrivati sulla piattaforma, al fine di comprendere il coinvolgimento del pubblico.
In particolare, sono stati considerati PAGE VIEWS/VISITS (numero medio di pagine visualizzate in una singola visita), AVERAGE TIME ON SITE (durata media delle sessioni degli utenti su pagine specifiche), BOUNCE RATE (percentuale di visitatori che lasciano

il sito dopo aver visualizzato una sola pagina), TIME SPENT ON PAGE (tempo di permanenza su una pagina), DOWNLOAD (volte in cui una risorsa è stata scaricata).
Le metriche indagate nelle tabelle 4 e 5 illustrano un andamento abbastanza stabile nel tempo, con lievissimi peggioramenti sulle pagine visualizzate per visita e sulla permanenza media nelle singole pagine, mentre sono presenti alcuni miglioramenti relativamente alle percentuali di abbandono del sito. Questi dati fanno riflettere sull'opportunità di rimodulare la strategia digitale utilizzata, rendendo i contenuti più coinvolgenti, ad esempio migliorando la leggibilità dei testi, rendendo più accessibili i materiali informativi o utilizzando elementi multimediali.

	Page Views / Visits		Average Time on Site		Bounce Rate	
Segments	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Page: 1 / 1 Rows: 50 1-4 of 4						
1. Impianti di trasformazione, produzione e processo	1,86	1,72	00:00:30	00:00:37	6,88%	8,20%
2. Sicurezza delle attrezzature	1,52	1,50	00:01:01	00:01:09	13,28%	15,62%
3. Tecnologie diagnostiche per la sicurezza	1,41	1,35	00:01:03	00:01:04	18,44%	2,72%
4. Stabilimenti a rischio di incidente rilevante	1,39	1,50	00:01:47	00:01:13	55,36%	36,13%

Tabella 4. Coinvolgimento nelle sezioni dell'area *Sicurezza sul lavoro* relative alle tematiche attrezzature a pressione, impianti di processo e impianti Seveso

	Page Views / Visits		Average Time on Site		Bounce Rate	
Segments	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Page: 1 / 1 Rows: 50 1-4 of 4						
1. Certificazione e verifica HP	2,10	2,02	00:01:00	00:00:48	4,14%	3,21%
2. Primo impianto/messa in servizio attrezzature in impianti nucleari	1,53	1,47	00:00:29	00:00:27	0,49%	0,39%
3. Riqualificazione serbatoi GPL con metodo EA	1,50	1,29	00:01:12	00:00:59	13,05%	11,24%
4. Riqualificazione attrezzature soggette a scorrimento viscoso	1,30	1,26	00:00:29	00:00:21	0,42%	0,48%

Tabella 5. Coinvolgimento nelle sezioni dell'area *Certificazione e verifica*

La tabella 6 riporta, invece, il tempo medio di permanenza sulla pagina *Attrezzature a pressione*, che è stata scelta per illustrare un esempio specifico.

	Occurrences	
Segments		
Page: 1 / 1 Rows: 50 1-1 of 1		
1. Attrezzature a pressione	5758	100,0%
Time Spent on Page - Bucketed		
Page: 1 / 2 Rows: 5 1-5 of 9		
1. less than 15 seconds	3044	63,9%
2. 15 to 29 seconds	600	12,6%
3. 30 to 59 seconds	478	10,0%
4. 1 to 3 minutes	382	8,0%
5. 3 to 5 minutes	93	2,0%

Per questa dimensione si considera ottimale come range temporale di riferimento quello che va da 1 a 3 minuti, come indicato dai migliori riferimenti di benchmarking. Il risultato riportato in tabella in questo caso suggerisce che sarebbe opportuno apportare miglioramenti al contenuto, al fine di renderlo maggiormente attrattivo.

Tabella 6. Tempo medio di permanenza sulla pagina "Attrezzature a pressione"



Tabella 7. Numero di download del documento "Raccolta VSR" (*Verifica della stabilità dei recipienti in pressione*)

Nella tabella 7 è riportato, a titolo esemplificativo, il numero di download del documento "Raccolta VSR", uno dei più rappresentativi per le tematiche oggetto di indagine, che risulta scaricato 387 volte tra il 2024 e il 2025.

