Produzione di acido ialuronico mediante processi biotecnologici innovativi

R. Modestino[1], M.P. Gatto[1], G. Aversa[1], M. Pagliuca[2], G. Lanzetta[2]

[1]Inail - Uot di Avellino
[2] Altergon Italia s.r.l.

Sommario
L'acido ialuronico è una molecola preziosa naturalmente presente nell'organismo, fondamentale per mantenere idratazione, elasticità e salute dei tessuti. Grazie alle sue proprietà viscoelastiche e all'elevata tollerabilità, trova impiego nei settori farmaceutico, medico e dermoestetico, con applicazioni che spaziano dai trattamenti topici, ai dispositivi medici e agli usi iniettabili per articolazioni e bellezza.
Lo studio si concentra sulla descrizione di un impianto per la produzione biotecnologica di acido ialuronico presente in un centro di eccellenza ed innovazione ubicato sul territorio avellinese, evidenziando l'attenzione rivolta all'ecosostenibilità, all'uso di processi e sistemi automatizzati, non solo per la loro efficienza ma anche per la capacità di migliorare la qualità della vita dei lavoratori.
L'intero impianto, completamente automatizzato, digitalizzato e dotato di sensori intelligenti per il monitoraggio in tempo reale, in linea con i principi di Industria 4.0 e 5.0 è composto da alcune attrezzature in pressione che, in base alla specifica funzione, sono inserita nel ciclo produttivo del preparato farmaceutico.
Sulla base dell'analisi dei rischi e le condizioni di esercizio di tali attrezzature sono state individuate le prevedibili anomalie che possono determinare l'aumento di pressione; pertanto, verranno analizzate tutte le scelte adottate per ridurre il rischio sovrapressione e la loro interconnessione con le tecniche di automazione presenti sull'impianto.

1. Introduzione

L' Azienda oggetto di studio è una realtà farmaceutica, parte di un gruppo svizzero, attiva in Italia dal 2000. Lo stabilimento, situato nell'area industriale di Morra de Sanctis (AV), in alta Irpinia, è specializzato nella produzione di principi attivi farmaceutici, tra cui cerotti topici medicati e Sodio Ialuronato, un ingrediente utilizzato in vari settori come quello cosmetico, medico e topico. L'acido ialuronico è un principio attivo fondamentale per la cura della pelle e dei tessuti, grazie alle sue proprietà idratanti e rigeneranti. La produzione del Sodio Ialuronato è un processo delicato che richiede tecnologie avanzate per garantire alta purezza e



Figura 1. Sito Altergon Italia Srl

sicurezza. Oggi, grazie ai progressi della biotecnologia, è possibile produrre questo ingrediente utilizzando metodi più sostenibili, senza l'impiego di fonti animali, a favore di processi biotecnologici che minimizzano l'impatto ambientale e migliorano la qualità del prodotto finale. Nell' impianto, sono presenti apparecchiature a pressione per ottimizzare diverse fasi della produzione del Sodio Ialuronato. Queste apparecchiature garantiscono la sicurezza e l'efficienza durante la produzione, riducendo il rischio di errori e aumentando la qualità complessiva del prodotto. L'Azienda ha integrato anche le tecnologie di Industria 4.0 nei suoi processi produttivi, introducendo l'automazione, l'analisi dei dati in tempo reale e l'uso della robotica. Questo ha permesso di migliorare l'efficienza, ridurre i tempi di produzione e aumentare la precisione dei processi. Tuttavia, la tecnologia da sola non basta: l'impegno delle persone, l'attenzione alla qualità e l'integrazione della dimensione umana nei processi produttivi, principio dell'Industria 5.0, non solo ottimizzano la produttività, ma garantiscono il benessere dei collaboratori e l'adattabilità dei prodotti alle necessità del mercato, sempre nel rispetto dell'ambiente.

2. Cos'è il Sodio Ialuronato

Il Sodio Ialuronato è una forma derivata dall'acido ialuronico, una sostanza naturalmente presente nel corpo umano, soprattutto nella pelle, nelle articolazioni e negli occhi.

Dal punto di vista chimico, lo ialuronano è uno zucchero complesso naturale appartenente alla famiglia dei glicosaminoglicani ed è costituito da un polimero lineare di disaccaridi, a loro volta formati da acido D-glucuronico e D-N-acetilglucosamina, collegati tramite legami glicosidici alternati β-1,4 e β-1,3. La catena polimerica può raggiungere una lunghezza fino a 25.000 unità disaccaridiche e, in vivo, i polimeri di ialuronano presentano un peso molecolare compreso tra 5.000 e 20.000.000 Da. Il Sodio Ialuronato rappresenta la forma salina dell'acido ialuronico; questa caratteristica ne migliora la stabilità chimica e la solubilità in acqua, rendendolo particolarmente adatto all'impiego in formulazioni liquide e topiche. Dal punto di vista fisico, si presenta come una polvere bianca che, una volta miscelata con acqua, diventa una soluzione densa e viscosa. Grazie a questa proprietà, è in grado di trattenere fino a 1.000 volte il suo peso in acqua, rendendolo un idratante straordinario. Per questo motivo, è ampiamente utilizzato in prodotti cosmetici come creme anti-invecchiamento, sieri idratanti e lozioni, dove aiuta a mantenere la pelle elastica, ben nutrita e protetta contro la disidratazione. Dal punto di vista della produzione, il Sodio Ialuronato viene ottenuto principalmente attraverso fermentazione batterica, un metodo biotecnologico che ha sostituito l'estrazione animale, garantendo un prodotto più sicuro, etico e sostenibile. I batteri utilizzati,

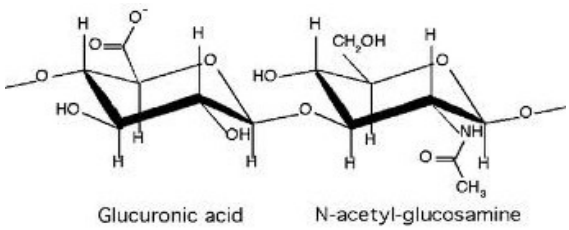


Figura 2. Struttura molecolare dello ialuronano

sono in grado di produrre grandi quantità di acido ialuronico che viene poi convertito nella sua forma salina, il Sodio Ialuronato.

3. Descrizione del processo produttivo dell'acido ialuronico

La metodologia adottata per la produzione di Sodio Ialuronato è il risultato di un processo brevettato [1] ed altamente tecnologico, che unisce sistemi avanzati, rigidi controlli di qualità e il rispetto per la sostenibilità. Il processo prevede una fermentazione batterica accuratamente controllata, seguita da una sequenza integrata di purificazione, precipitazione ed essiccamento, realizzate mediante apparecchi a pressione ad alte prestazioni.

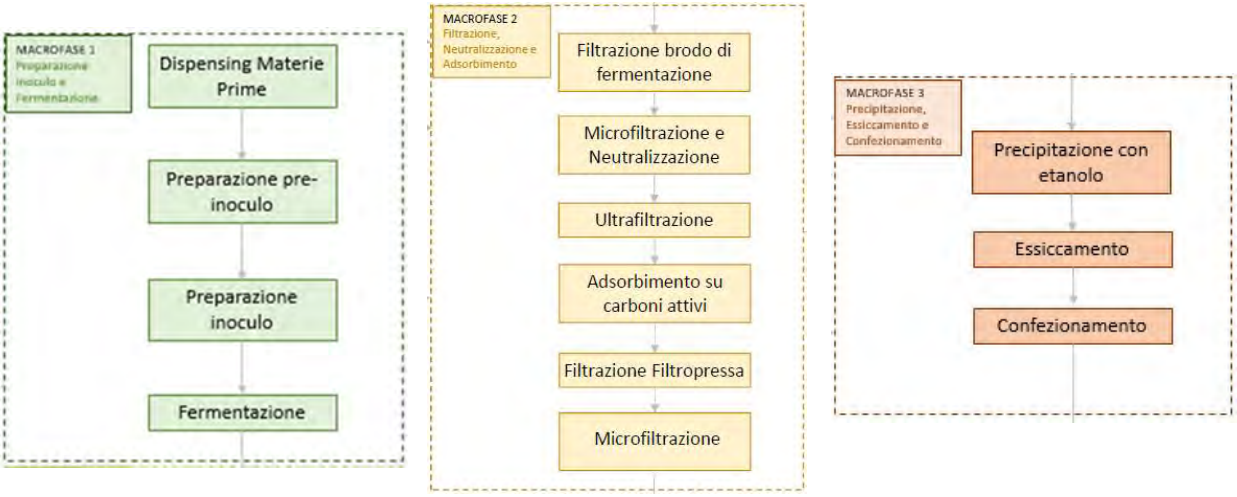


Figura 3. Schema delle fasi del ciclo produttivo relative all'attività di produzione dello Ialuronato di Sodio

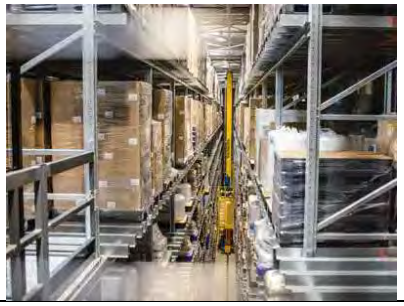
Il processo produttivo del Sodio Ialuronato può essere suddiviso in tre macrofasi; nella Tabella 1 vengono descritti i processi afferenti alle singole macrofasi.

Nel dettaglio gli step possono essere così elencati:

Macrofase 1

Approvvigionamento materiali

Le materie prime vengono approvvigionate in funzione del planning di produzione, conservate in magazzino automatizzato, dove vengono sottoposte ai controlli qualità (Sampling) e movimentate a fronte delle esigenze lavorative. La lavorazione è discontinua, in funzione della programmazione di produzione



Ripartizione materiali

Le pesate dei materiali vengono effettuati in sala dispensing, sotto cappa a flusso laminare, nelle quantità necessarie previste dal batch record. La lavorazione è discontinua, in funzione della programmazione di produzione.

Rivitalizzazione ed espansione WCB

La sospensione cellulare della WCB, opportunamente diluita, viene rivitalizzata e fatta crescere progressivamente su terreni solidi e liquidi. L'espansione cellulare avviene nel laboratorio inoculi ed è eseguita a ogni avvio di lotto.



Preparazione inoculo

La brodocoltura è sottoposta ad un'ulteriore fase di espansione per garantire una carica microbica tale da poter avviare la fase di fermentazione produttiva su scala industriale.

Fermentazione

L'inoculo viene trasferito nel fermentatore nel quale avviene la fase di produzione del polisaccaride in un intervallo di circa 12 ore. Durante il processo vengono monitorati costantemente tutti i parametri critici (Temperatura, pH, aereazione, miscelazione e pressione). Da questa fase si origina una brodocoltura costituita da una miscela di cellule, acidi nucleici, acidi organici, metaboliti ed il prodotto di interesse (Sodio Ialuronato), che viene poi recuperato in serbatoi dedicati e purificato nelle successive fasi.

Macrofase 2

Filtrazione su terra di diatomee – Microfiltrazione

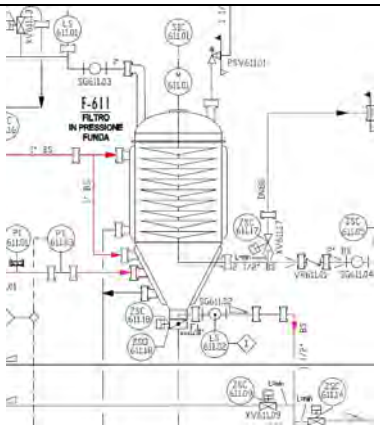
In questa fase viene aggiunta celite, come coadiuvante della filtrazione, e acido tricloroacetico. Attraverso il passaggio in un filtro in pressione a piatti orizzontali (Filtro Funda), avviene la separazione delle cellule dalla brodocoltura proveniente dal fermentatore. La soluzione filtrata tramite passaggio su microfiltri viene ulteriormente purificata.	
<u>Purificazione</u> La soluzione microfiltrata viene neutralizzata a pH neutro con soda e sottoposta a ultrafiltrazione mediante un sistema automatico corredato da membrane filtranti di un determinato cut-off. La soluzione ultrafiltrata viene sottoposta a trattamento con carboni attivi e polishing finale per la rimozione di piccole impurezze.	
Macrofase 3	
<u>Precipitazione – essiccamento</u> La soluzione purificata viene inviata ad un precipitatore e mediante l'aggiunta di etanolo 96%, viene eseguita la precipitazione dei cristalli di Sodio Ialuronato. Lo slurry viene trasferito dal precipitatore ad un filtro essiccatore e sottoposto a filtrazione e lavaggio con etanolo. Il prodotto viene essiccato sottovuoto e mediante controllo della temperatura.	
<u>Confezionamento bulk</u> Il prodotto finale recuperato dal filtro essiccatore viene confezionato in packaging idonei, opportunamente sigillati ed etichettati. Il prodotto viene conservato in cella refrigerata a temperatura controllata, prima di essere avviato alla distribuzione/vendita.	

Tabella 1. Macrofasi del processo produttivo

4. L’impianto e i principi dell’Industria 4.0 e 5.0

L’impianto di produzione del Sodio Ialuronato è costituito da una linea produttiva articolata in due aree di purificazione. La prima area di purificazione, semi-automatizzata e digitalizzata, è entrata in servizio nel 2011 ed è attualmente operativa, oltre a essere oggetto di un continuo processo di miglioramento e ottimizzazione.

La seconda area di purificazione, messa in servizio nel 2025 e oggetto di analisi nel presente lavoro, è stata progettata per introdurre ulteriori miglioramenti in termini di automazione, efficienza operativa e controllo di processo, rappresentando un’evoluzione significativa rispetto alla linea esistente. Le apparecchiature coinvolte sono soggette alla Direttiva PED e sono installate nel locale purificazione, all'interno dell'edificio produttivo, dedicato esclusivamente alla produzione di Sodio Ialuronato. Le principali apparecchiature coinvolte in questa fase sono le seguenti:

- V671 – Harvest e buffer tank: processo di neutralizzazione con soda.
- UF671 – Unità di ultrafiltrazione.
- V672 – Customizzazione della viscosità intrinseca (IV) e del peso molecolare (MW).
- V673 / FP673 – Adsorbimento su carbone attivo e separazione del carbone dal prodotto.
- V674 / FP674 – Microfiltrazione per la riduzione del bioburden.



Figura 4. Foto Impianto

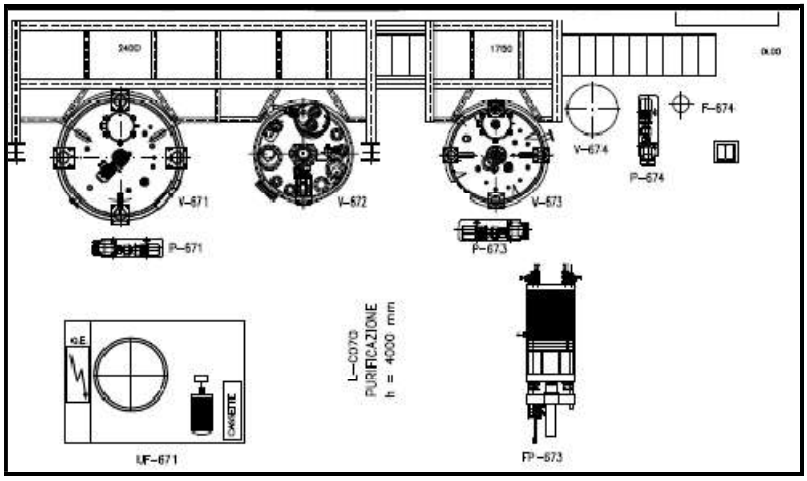


Figura 5. Layout di impianto

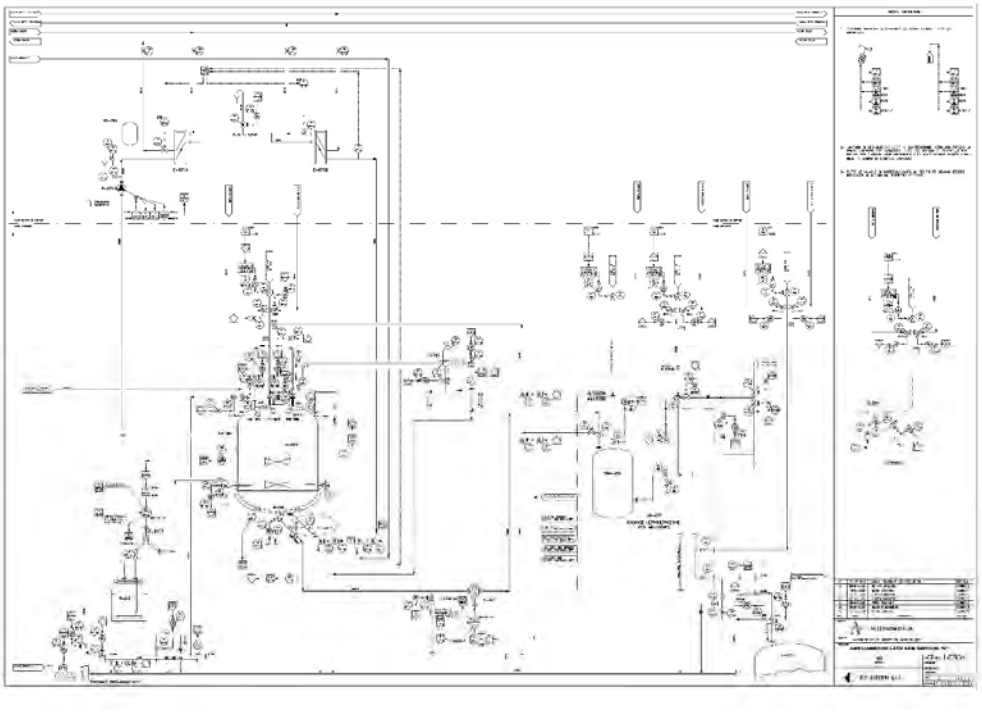


Figura 6. P&ID

Di seguito si riporta il dettaglio costruttivo delle cinque apparecchiature.

4.1 Apparecchiatura a pressione – Serbatoio V671

Il Serbatoio V671 è utilizzato per neutralizzare il prodotto con soda avente le seguenti caratteristiche

Descrizione attrezzatura	*V (L)*	*Ps (bar)*	Fluido	Ts (°C)	Cat
Corpo	*8000*	*3*	*1*	*-10/152*	*III*
Mantello	*610*	*4*	*2*	*-10/152*	

Tabella 2. Parametri operativi dell'Unità V671

Per il controllo dei parametri di processo sono presenti a bordo macchina sensori di livello, temperatura, pressione e pH.
A protezione dell'apparecchiatura in caso di eventi di sovrappressioni, sono installati lato corpo un disco di rottura e lato mantello una Valvola di Sicurezza.