CIVA

Quanto emerso nei paragrafi precedenti offre spunti utili per ottimizzare le strategie di diffusione dei contenuti online. Al fine di dare più concretezza e meglio contestualizzare l'analisi svolta, in questo paragrafo saranno integrati i dati già illustrati con quelli estrapolati dall'applicativo CIVA.

L'elevato interesse da parte degli utenti per questo strumento è riscontrabile nella tabella 8, che mostra il traffico relativo alle pagine del sito Inail che trattano specificatamente dell'applicativo.

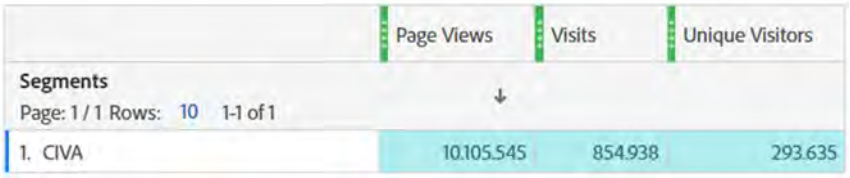


Tabella 8. Traffico nelle pagine di portale relative al CIVA

L'analisi dei dati estratti dall'applicativo CIVA, integrati con le statistiche di traffico delle pagine web del portale Inail dedicate al servizio, consente di delineare in modo più preciso il comportamento degli utenti e l'evoluzione della domanda di certificazione e verifica nel settore delle attrezzature a pressione, degli impianti di processo e degli stabilimenti soggetti al controllo ai sensi della normativa Seveso.

Le tabelle di seguito riportate illustrano l'andamento delle prestazioni erogate da CIVA suddivise per *anno/settore* e, in una diversa prospettiva, per *area geografica.*

Questa doppia lettura consente una valutazione più articolata, in grado di mettere in evidenza sia le tendenze generali sia possibili specificità territoriali.

Nelle tabelle 9, 10 e 11 è possibile rilevare, relativamente agli anni 2024 e 2025, il totale delle richieste presentate in tutti i settori del CIVA, il numero degli utenti dell'applicativo e il totale delle richieste nei settori di interesse (Pressione e Riscaldamento).

ANNO	TOTALE RICHIESTE
2024	280.401
2025	286.636
TOT	567.037

Tabella 9. Totale richieste CIVA

ANNO	TOTALE UTENTI
2024	57.813
2025	59.888
TOT	117.701

Tabella 10. Tot. utenti CIVA

ANNO	DESCRIZIONE SETTORE	N° RICHIESTE
2024	Pressione	53.929
2024	Riscaldamento	17.542
2025	Pressione	56.625
2025	Riscaldamento	17.932
TOT		146.028

Tabella 11. Tot. richieste per settore

Scendendo nel dettaglio delle prestazioni per anno e settore (tab. 12 e 13), emergono alcune dinamiche significative:

2024		
SETT	PRESTAZIONE	N° RICHIESTE
PRESSIONE	Verifica finale omologazione a.p.e.t.	36
	Revisione autocisterne GPL	51
	Esonero serbatoi GPL presso fabbricante (verif.cumulativ	55
	Censimento circuito art. 16	65
	Scorrimento Viscoso - Piano controlli DIT	72
	Richiesta documentazione varia	75
	Immatricolazione	78
	Solo immatricolazione	78
	Richiesta prestazioni varie con intervento del tecnico	135
	Scorrimento Viscoso	151
	Richiesta visualizzazione apparecchi/pratiche	313
	Revisione recipienti NON GPL	340
	Revisione recipienti trasportabili GPL	360
	Dichiarazione di messa in servizio serbatoi GPL (cumulativ	428
	Costruzione membrature di ricambio	433
	Verifica di messa in servizio	456
	Voltura per cessione impianto/apparecchio	591
	Prove e indagini varie	648
	Demolizione apparecchio	1.436
	Esame proposta	1.522
	Comunicazione di disinstallazione apparecchio	1.553
	Voltura per acquisizione impianto/apparecchio	1.673
	Richiesta di riparazione	1.683
	Verifica finale	1.868
	Taratura valvole	1.915
	Denuncia apparecchi non censiti	1.980
	Dichiarazione di messa in servizio	2.025
	Esonero serbatoi GPL presso fabbricante (verifica singola)	3.513
	Dich. di messa in servizio art.5 DM 329/04 comma b,c,d	7.630
	Prima verifica periodica	9.435
	Verifica e dichiarazione di messa in servizio (rich. contestu	13.179
RISCALDAMENTO	Prima verifica periodica	68
	Denuncia impianto non censito	84
	Richiesta documentazione varia	88
	Demolizione impianto	139
	Richiesta visualizzazione apparecchi/pratiche	168
	Voltura per acquisizione impianto/apparecchio	308
	Verifica primo impianto di riscaldamento (DM 01-12-75)	2.646
	Approvazione progetto (DM 01-12-75)	13.992
TOT		71.270

Tabella 12. Prestazioni CIVA 2024[1]

2025		
SETT	PRESTAZIONE	N° RICHIESTE
PRESSIONE	Revisione autocisterne GPL	38
	Censimento circuito art. 16	47
	Esonero serbatoi GPL presso fabbricante (verif. cumulative	51
	Richiesta documentazione varia	71
	Censimento tubazioni art.16	77
	Censimento tubazioni art. 16 - Sottorichieste	83
	Scorrimento Viscoso	162
	Richiesta prestazioni varie con intervento del tecnico	230
	Revisione recipienti trasportabili GPL	278
	Richiesta visualizzazione apparecchi/pratiche	295
	Revisione recipienti NON GPL	354
	Costruzione membrature di ricambio	448
	Voltura per cessione impianto/apparecchio	529
	Verifica di messa in servizio	551
	Dichiarazione di messa in servizio serbatoi GPL (cumulativa	666
	Prove e indagini varie	696
	Esame proposta	1.312
	Richiesta di riparazione	1.398
	Demolizione apparecchio	1.540
	Verifica finale	1.611
	Comunicazione di disinstallazione apparecchio	1.658
	Denuncia apparecchi non censiti	1.739
	Voltura per acquisizione impianto/apparecchio	1.914
	Taratura valvole	1.996
	Dichiarazione di messa in servizio	3.016
	Esonero serbatoi GPL presso fabbricante (verifica singola)	3.345
	Dich. di messa in servizio art.5 DM 329/04 comma b,c,d	8.674
	Prima verifica periodica	9.926
	Verifica e dichiarazione di messa in servizio (rich. contestua	13.688
RISCALDAMENTO	Voltura per cessione impianto/apparecchio	50
	Denuncia impianto non censito	83
	Richiesta documentazione varia	90
	Richiesta visualizzazione apparecchi/pratiche	145
	Demolizione impianto	150
	Voltura per acquisizione impianto/apparecchio	440
	Verifica primo impianto di riscaldamento (DM 01-12-75)	3.027
	Approvazione progetto (DM 01-12-75)	13.910
TOT		74.288

Tabella 13. Prestazioni CIVA 2025[1]

- **La crescita costante del volume complessivo delle prestazioni** indica un utilizzo sempre più consolidato dello strumento da parte degli operatori. Questo dato conferma l'importanza del CIVA come canale privilegiato per la gestione dei procedimenti di certificazione e verifica, in coerenza con i processi di digitalizzazione avviati dall'Istituto.
- **Le categorie di prestazione maggiormente rappresentate** (es. dichiarazioni di messa in servizio, verifiche di messa in servizio, verifiche periodiche) evidenziano come gli utenti ricorrano soprattutto alle funzionalità riconducibili agli adempimenti obbligatori. Ciò riflette un comportamento coerente con la natura normativa delle

[1] Dal conteggio sono state escluse le prestazioni con meno di 30 richieste.

attività legate alle attrezzature a pressione e agli impianti di processo, ma stimola anche una riflessione sulla possibilità di rendere maggiormente visibili e accessibili i servizi a valore aggiunto (linee guida, supporti informativi, strumenti di prevenzione).