4.2 Apparecchiatura a pressione – Unità di Ultrafiltrazione UF671

L'ultrafiltro UF671è un sistema di filtrazione a flusso tangenziale (TFF, Tangential Flow Filtration) automatizzato costituito da quattro holder per elementi filtranti e un serbatoio a pressione avente le seguenti caratteristiche

Descrizione attrezzatura	*V (L)*	*Ps (bar)*	Fluido	Ts (°C)	Cat
Corpo	*1270*	*-1/ +3*	*2*	*0/ 80*	*III*
Mantello	*11*	*-1/ +5*	*2*	*0/ 80*	

Tabella 3. Parametri operativi dell'Unità UF671

Per il controllo dei parametri di processo sono presenti a bordo macchina sensori di livello, portata, conducibilità temperatura, pressione e pH.
A protezione dell'apparecchiatura in caso di eventi di sovrappressioni, sono installati lato corpo un disco di rottura e lato mantello una Valvola di Sicurezza.

4.3 Apparecchiatura a pressione – Serbatoio V672

Il Serbatoio V672 è un reattore smaltato dedicato al trattamento acido termico del prodotto per raggiungere la viscosità e il peso molecolare desiderato. Si riportano di seguito le caratteristiche:

Descrizione attrezzatura	*V (L)*	*Ps (bar)*	Fluido	Ts (°C)	Cat
Corpo	*3500*	*-1/ +6*	*1*	*-25/200*	*IV*
Mantello	*430*	*-1/ +6*	*2*	*-25/200*	

Tabella 4. Parametri operativi del Serbatoio V672

Per il controllo dei parametri di processo sono presenti a bordo macchina sensori di livello, temperatura, pressione e pH.
A protezione dell'apparecchiatura in caso di eventi di sovrappressioni, sono installati lato corpo un disco di rottura e lato mantello una Valvola di Sicurezza.

4.4 Apparecchiatura a pressione – Serbatoio V673

Il Serbatoio V673 è un serbatoio dedicato alla fase di adsorbimento su carbone attivo. Si riportano di seguito le caratteristiche

Descrizione attrezzatura	*V (L)*	*Ps (bar)*	Fluido	Ts (°C)	Cat
Corpo	*8000*	*3*	*1*	*-10/152*	*III*
Mantello	*610*	*4*	*2*	*-10/152*	

Tabella 5. Parametri operativi del Serbatoio V673

Per il controllo dei parametri di processo sono presenti a bordo macchina sensori di livello, temperatura, pressione e pH.
A protezione dell'apparecchiatura in caso di eventi di sovrappressioni, sono installati lato corpo un disco di rottura e lato mantello una Valvola di Sicurezza.

4.5 Apparecchiatura a pressione – Serbatoio V674

Il Serbatoio V674 è un serbatoio dedicato allo stoccaggio del prodotto adsorbito per il successivo invio alla fase di microfiltrazione. Si riportano di seguito le caratteristiche

Descrizione attrezzatura	*V (L)*	*Ps (bar)*	Fluido	Ts (°C)	Cat
Corpo	*625*	*3*	*1*	*-10/143*	*IV*

Tabella 6. Parametri operativi del Serbatoio V674

Per il controllo dei parametri di processo sono presenti a bordo macchina sensori di livello, temperatura e pressione.
A protezione dell'apparecchiatura in caso di eventi di sovrappressioni è installato un disco di rottura.

4.6 Automazione del processo

Il processo di produzione è altamente automatizzato e interconnesso mediante un sistema avanzato di controllo distribuito (Distributed Control System – DCS), che svolge un ruolo centrale nella gestione e nel coordinamento di tutte le operazioni di processo [2]. Un DCS è un sistema di automazione industriale caratterizzato dalla distribuzione delle funzioni di controllo su più unità locali interconnesse, in grado di operare in modo autonomo ma coordinato, garantendo elevata affidabilità, scalabilità e controllo in tempo reale dell'impianto. A differenza dei sistemi centralizzati, il DCS consente una gestione più robusta dei processi complessi e continui, tipici dell'industria chimica, farmaceutica e alimentare. Il sistema consente la supervisione e il controllo in tempo reale di tutti i parametri critici di processo, quali livello, temperatura, pH, pressione e conducibilità, attraverso l'impiego di sensori avanzati, strumenti di campo intelligenti e interfacce digitali uomo-macchina (HMI) [3]. All'interno del DCS vengono implementate vere e proprie sequenze di processo automatizzate, che permettono l'avvio e la gestione automatica delle diverse fasi operative, assicurando ripetibilità, tracciabilità e riduzione dell'errore umano [4]. Il sistema è conforme agli standard delle versioni 4.0 e 5.0, che promuovono l'automazione avanzata, l'interconnessione tra dispositivi e l'ottimizzazione del controllo di processo in tempo reale. Nonostante l'alta automazione, l'operatore gioca un ruolo cruciale nel garantire il corretto funzionamento del sistema. Prima di avviare ogni operazione, l'operatore è responsabile della preparazione della linea e della supervisione delle corrette fasi durante l'esecuzione di sequenze automatizzate oltre a configurare correttamente le impostazioni di valvole, pompe etc. Durante il



Figura 7. Operatore che supervisiona l'impianto mediante HMI del sistema di controllo distribuito

processo, l'operatore è anche coinvolto nel monitoraggio continuo dei parametri operativi, come la portata del prodotto e la pressione differenziale, assicurandosi che vengano rispettati i valori impostati e che il processo sia conforme alle specifiche di qualità. La Tabella seguente sintetizza un esempio di lista di input/output del sistema DCS per l'unità V671 descritta in precedenza.

Sistema	Instrument Tag	Point Tag	Card	PB-DP Card	Ch.	Type	Descrizione
V671	EAS_P671B	EA_P671B	DI818	06	01	DI	Scatto termico P-671B
V671	EL_AG671	AG671	DI818	06	08	DI	Stato Agitatore AG-671
V671	EL_P671	P671	DI818	06	11	DI	Stato Pompa P-671
V671	LS-671.1	LAS-671.1	DI818	06	13	DI	Basso Livello serbatoio V-671

Tabella 7. Esempio: Parte dell'I/O LIST SISTEMA DCS

5. Conclusioni

In conclusione, il processo analizzato si inserisce all'interno di un impianto costituito da apparecchiature a pressione; tuttavia, il rischio di sovrapressione risulta contenuto e adeguatamente gestito grazie all'impiego di una strumentazione di processo avanzata e a sistemi di protezione meccanica dedicati, quali dischi di rottura e valvole di sicurezza, il cui accoppiamento garantisce la protezione delle attrezzature da diversi tipi di sovrappressione che si possono verificare.

In particolare, la valvola di sicurezza, a protezione del lato camicia del recipiente, permette di gestire accumuli di pressione graduali, offrendo un servizio continuo e ripristinabile; il corpo, contenente il processo chimico, è protetto invece dal rischio di sovrappressioni repentine o estreme, dal disco di rottura garantendo la tenuta ermetica ed evitando la contaminazione del fluido. Tali dispositivi garantiscono il mantenimento delle condizioni operative entro limiti di sicurezza, assicurando la protezione dell'impianto, degli operatori e del prodotto, in conformità con le normative vigenti e con gli elevati standard richiesti in ambito farmaceutico

Il processo descritto rappresenta quindi un esempio concreto di come l'automazione avanzata, unita a una supervisione integrata, possa ottimizzare le fasi produttive, garantendo al contempo alta precisione, efficienza operativa e qualità del prodotto finale. Sebbene in questo progetto sia stata analizzata in dettaglio solo una parte del processo produttivo, emerge chiaramente come un eventuale ampliamento delle linee di produzione possa portare a ulteriori margini di ottimizzazione.

Il potenziamento delle capacità produttive, insieme al continuo affinamento delle tecnologie impiegate, consentirà di ottenere risultati sempre più elevati, migliorando la gestione delle risorse, incrementando la tracciabilità del processo e mantenendo costantemente i più alti standard qualitativi. In questo contesto, il continuo investimento in automazione e nella formazione degli operatori rappresenta un fattore chiave, in quanto permette non solo di rispondere efficacemente alle attuali

esigenze produttive, ma anche di garantire che il processo evolva nel tempo, affrontando le sfide future in modo sicuro, competitivo ed efficiente.
Si ringrazia per la collaborazione M. C. Giannone - Altergon Italia s.r.l.

Bibliografia

[1] Volpe F., Pagliuca M., Ruggiero A., Altergon Italia Srl, Processo per la Produzione Industriale di Ialuronato di Sodio (Hana) Altamente Purificato A Peso Molecolare Controllato, Brevetto Italiano 0001413257 data rilascio 16/01/2015.
[2] Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., Doyle, F. J. Process Dynamics and Control, 4th Edition, Wiley, 2016.
[3] IEC 61131-3 - Programmable Controllers – Programming Languages, International Electrotechnical Commission.
[4] ISA – International Society of Automation - Distributed Control Systems (DCS): Concepts and Applications, ISA.

Problematiche nella fabbricazione di attrezzature destinate allo stoccaggio di idrogeno liquido

L. Bruzzo[1]

[1]Inail - UOT di Livorno

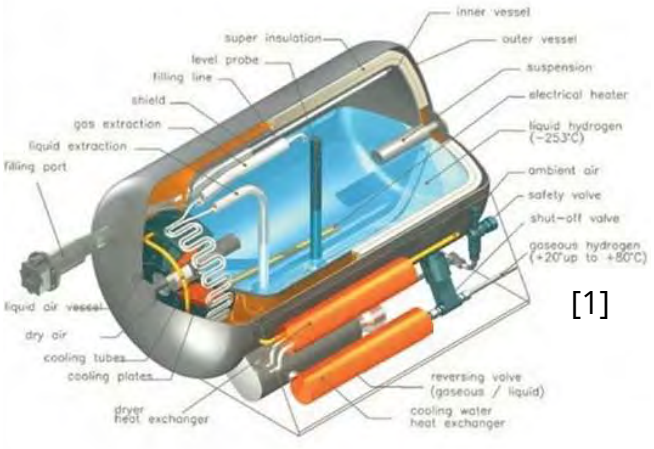
Sommario
L'idrogeno è sicuramente tra i combustibili più promettenti individuati nell'ambito della transizione energetica, da impiegarsi soprattutto nel settore automotive. Nel presente lavoro vengono analizzate le problematiche legate al mantenimento dei requisiti di tenacità dei materiali, in relazione alla loro suscettibilità all'infragilimento a basse temperature, impiegati nei sistemi di contenimento dell'idrogeno liquido. Tali problematiche risultano di particolare rilevanza nelle attività di certificazione e di riparazione delle attrezzature a pressione.

1. Introduzione

Indipendentemente dalle modalità con cui viene prodotto, per lo stoccaggio primario dell'idrogeno vengono preferiti sistemi di contenimento idonei a immagazzinarlo in fase liquida e refrigerata, in considerazione del vantaggioso rapporto volumetrico tra idrogeno liquido e gassoso, pari a 1:848.



Figura 1. modalità produzione idrogeno



[1]

Figura 2 recipiente criogenico per idrogeno liquido

2. Lo sviluppo normativo

In attesa dell'evoluzione di alcune norme armonizzate alla direttiva PED, una delle poche norme UNI che affronta le tematiche dei sistemi di contenimento per idrogeno liquido è il rapporto tecnico UNI ISO TR 15916:2018 "Considerazioni di base per la sicurezza dei sistemi a idrogeno" [2], che fornisce le linee guida per l'uso dell'idrogeno nelle forme gassose e liquide, nonché per la sua conservazione sotto forma gassosa

e di liquido criogenico, identificando i principali problemi di sicurezza, i pericoli ed i rischi.
Seppure in modo abbastanza generico, nell'appendice C del rapporto tecnico vengono indicati alcuni criteri per la selezione dei materiali destinati ai sistemi di contenimento, quali la suscettibilità all'infragilimento da idrogeno e la suscettibilità all'infragilimento alle basse temperature.
Relativamente alla suscettibilità all'infragilimento alle basse temperature i materiali adatti a tali applicazioni sono quelli indicati nella tabella in figura 3.

Type of gas	Liquefaction temperatures		Grade of suitable base materials
	°C	K	
Ammonia Propane (LPG)	-33.3 -42.1	240 231	Al-killed CMn steels
Propylene Carbon disulphide	-47.7 -50.2	225 223	2.5%Ni steel
Hydrogen sulphide Carbon dioxide Acetylene Ethane	-59.5 -78.5 -84.0 -88.4	214 195 189 185	3.5%Ni steel
Ethylene (LEG)	-103.8	169	5-9%Ni steel
Krypton Methane (LNG) Oxygen	-153.4 -161.5 -182.9	120 112 90	9%Ni steel Austenitic stainless steels
Argon Fluorine Nitrogen	-185.9 -188.1 -195.8	87 85 77	Austenitic stainless steels Aluminium alloy 36%Ni steel (INVAR)
Hydrogen	-252.8	20	
Helium	-268.9	4	

[3]

Figura 3. materiali utilizzati nei sistemi di contenimento di fluidi refrigerati e liquefatti

Tra i materiali più utilizzati vi sono quelli appartenenti alla famiglia degli inox austenitici della serie AISI 300 nella declinazione L (low carbon) in quanto generalmente resistenti all'infragilimento da idrogeno, grazie alla loro struttura cristallina (CFC) che limita la diffusione dell'idrogeno; inoltre non sono soggetti alla rapida transizione da duttile a fragile ma piuttosto una progressiva riduzione dei valori di resilienza al diminuire della temperatura.

3. Attrezzature PED

I materiali della serie AISI 300 utilizzabili alla temperatura di -253°C (20K) rispondenti ai requisiti PED sono quelli elencati nelle tabelle B.2-11 contenute nelle norme armonizzate PED UNI EN 13445-2:2023 [4] e UNI EN 13480-2:2024 [5].
Il materiale scelto deve necessariamente soddisfare quanto richiesto dalla norma armonizzata UNI EN ISO 21028-1:2016 [6] relativamente ai requisiti di tenacità per i materiali a temperatura criogenica. In particolare, al paragrafo 4.2.3, la norma stabilisce che, per temperature minime ammissibili inferiori a −196 °C, è sufficiente garantire, alla temperatura di prova di impact test (figura 3) di −196 °C, un valore minimo di energia assorbita pari a 48 J/cm² oppure un'espansione laterale non inferiore a 0,53 mm (l'espansione laterale del provino indica la sua capacità di deformazione plastica, ad un'alta deformazione corrisponde un'alta duttilità del materiale sottoposto a impact test).
Il requisito relativo al valore minimo di 48 J/cm² risulta obbligatoriamente garantito dal fabbricante dei semilavorati, in quanto sia nella tabella 9 della norma UNI EN

10028-7:2016 [7], relativa alle lamiere, sia nella tabella 5 della norma UNI EN 10216-5:2021 [8], relativa ai tubi, il valore minimo previsto per la prova di resilienza è pari a 60 J/cm² alla temperatura di prova di −196 °C.
La ferrite delta (δ) residua che nell'acciaio inox austenitico è purtroppo sempre presente, anche se in minime quantità, potrebbe influenzare negativamente le caratteristiche di resilienza del materiale. Tale presenza dovrà essere valutata attentamente sia nei semilavorati (lamiere, tubi, ecc.) come descritto in precedenza, sia - e soprattutto - nei giunti saldati in quanto soggetti a cicli termici meno controllabili e potenzialmente più severi rispetto a quelli di produzione dei semilavorati stessi.
La ferrite delta (δ) residua, che si forma durante la solidificazione dell'acciaio inossidabile e che ha una struttura CCC, risulta molto sensibile all'infragilimento alle basse temperature (figura 4).



Figura 4. Struttura dell'Austenite (CFC) e della Ferrite (CCC)

L'American Welding Society ha introdotto il concetto di Ferrite Number (FN) per esprimere il tenore di ferrite in una saldatura.
L'FN corrisponde, semplificando, alla frazione di percentuale di ferrite presente nell'acciaio austenitico.
L'uso di strumenti quali il diagramma di Schaeffler integrato con il WRC 1992 diagram (figura 5c) consente di prevedere la struttura e il contenuto di ferrite (espresso in Ferrite Number - FN) nei giunti saldati di acciai inossidabili austenitici (serie 300).
Alcune norme individuano quali debbano essere i valori di ferrite delta (δ) accettabili nelle saldature in funzione della temperatura di utilizzo. Ad esempio, secondo le «Supplementary Specification to API Recommended Practice 582 for Welding of Pressure Containing Equipment and Piping S-705» (art. 13.13.1) i valori di FN devono essere compresi tra 3÷10 quando eserciti a temperature superiori a 662 °F (350 °C) o se inferiori a -150 °F (-101 °C).

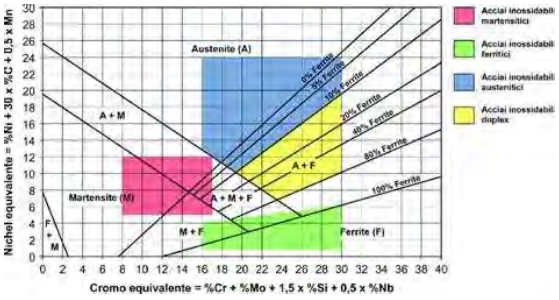


Figura 5a. Diagramma di Schaeffler

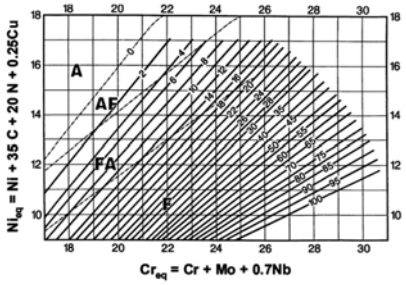


Figura 5b. Diagramma WRC 1992

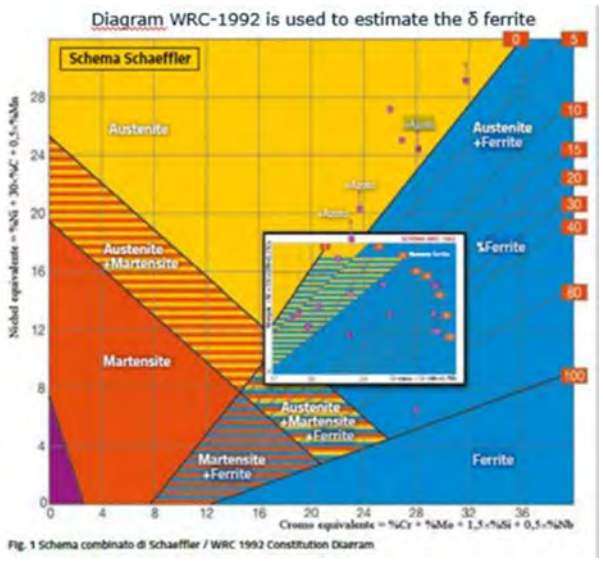


Figura 5c. Diagramma Schaeffler integrato con il WRC 1992

4. Effetto della ferrite residua

CONTRO Essendo fragile alle basse temperature, la ferrite diminuisce la resilienza dell'acciaio inox austenitico. La ferrite (struttura CCC) presenta una maggiore diffusività dell'idrogeno (capacità dell'idrogeno di attraversare il materiale) rispetto all'austenite (struttura CFC). Pertanto, risulta più sensibile all'infragilimento da idrogeno.