- **Il confronto tra i due anni** mostra eventuali incrementi o riduzioni legati a dinamiche esterne, quali aggiornamenti normativi, cambiamenti organizzativi delle imprese o variazioni nella base di utenza, che possono influenzare il numero di richieste. L'analisi di tali variazioni rappresenta un indicatore utile per valutare l'impatto delle strategie di comunicazione e l'usabilità del sistema.

Prendendo in considerazione la prospettiva geografica, nelle tabelle 14 e 15 si analizzano le richieste per settore e regione di provenienza, consentendo ulteriori approfondimenti di interesse:

- Le differenze tra regioni, spesso significative, riflettono la **diversa densità produttiva e industriale del Paese**, in particolare nei settori ad alto utilizzo di attrezzature a pressione e impianti tecnologici. Le regioni con un tessuto industriale più sviluppato presentano volumi più elevati di richieste, confermando la correlazione tra attività produttiva e necessità di certificazione e verifica.
- In alcune aree possono emergere **scostamenti rispetto alla media nazionale**, che potrebbero essere collegati a:
  - concentrazione locale di specifici settori merceologici;
  - differenze nella struttura delle imprese (PMI vs grandi aziende);
  - livelli differenti di familiarità con l'applicativo digitale;
  - picchi dovuti a campagne informative o interventi regionali.

2024					
SETTORE	REGIONE	N° RICHIESTE	SETTORE	REGIONE	N° RICHIESTE
PRESSIONE	Valle d'Aosta	65	RISCALDAMENTO	Molise	45
	Molise	206		Calabria	46
	Liguria	582		Basilicata	50
	Abruzzo	623		Valle d'Aosta	136
	Umbria	868		Sicilia	161
	Campania	1.003		Trentino-Alto Adige	174
	Basilicata	1.182		Sardegna	184
	Calabria	1.226		Puglia	201
	Friuli-Venezia Giulia	1.379		Umbria	205
	Marche	1.498		Marche	238
	Lazio	1.829		Campania	288
	Sardegna	1.880		Abruzzo	307
	Trentino-Alto Adige	1.895		Friuli-Venezia Giulia	482
	Puglia	2.016		Liguria	500
	Toscana	3.239		Toscana	1.098
	Piemonte	4.636		Veneto	1.316
	Sicilia	4.993		Emilia-Romagna	2.019
	Emilia-Romagna	7.134		Lazio	2.054
	Veneto	7.153		Piemonte	3.425
	Lombardia	10.522		Lombardia	4.613
TOT		53.929	TOT		17.542

Tabella 14. Tot. richieste CIVA per settore e regione - anno 2024

2025					
SETTORE	REGIONE	N° RICHIESTE	SETTORE	REGIONE	N° RICHIESTE
PRESSIONE	Valle d'Aosta	120	RISCALDAMENTO	Calabria	47
	Molise	222		Basilicata	62
	Calabria	471		Molise	71
	Abruzzo	490		Trentino-Alto Adige	97
	Liguria	802		Valle d'Aosta	154
	Basilicata	1.062		Sardegna	177
	Umbria	1.252		Campania	190
	Campania	1.335		Sicilia	218
	Friuli-Venezia Giulia	1.485		Umbria	221
	Marche	1.580		Puglia	228
	Trentino-Alto Adige	1.755		Marche	285
	Lazio	2.196		Abruzzo	422
	Sardegna	2.600		Liguria	495
	Puglia	2.712		Friuli-Venezia Giulia	540
	Toscana	3.546		Toscana	1.327
	Sicilia	3.889		Veneto	1.342
	Piemonte	5.071		Lazio	1.781
	Veneto	6.632		Emilia-Romagna	2.075
	Emilia-Romagna	8.010		Piemonte	3.638
	Lombardia	11.395		Lombardia	4.562
TOT		56.625	TOT		17.932

Tabella 15. Tot. richieste CIVA per settore e regione - anno 2025

Le evidenze territoriali possono costituire una base importante per indirizzare future azioni di comunicazione mirata, potenziando il supporto nelle regioni in cui il volume di richieste è sotto le attese o dove emergono variazioni anomale rispetto agli anni precedenti.
Nel complesso, i dati confermano che il CIVA rappresenta uno strumento molto utilizzato e in progressiva crescita, sia per necessità operative delle aziende sia per effetto delle politiche di digitalizzazione dei servizi Inail.