PRO La criccabilità a caldo - o più correttamente la criccabilità da solidificazione - è un difetto probabile nella saldatura di acciai inox austenitici. La presenza di ferrite residua riduce la possibilità di formazione di cricche a caldo (figura 6)

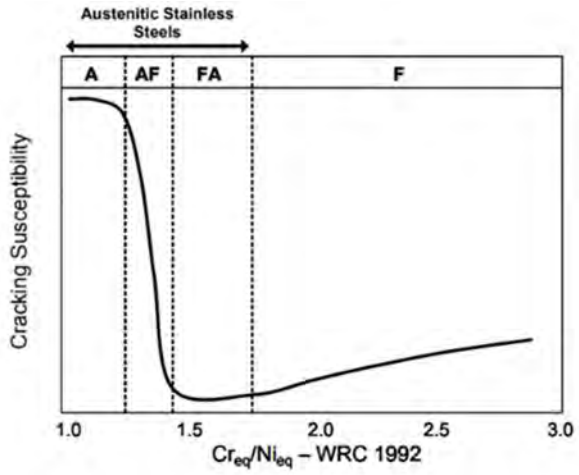


Figura 7. Suscettibilità alla criccabilità a caldo in funzione della presenza di Austenite-Ferrite giunti in acciaio inox austenitico



Figura 8. Cricca a caldo in giunto in acciaio austenitico

5. Materiali d'apporto

I materiali inox dei consumabili utilizzati in ambito criogenico sono stati modificati in modo da avere un contenuto di ferrite controllato (LCF) così che la ferrite delta (δ) residua post saldatura sia limitata.

I consumabili LCF hanno un contenuto di ferrite compreso tra 2÷5 FN (in genere 3 FN), tuttavia non sempre l'uso di questi consumabili garantisce il requisito minimo di espansione laterale di 0,53 mm. Pertanto, alcuni produttori di consumabili stanno testando consumabili con FN=0 (NF) ottenendo sensibili miglioramenti di tenacità dei giunti saldati.

Purtroppo, le designazioni tecniche sia UNI EN ISO che AWS non tengono in considerazione il valore di ferrite FN contenuto nel materiale, riscontrabile solo nel nome commerciale e nella relativa scheda tecnica emessa dal produttore del consumabile stesso. È quindi possibile trovare in commercio consumabili standard, LCF o FN, con la stessa designazione unificata.

6. Procedure di saldatura

La qualificazione delle procedure di saldatura in ambito PED normalmente viene fatta seguendo la norma armonizzata UNI EN ISO 15614-1:2019 [9]. Il paragrafo 8.4.4 stabilisce che se la prova di resilienza è richiesta a temperature inferiori a -20°C, per i processi 111, 114, 12, 136 e 132 (figura 7), ovvero processi di saldatura scorificanti, il campo di validità della qualifica è limitato al nome commerciale del materiale d'apporto utilizzato in sede di qualifica.
Questa limitazione non si applica ai fili pieni o bacchette aventi la stessa designazione e la stessa composizione chimica.

UNI EN ISO 4063

1	Saldatura ad arco
11	Saldatura ad arco senza gas protettivo con elettrodo fusibile
111	Saldatura ad arco con elettrodo rivestiti
114	Saldatura ad arco con filo elettrodo animato (senza gas protettivo)
12	Saldatura ad arco sommerso
121	Saldatura ad arco sommerso con filo elettrodo
122	Saldatura ad arco sommerso con nastro elettrodo
13	Saldatura ad arco in gas protettivo con filo elettrodo fusibile
131	Saldatura ad arco in gas inerte con filo elettrodo fusibile (MIG)
135	Saldatura ad arco in gas attivo con filo elettrodo fusibile (MAG)
136	Saldatura ad arco in gas attivo con filo elettrodo animato (flux cored)
138	Saldatura ad arco in gas attivo con filo elettrodo animato (metal cored)
14	Saldatura ad arco in gas protettivo con elettrodo infusibile
141	Saldatura ad arco in gas inerte con elettrodo di tungsteno (TIG)
15	Saldatura al plasma

Figura 9. UNI EN ISO 4063:2023
Nomenclatura dei processi di saldatura e numeri di riferimento

Quindi, in considerazione del fatto che la designazione unificata non tiene in conto del numero di ferrite FN, il fabbricante di attrezzature a pressione potrebbe utilizzare consumabili con FN diverso da quello utilizzato in occasione della qualifica di procedimento, riducendo così il fenomeno di criccabilità a caldo ma aumentando potenzialmente il rischio di infragilimento alle basse temperature
La norma UNI EN ISO 15614-1:2019, nella nota d) del prospetto 2, limitatamente alla temperatura di prova di resilienza, specifica che tale temperatura deve essere scelta dal fabbricante tenendo conto della norma o delle norme di applicazione. Il riferimento è pertanto la norma UNI EN ISO 21028-1:2016, che prevede una temperatura di prova pari a −196 °C e un valore minimo di energia assorbita di 48 J/cm².
Si ricorda tuttavia che la tabella S1.6 della Raccolta S, revisione 95, adottava un approccio maggiormente cautelativo, prevedendo l'esecuzione della prova di resilienza alla temperatura di −196 °C con il soddisfacimento del valore minimo di resilienza richiesto dalla norma del materiale base, pari a 60 J/cm².

7. Talloni di produzione

I talloni di produzione (test coupons) sono campioni saldati separatamente o come estensione della saldatura realizzata nella fabbricazione. Vengono sottoposti a prove distruttive e non distruttive per garantire che la saldatura soddisfi i requisiti di resistenza e integrità. La norma UNI EN 13445-4:2023 "*Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 4: Costruzione*" [10] regolamenta quali debbano essere il numero e le attività da effettuarsi sui talloni di produzione. Nella tabella 9.3-1, la norma elenca quali siano le prove da effettuare sugli stessi. Relativamente al gruppo 8.1 (inox austenitici) con spessori inferiori a 6 mm, le prove previste dal codice (pieghe, trazioni e macro) purtroppo non riescono ad intercettare l'eventuale presenza di ferrite delta (δ).

La stessa norma, al punto 9.2 b), si tutela laddove il contenuto di FN del consumabile sia maggiore di 12, imponendo un tallone di produzione per l'effettuazione di una prova di resilienza specifica.

8. Codice ASME

Per quanto riguarda gli apparecchi a pressione, la norma ASME VIII div. 1 [11] si applica anche alle attrezzature che contengono idrogeno liquido nel rispetto delle limitazioni previste nella parte ULT integrate con UHA 51 per il Minimum Design Metal Temperature (MDMT). La norma definisce quale sia il numero di ferrite accettabile: si veda, ad esempio, il capitolo UHA 51 (a) con MDMT < -196°C dove è richiesto un FN <5 sui materiali d'apporto e, inoltre, in produzione non si deve superare l'FN misurato in occasione della qualifica di procedimento di saldatura.

Tale prescrizione normativa tiene conto del fatto che, in ambito ASME Section IX [12], al paragrafo QW-404, la validità della qualifica del procedimento di saldatura non è limitata all'impiego di uno specifico nome commerciale del materiale d'apporto, ma è limitata alla sua designazione unificata.

Per le tubazioni la norma ASME B31.12 [13] si applica a quelle che trasportano idrogeno gassoso e miscele di idrogeno gassoso, nonché alle tubazioni in servizio con idrogeno liquido. In termini generali, ASME B31.3 [14] e B31.12 condividono molti aspetti, tuttavia, è necessario considerare le proprietà specifiche dell'idrogeno.

Per questi motivi, la B31.12 stabilisce requisiti più severi, sia per mitigare il rischio di perdite sia per prevenire danni da fragilità da idrogeno e/o alle basse temperature.

Le principali differenze tra le due norme sono: un numero di materiali utilizzabili più limitato, la richiesta di saldature delle connessioni da effettuarsi con preparazione a piena penetrazione (SET-IN) e un differente algoritmo di calcolo dello spessore minimo essendo stato inserito il parametro Mf che tiene conto anche della perdita di duttilità del materiale durante il funzionamento in presenza di idrogeno.

Una delle differenze più interessanti è la misurazione della ferrite indicata al paragrafo IP-10.11.

Degna di menzione è la nota relativa all'accettabilità dei materiali inox austenitici indicata nella tabella A-2-1 dove viene posta la condizione che venga attenzionata la

possibile conversione martensitica quando il componente viene sollecitato al di sopra del carico di snervamento trovando così l'energia necessaria per la trasformazione strutturale allo stato solido direttamente dalla sollecitazione al quale è sottoposto. Una nota simile la si trova anche nel prospetto C2 del rapporto tecnico UNI ISO TR 15916:2018 anche se per come è stata scritta rimane di più difficile interpretazione.

9. Conclusioni

Garantire il mantenimento dei requisiti di tenacità derivanti dalla suscettibilità all'infragilimento alle basse temperature nei materiali INOX austenitici, utilizzati nei sistemi di contenimento dell'idrogeno liquido, basandosi sulle norme UNI EN ISO attualmente in vigore, risulta difficoltoso proprio perché nessuna o quasi prende in considerazione l'inevitabile anche se minima presenza di ferrite delta (δ) residua. Presenza che potrebbe essere "cercata" dal fabbricante, sempre nel rispetto delle norme, in quanto limitante i fenomeni di criccabilità a caldo sopradescritti.
Nella realizzazione di tali sistemi di contenimento devono essere necessariamente presi a riferimento le considerazioni presenti in altri codici (es. ASME) concertando con il fabbricante talloni di produzione e controlli integrativi, distruttivi e non che consentano di garantire i requisiti di tenacità soprattutto dei giunti saldati.

Bibliografia

[1] https://i0.wp.com/test-driver.it/wp-content/uploads/2022/09/Serbatoio-criogenico-per-lidrogeno-liquido.jpg?w=800&ssl=1
[2] UNI ISO TR 15916:2018 "Considerazioni di base per la sicurezza dei sistemi a idrogeno"
[3] "Developpement of austenitic steel filler metals and weld properties for liquid hydrogen storage applications" Lincoln Electric Europe
[4] UNI EN 13445-2:2023 Recipienti a pressione non esposti a fiamma -
[5] UNI EN 13480-2:2024 Tubazioni industriali metalliche
[6] UNI EN ISO 21028-1:2016 Recipienti criogenici
[7] UNI EN 10028-7:2016 Prodotti piani di acciai per recipienti a pressione
[8] UNI EN 10216-5:2021Tubi di acciaio senza saldatura per impieghi a pressione
[9] UNI EN ISO 15614-1:2019 Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici
[10] UNI EN 13445-4:2023 Recipienti a pressione non esposti a fiamma
[11] 2023 Sez. VIII ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code Div. 1
[12] 2023 Sez. XI ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code
[13] 2023 ASME B31.12Hydrogen Piping and Pipelines – Code for Pressure Piping
[14] 2024 ASME B31.3 Process Piping – Code for Pressure Piping

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 e insiemi a pressione

E. Bemporad[1], R. Balistreri[2], F. Giacobbe[3], N. Palumbo[4], M. Formica[5]

[1]Inail – Dit
[2]Inail – UOT di Cagliari
[3]Inail – UOT di Messina
[4]Inail – UOT di Brescia
[5]Esperto della materia

Sommario
In ambito europeo è attiva un'iniziativa per il "miglioramento della regolamentazione" in termini di efficienza, rilevanza, coerenza e valore aggiunto per l'UE, che riguarda in generale il Nuovo Quadro Legislativo per i prodotti industriali ed in particolare anche la direttiva 2014/68/UE (PED), a valle della quale saranno proposte eventuali azioni di revisione, in funzione dei risultati delle analisi in corso.
Il presente lavoro illustrerà, contestualizzandoli alle specificità della PED i fattori propulsori di questa revisione: la digitalizzazione, le catene del valore complesse, gli obiettivi dell'economia circolare, che pongono la necessità della rigenerazione/riciclaggio dei prodotti e la tracciatura digitale degli stessi (es. passaporto e marcatura CE digitale), la transizione energetica, con applicazioni che richiedono requisiti particolari (es. stoccaggio e traporto di gas liquefatti e compressi a bassissima temperatura). I fattori in questione stanno fortemente influenzando l'evoluzione dei processi, delle tecnologie (es. uso dell'Intelligenza Artificiale nei sistemi strumentati di sicurezza) e delle tecniche di produzione (es. manifattura additiva, nuovi materiali), di ispezione, valutazione e controllo (es. da remoto). Si discuteranno in merito i risultati delle sopracitate azioni di revisione ed analisi ad oggi resi noti, e, per ciascuna di esse si forniranno spunti sui potenziali impatti dell'evoluzione in corso. Il lavoro offrirà in definitiva una panoramica di sintesi delle criticità e delle opportunità emerse, con specifico riferimento alla PED, in questo processo di revisione e analisi, evidenziando le sfide poste e quali possono essere le chiavi per affrontarle al meglio, soprattutto ai fini della valutazione di conformità alla direttiva.

1. Introduzione

Il Nuovo Quadro Legislativo comunitario per i prodotti industriali (NLF) ha raggiunto l'obiettivo di armonizzare le regole UE sui prodotti, rafforzare la valutazione di conformità e garantire coerenza e competitività ed ha apportato un valore aggiunto elevato ed ampiamente riconosciuto [1]. Tuttavia, dalla sua adozione, l'industria e i prodotti sono cambiati radicalmente e sono stati identificati punti di debolezza

soprattutto in riferimento alla rilevanza di alcuni elementi del NLF rispetto ai bisogni attuali e futuri, in particolare la digitalizzazione, l'economia circolare, le modifiche post-immissione sul mercato, aspetto collegabile al precedente, e la necessità di garantire una conformità dinamica nel tempo [2]. Per mantenere la propria rilevanza, il NLF dovrebbe dimostrarsi in grado di affrontare le sfide della digitalizzazione e delle catene del valore complesse, introducendo, tra l'altro, il passaporto digitale dei prodotti (DPP) e la marcatura CE digitale e dovrebbe inoltre facilitare il re-manufacturing ed il riciclo di alta qualità. Ciò consentirebbe, tra l'altro, di rafforzare chiarezza e credibilità della marcatura CE.
Il Parlamento Europeo ha quindi richiesto alla Commissione di creare un NLF per i prodotti che sia moderno, digitale, sostenibile, più semplice per le imprese, più sicuro per i consumatori e più efficace. La revisione sta procedendo rapidamente e sono attesi sviluppi entro giugno 2026 con riferimento alla tracciatura digitale tramite il DPP e alla sostenibilità, ma anche agli standard e all'accreditamento che uno studio commissionato dalla Commissione Europea nell'ambito della concomitante valutazione di un'eventuale revisione della PED e della direttiva 2014/29/UE sui recipienti semplici a pressione (SPVD) ha evidenziato come criticità insieme al gold plating, all'assenza di un database di incidenti, e ad una forte richiesta di linee guida.
In parallelo alla revisione del NLF, è già stata avviata la revisione della sorveglianza sul mercato e della normativa armonizzata alle direttive di prodotto in situazioni di crisi, con la direttiva (UE) 2024/2749.
Nel complesso, dunque, il settore dei prodotti industriali sta subendo una profonda evoluzione che non può essere ignorata dagli attori che operano in tale ambito e l'eventuale revisione normativa che ne scaturisce per le attrezzature e gli insiemi a pressione dovrà necessariamente essere coordinata con quella del NFL cui la PED afferisce, pur con le sue specificità. Comprendere tale evoluzione al fine di coglierne rischi ed opportunità, risulta fondamentale per tutte le parti interessate.
Il presente lavoro, pertanto si pone l'obiettivo di analizzare l'evoluzione normativa attraverso cinque assi trasformativi: digitalizzazione, intelligenza artificiale, sostenibilità, innovazione tecnologica e modalità ispettive.

2. Normativa armonizzata e sorveglianza del mercato in caso di crisi emergenziali

La direttiva (UE) 2024/2749 , entrata in vigore il 28 novembre 2024, ma applicabile dal 30 maggio 2026 interviene su diverse direttive del NLF, tra cui la PED, con l'obiettivo di rafforzare il funzionamento del mercato interno in situazioni di emergenza, causate da una "crisi", come definita dal Regolamento UE 2024/2747, cioè un evento eccezionale, inaspettato e improvviso, naturale o provocato dall'uomo, di carattere e portata straordinari, che avviene in seno all'Unione o al di fuori di quest'ultima, che ha o può avere un grave impatto negativo sul funzionamento del mercato interno, e che perturba la libera circolazione di merci, servizi e persone o il funzionamento delle sue catene di approvvigionamento. È piuttosto evidente come la genesi di questa

direttiva sia da ricercare nella scarsa preparazione con cui ci si è trovati a fronteggiare l'emergenza Covid 19, ma anche alla crisi globale che ne è seguita. Le modifiche apportate alla PED riguardano, in particolare, quattro aree chiave:

1) in caso di emergenza nel mercato interno, la Commissione può attivare procedure di valutazione della conformità semplificate o accelerate, al fine di agevolare una rapida disponibilità di prodotti critici, consentendo agli organismi notificati di seguire procedure specifiche definite per l'emergenza;
2) se non sono disponibili o non possono essere utilizzate norme armonizzate adeguate, la Commissione potrà adottare specifiche comuni, obbligatorie per i fabbricanti, per facilitare la rapida immissione sul mercato di attrezzature rilevanti;
3) si introducono meccanismi che consentono, in situazioni di emergenza di stabilire nuove basi per la presunzione di conformità, anche tramite le specifiche comuni definite dalla Commissione (vedi punto precedente), compensando così la mancanza temporanea di norme armonizzate;
4) per garantire che, anche in emergenza, i prodotti continuino a rispettare i requisiti essenziali di sicurezza vengono introdotti strumenti rafforzati di vigilanza del mercato, con procedure coordinate e poteri estesi per le autorità nazionali.

In sintesi, le modifiche alla PED mirano a garantire la continuità dell'approvvigionamento, la rapidità di messa a disposizione delle attrezzature a pressione sul mercato, mantenendo comunque la coerenza regolatoria e un adeguato livello di sicurezza nelle crisi. I fabbricanti dovranno adeguarsi rapidamente alle specifiche comuni emergenziali che potrebbero comportare una sovrapposizione temporanea con norme armonizzate esistenti, mentre gli organismi notificati potrebbero essere gravati da nuovi compiti e da un incremento delle attività di coordinamento loro richieste.

Si evidenzia altresì che il contesto emergenziale, per l'insieme dei fattori sopra indicati, può incidere anche sulle tempistiche dell'intero iter certificativo.

3. Tracciatura digitale di attrezzature / insiemi

Nel quadro della marcatura CE delle attrezzature e degli insiemi a pressione disciplinati dalla Direttiva 2014/68/UE (PED), la gestione strutturata e verificabile delle informazioni relativa alla conformità costituisce un elemento essenziale per la dimostrazione del rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza. In tale contesto, permane in capo al fabbricante la responsabilità primaria di garantire la piena conformità del prodotto immesso sul mercato, nonché l'adeguata documentazione delle relative evidenze.