5. Ricadute e sviluppi futuri

Nella prima fase del progetto è stato possibile tracciare la diffusione dei contenuti del sito Inail, monitorando il traffico verso le pagine di specifico interesse, per capire la portata di un determinato argomento, oltre a valutare l'engagement con i contenuti, per comprendere il livello di interesse e di partecipazione degli utenti.
L'integrazione tra i dati del portale web e quelli dell'applicativo CIVA ha permesso, inoltre, di valutare la corrispondenza tra interesse informativo (visite alle pagine CIVA) e domanda effettiva di servizio (richieste in piattaforma), individuare possibili gap comunicativi o aree in cui potenziare i contenuti orientati alla chiarezza delle procedure, supportare la pianificazione di interventi migliorativi, sia sul fronte della user experience sia su quello della diffusione informativa.
L'analisi finora condotta ha dimostrato che è necessario un continuo miglioramento delle strategie comunicative da adottare per migliorare il posizionamento e la diffusione delle informazioni sul sito istituzionale, confermando che la Web content

analysis può essere fondamentale nello studio delle tematiche su web e dei comportamenti degli utenti nei confronti di esse.
Questo tipo di analisi può essere utilizzata come base da cui partire per rendere più efficace la divulgazione scientifica, che svolge un ruolo strategico nell'accrescere la consapevolezza dei lavoratori e favorire la corretta percezione del rischio e l'adozione di comportamenti preventivi, per la riduzione degli infortuni.
Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si prevede l'adozione di un approccio qualitativo basato sulla *sentiment analysis,* con l'aggiunta di KPI di consapevolezza e feedback, oltre ad integrazioni con *test di usabilità* del sito e studio della *SEO* (Search Engine Optimization), per il posizionamento delle nostre pagine sui motori di ricerca.

Bibliografia

[1] Endsley MR. *The High Cost of Low Situation Awareness*. In: Lee JD, Wickens CD, Liu Y, Boyle LN, editors. The Oxford Handbook of Cognitive Engineering. Oxford: Oxford University Press; 2021

[2] McMillan SJ. *The microscope and the moving target: the challenge of applying content analysis to the world wide web*. Journal of Mass Communication Quarterly (JMCQ). 2000;77(1):80-89. doi: 10.1177/107769900007700107

[3] Krippendorff K. *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology*. 4th ed. Thousand Oaks (CA): SAGE Publications; 2019.

[4] Kaushik A. *Web analytics 2.0*. Milano: Ulrico Hoepli Editore; 2010. ISBN 978-88-203-5524-1

[5] Risi E. Vite datificate. *Modelli di ricerca nella società delle piattaforme*. Milano: Franco Angeli;2021. ISBN 978-88-351-1798-8

[6] Lupton D. *Sociologia digitale*. Milano: Pearson;2018. ISBN 978-88-919-0591-8

[7] Herring SC. *Web Content Analysis: Expanding the Paradigm*. In: Hunsinger J, Klastrup L, Allen M, editors. International Handbook of Internet Research. Dordrecht: Springer; 2010. DOI 10.1007/978-1-4020-9789-8

[8] Vicari, S. *Analizzare i contenuti digitali: metodi e prospettive sociologiche*. Sociologia e Ricerca Sociale. 2017;38(112): 89–108.

[9] Greco, P. *Divulgazione scientifica e nuovi media: opportunità e rischi*. Journal of Science Communication. 2018;17(3), A01.

[10] AA.VV. *Atti Convegno Safap 2023 - Sicurezza e affidabilità delle attrezzature a pressione e degli impianti di processo*. Milano: Inail;2023. ISBN 978-88-7484-828-7

[11] Ceruti F, Cogliani DG, Nebbioso A. *La web content analysis a supporto di un'efficace divulgazione scientifica*. Milano: Inail;2025. ISBN 978-88-7484-971-0