L'evoluzione tecnologica, in particolare l'ampliamento della disponibilità di strumenti digitali per la gestione e conservazione dei dati, sta progressivamente favorendo l'adozione di sistemi informatizzati per la tracciabilità documentale. Sebbene l'art. 8 della PED non precluda l'utilizzo di supporti digitali, tale innovazione non modifica la natura né l'estensione degli obblighi giuridici del fabbricante. Quest'ultimo è infatti

tenuto a garantire la redazione, la conservazione e l'accessibilità del fascicolo tecnico, la predisposizione della dichiarazione UE di conformità, l'apposizione della marcatura CE e la disponibilità continuativa delle informazioni obbligatorie alle autorità competenti per il periodo previsto, indipendentemente dal formato adottato. Rimane dunque imprescindibile l'adozione di soluzioni tecnologiche robuste, idonee a preservare accuratezza, integrità e coerenza dei dati gestiti [3].

In merito, il 21 maggio 2025 la Commissione Europea ha presentato la proposta COM (2025) 503 [4] di modifica di diverse direttive di prodotto, tra cui la PED. Le modifiche proposte riguardano la forma, gli strumenti ed i processi di fabbricazione e valutazione della conformità. Le principali novità di cui è prevista l'introduzione sono:

- la digitalizzazione di dichiarazioni, documentazione e comunicazioni;
- la possibilità di adottare specifiche comuni come complemento o alternativa alle norme armonizzate, al di là delle crisi emergenziali di cui alla direttiva 2024/2749;
- una maggiore interoperabilità e semplificazione amministrativa per gli operatori economici e gli organismi notificati;
- il rafforzamento della tracciabilità digitale e dell'armonizzazione tra direttive;
- l'integrazione in un ecosistema digitale europeo con minori oneri, specie per le PMI.

Per quanto concerne il ruolo degli organismi notificati, gli strumenti digitali possono costituire un supporto operativo nel quadro delle attività di valutazione della conformità, in particolare per attività quali esame del progetto, audit di sistema qualità, prove di qualifica del personale che esegue giunzioni permanenti e/o CND, prove di prodotto. Tuttavia, sul piano giuridico, tali enti operano esclusivamente nell'ambito del mandato conferito dalla PED e non assolvono alcuna funzione di garanzia rispetto ai sistemi di tracciabilità implementati dal fabbricante [5].

La digitalizzazione può agevolare la continuità e la ricostruzione dello storico tecnico dei prodotti, soprattutto nei casi di modifiche, trasferimenti o cambi di gestione. In questo scenario si colloca anche il DPP, già introdotto nell'ambito del regolamento (UE) 2024/1781 (Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR), il quale mira a favorire la tracciabilità lungo l'intero ciclo di vita. Tale strumento, pur rappresentando un'opportunità significativa, ad esempio di integrazione con tecnologie digitali avanzate con Digital Twins [6] e IoT, comporta anche potenziali rischi, tra cui vulnerabilità informatiche, possibilità di falsificazione e accesso non autorizzato a informazioni sensibili [7].

Il DPP non può sostituire il fascicolo tecnico nel suo complesso, ma può fungere da access point strutturato.

Qualora la tracciatura digitale comporti il trattamento di dati personali, anche indirettamente riferibili a persone fisiche, i relativi sistemi devono essere progettati e gestiti nel rispetto del Regolamento (UE) 2016/679 (GDPR), in particolare per quanto riguarda i principi di minimizzazione dei dati, la sicurezza del trattamento e la protezione dei dati fin dalla progettazione (Privacy by Design), attraverso la focalizzazione sul prodotto piuttosto che sul consumatore, la condivisione di

informazioni utili non necessariamente personali e la differenziazione dei livelli di accesso.
Una concreta applicazione della transizione digitale nel settore è rappresentata dall'associazione di un QR code a ciascuna attrezzatura o insieme. Tale soluzione consente un accesso immediato ai principali documenti di conformità quali dichiarazione di conformità, certificati, dati di targa, istruzioni operative, migliorando l'efficienza della gestione documentale e la fruibilità delle informazioni tecniche [8]. Potrebbe essere applicabile anche un tag NFC (Near Field Communication). Grazie a tali tecnologie al DPP può essere associato l'uso della blockchain per garantire l'immutabilità, la tracciabilità e la trasparenza di dati ed informazioni lungo la filiera.
Con la digitalizzazione dei processi emerge infatti il rischio cyber per la sicurezza delle attrezzature a pressione, da attenzionare implementando, anche in base a quanto sopra riportato, strutture di monitoraggio e protezione dei dati.

4. Uso dell'AI nei sistemi di sicurezza

Il Regolamento (UE) 2024/1689 o AI Act, va a sovrapporsi alle direttive/regolamenti di prodotto, introducendo requisiti specifici per i sistemi di intelligenza artificiale, soprattutto nei prodotti che li incorporano. Gli obblighi dell'AI Act sono supportati dagli standard tecnici elaborati dai Comitati di normazione (standardizzazione) europei CEN, CENELEC ed ETSI, che definiscono linee guida su gestione del rischio, qualità dei dati, trasparenza, tracciabilità e supervisione umana. Per i sistemi AI classificati ad alto rischio, l'AI Act prevede una valutazione di conformità, che include documentazione tecnica, governance dei dati, gestione del rischio e robustezza del modello. Un sistema di IA è considerato ad alto rischio se sono soddisfatte entrambe le condizioni di seguito indicate:

a) è destinato da essere utilizzato come componente di sicurezza di un prodotto, oppure costituisce esso stesso un prodotto, soggetto a normativa UE di armonizzazione indicata nell'Allegato I, inclusa la PED;
b) Il prodotto (o il sistema stesso) è soggetto a valutazione di conformità da parte di terzi prima dell'immissione sul mercato o della messa in servizio.

Un sistema di sicurezza che utilizzi l'AI per un'attrezzatura o insieme a pressione, soddisfa entrambe le condizioni. La scheda tecnica del prodotto in tal caso dovrà includere la parte relativa all'AI e la relativa valutazione di conformità diventerà parte integrante del fascicolo tecnico. La valutazione dovrà includere anche la verifica dei requisiti dell'AI Act ed è evidente come l'AI non possa in alcun caso ridurre il livello di sicurezza definito dai RES, anche se ottimizza il processo. Ciò implica riflessioni sulla presenza di organismi notificati specializzati e sulla possibilità di estendere le notifiche degli organismi già esistenti. [9-13].
Ad oggi non esistono ancora standard tecnici specifici che spieghino come certificare un sistema AI, ma la norma UNI CEI ISO/IEC 42001 [14], specifica i requisiti e fornisce una guida per la creazione, l'implementazione, la manutenzione e il miglioramento continuo di un sistema di gestione dell'AI nel contesto di un'organizzazione e,

sebbene non sia armonizzata al Regolamento AI Act, è l'unico strumento certificabile al momento da parte di Organismi di Certificazione di Sistemi di Gestione accreditati a fronte della norma UNI CEI EN ISO/IEC 17021-1 [15, 16].
La norma 61511-1 può offrire un valido supporto per la sicurezza funzionale nei sistemi di controllo di processo e viene utilizzata per garantire che i sistemi di sicurezza strumentati (SIS) siano progettati, implementati e mantenuti in modo da ridurre al minimo i rischi di guasti pericolosi. La norma stabilisce un approccio basato sulla gestione del rischio, che include la determinazione del Safety Integrity Level (SIL), il ciclo di vita del sistema, e i requisiti di manutenzione, ma non sempre si adatta a scenari specifici, richiede molte risorse e non è pienamente al passo con nuove minacce, come la cybersecurity [18].
L'AI può inoltre essere impiegata nella conduzione e nel monitoraggio delle attrezzature con implicazioni significative in termini di affidabilità e controllo dei sistemi, ad esempio consente di analizzare i dati di produzione in tempo reale, garantendo che le attrezzature rispettino gli standard di riferimento adottati [19].
Altra applicazione dell'AI può essere nella valutazione delle proprietà dei materiali in differenti condizioni al fine di guidare alla scelta migliore in termini di massime prestazioni, minimo scarto e durabilità, supportando la progettazione anche nel perseguimento degli obiettivi di sostenibilità. Un esempio dei potenziali vantaggi e svantaggi nell'uso dell'AI per il monitoraggio strutturale di attrezzature a pressione (Structural Health Monitoring o SHM) riportati da Fazle et al., 2023 [20] è rappresentato in figura 1.

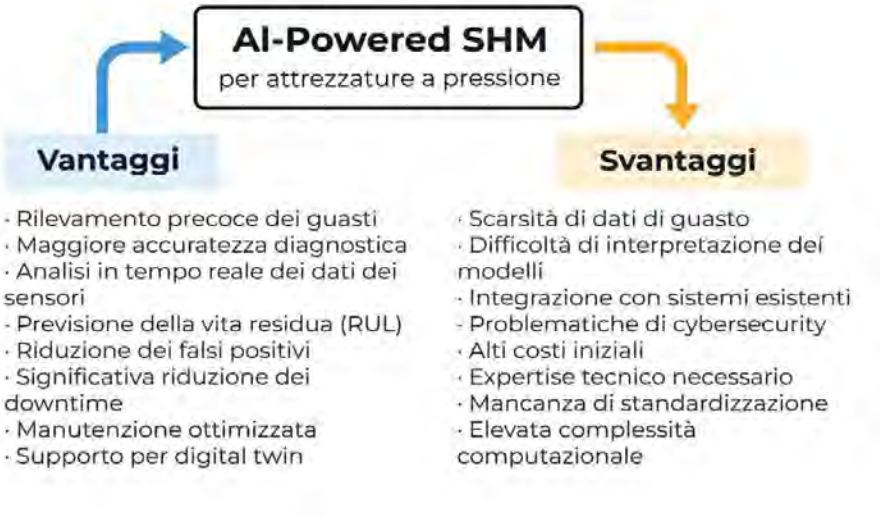


Figura 1. Potenziali vantaggi e svantaggi nell'uso dell'AI per il monitoraggio strutturale

L'implementazione di logiche di controllo AI dei parametri di esercizio potrebbe introdurre potenziali comportamenti imprevedibili e/o instabili non precedentemente analizzati nell'analisi dei rischi da parte del fabbricante. Il sistema deve costantemente ottimizzare il processo per il quale l'attrezzatura è stata

progettata in termini di rendimento (es. scambio termico, reazione catalitica, distillazione, ecc), rispettando e garantendo le specifiche di progetto in termini di condizioni di sicurezza.
Inoltre, deve essere mantenuto e garantito il controllo in modalità manuale nei casi in cui l'automazione possa proporre azioni potenzialmente rischiose, ovvero che possano comportare scenari di rischio come sovrapressioni o temperature eccessive. Questo implica che, in qualsiasi momento, un operatore o un altro sistema di monitoraggio "classico" dovrebbe essere in grado di intervenire. Per assicurare queste condizioni gli algoritmi AI dovrebbero essere trasparenti e comprensibili, per garantire che gli operatori possano seguire e comprendere le decisioni prese dal sistema.
Un altro punto fondamentale è la validazione e verifica dei modelli AI. Questi modelli tendono a migliorare continuamente ottimizzando la storicità dei dati memorizzati. È necessario effettuare test e simulazioni preventivi prima di rendere operativi gli aggiornamenti. Il continuo rispetto dei RES è sempre e comunque un obbligo del fabbricante e non può essere alterato e/o modificato senza le dovute analisi ed approvazioni. Un ulteriore aspetto importante è l'interfaccia e la connessione alla rete internet dell'attrezzatura/insieme che introduce aspetti di sicurezza e protezione dei dati. L'uso di tecnologie di crittografia ed autenticazione è fondamentale per prevenire le potenziali condizioni di vulnerabilità e manipolazione [21].

5. Sostenibilità ed economia circolare: durabilità e riparazione/modifica

La revisione della NLF prevede il coordinamento con altre iniziative europee già orientate alla sostenibilità, come il Regolamento ESPR, contesto in cui si inserisce anche il DPP, il diritto alla riparazione e le norme sulla gestione dei rifiuti. L'obiettivo è favorire prodotti progettati per durare più a lungo, essere riparabili e ridurre l'impatto ambientale lungo tutto il ciclo di vita. In questo contesto rientra anche la riflessione sulla responsabilità estesa del produttore, ai fini della quale l'UE valuta la possibilità di introdurre un quadro armonizzato che includa incentivi economici, come voucher per la riparazione, e che riduca duplicazioni tra normative settoriali ed ambientali.
Un altro elemento centrale è la durabilità dei prodotti: il Parlamento chiede che i produttori garantiscano la disponibilità di pezzi di ricambio e servizi di assistenza per periodi adeguati, per prevenire l'obsolescenza precoce e favorire modelli di consumo più sostenibili. A ciò si collega la richiesta di norme uniformi su riciclo e corretto smaltimento, ad esempio misure come sistemi di raccolta e sostegno alle attività di ricondizionamento.
Parte importante è rappresentata dal ruolo degli operatori dell'economia circolare: venditori di seconda mano, ricondizionatori e riparatori. L'assenza di definizioni armonizzate crea incertezza e può comportare classificazioni errate e sanzioni ingiustificate. Occorrono quindi categorie chiare e proporzionate, in linea con l'ESPR, per sostenere la crescita del settore. Si evidenzia inoltre l'esigenza di garantire un

accesso selettivo alle informazioni tecniche, indispensabile per effettuare riparazioni e ricondizionamenti sicuri, tutelando al contempo i dati sensibili delle aziende. Il Parlamento Europeo propone anche l'introduzione di certificazioni europee per ricondizionatori e riparatori, utili a rafforzare la fiducia dei consumatori, e di procedure armonizzate per determinare quando un intervento costituisce una "modifica sostanziale" di un prodotto.
Infine, viene riconosciuto il grande potenziale economico del recommerce, che può offrire alternative sostenibili ai modelli di consumo tradizionali.
La PED attualmente è pensata per il "nuovo" e non contempla gli stati intermedi del prodotto previsti dal modello di economia circolare, che si prospettano difficili da regolamentare. Il nuovo approccio può comportare la modifica o il riutilizzo di componenti già marcati CE, oppure il loro impiego in nuovi insiemi. Per quanto riguarda il concetto di modifica "sostanziale", cioè impattante sulla conformità alla direttiva e dunque soggetta a nuova certificazione, attualmente si fa riferimento ai criteri della Guida Blu [22] la quale stabilisce che un prodotto modificato dopo la messa in servizio si debba considerare alla stregua di un prodotto nuovo, ma con una valutazione specifica, caso per caso, se:

- le prestazioni, la finalità o il tipo originari del prodotto sono modificati senza che ciò sia previsto nella valutazione del rischio iniziale; al livello pratico è ormai consolidato che tali previsioni debbano essere incluse nelle istruzioni operative fornite dal fabbricante insieme alla dichiarazione di conformità, in tal caso si ricade nella riparazione;
- la natura del pericolo è cambiata o il livello di rischio è aumentato;
- il prodotto è reso disponibile.

Da tenere presente la possibilità che le modifiche potrebbero essere introdotte mediante mezzi non soltanto fisici, ma anche digitali, ad esempio nel caso di aggiornamento di un software di regolazione e controllo.
Pur offrendo un'opportunità per ridurre l'impatto ambientale e valorizzare le risorse, il nuovo approccio amplifica ed estende le sfide che la modifica di un'attrezzatura o insieme a pressione già oggi pone in alcuni casi, per la verifica della conformità, al fine di:

- stabilire se un prodotto modificato rientri ancora nei requisiti della PED;
- documentare correttamente le modifiche o il riciclaggio;
- garantire che la sicurezza e le prestazioni originarie siano mantenute.

6. Transizione energetica e tecniche innovative di produzione / nuovi materiali

La transizione verso energie più pulite sta aumentando la domanda di recipienti a pressione e serbatoi per idrogeno, gas naturale liquefatto (GNL) e anidride carbonica (sistemi di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio). Si tratta di applicazioni che richiedono materiali avanzati e design innovativi per gestire alte pressioni e basse temperature. Tecnologie come materiali compositi, sistemi IoT e progetti modulari

stanno rivoluzionando il settore. Le crescenti richieste di tutela dell'ambiente rendono l'adeguamento essenziale e l'innovazione obbligatoria, per cogliere le grandi opportunità che si presentano in un mercato in continuo divenire. Gli istituti di ricerca e le società private, impegnate nello sviluppo tecnologico della filiera dell'idrogeno, facendo affidamento sugli ingenti finanziamenti comunitari messi a disposizione per la ricerca, pubblicano e rendono disponibili importanti aggiornamenti tecnologici, sia a livello di compatibilità dei materiali che della suscettibilità a degradarsi in presenza di idrogeno. Le direttive comunitarie di prodotto, come la PED, devono poter contare sulla disponibilità di norme armonizzate aggiornate allo stato dell'arte, che consentano la progettazione e fabbricazione di attrezzature e insiemi sicuri, performanti e tecnologicamente avanzati.
Dal punto di vista delle procedure di valutazione della conformità, infatti, l'utilizzo e la sperimentazione di nuovi materiali o processi produttivi sempre più performanti rende più complesso il processo. In particolare, l'assenza o la limitata disponibilità di norme armonizzate dedicate può richiedere un maggiore tempo per valutazioni tecniche dedicate e la necessità di eseguire prove sperimentali mirate.
Per questo, già nel 2023, l'European Clean Hydrogen Alliance (ECH2A) pubblicò la «Roadmap on Hydrogen Standardization» [23]; ECH2A riunisce i rappresentanti dell'industria, delle autorità pubbliche e della società civile nonché importanti stakeholders con l'obiettivo di supportare lo sviluppo in larga scala della tecnologia della produzione, stoccaggio e distribuzione e utilizzo dell'idrogeno entro il 2030. ECH2A ha individuato come primo obiettivo la necessità di sviluppare una rete di norme efficaci e armonizzate.
La roadmap persegue i seguenti obiettivi:
- sviluppare un'analisi sullo stato dell'arte nel settore dell'attività normativa legata all'idrogeno;
- stabilire un chiaro riesame critico dei settori carenti e di quelli in cui la normativa risulta di primaria importanza per l'intera catena produttiva;
- incrementare lo scambio di informazioni e sviluppare la consapevolezza, nelle attuali e future attività normative;
- snellire le proposte di standardizzazione derivanti dalle diverse iniziative;
- pianificare gli argomenti in una sequenza temporale.

Il CEN e, nello specifico, i Comitati Tecnici TC54 Working Group WG54 (progettazione e fabbricazione di recipienti a pressione non esposti a fiamma) e TC 267 WG1 (tubazioni e condotte industriali – generale), vennero conseguentemente incaricati dello sviluppo dei seguenti argomenti:
1) la compatibilità dei materiali per la fabbricazione di recipienti a pressione contenenti idrogeno, inclusi i criteri specifici per la selezione del materiale al fine di evitare gli effetti avversi correlati alla presenza di idrogeno (per es. infragilimento da idrogeno),

2) la progettazione e calcolo delle sollecitazioni nei recipienti a pressione contenenti idrogeno puro o miscela di gas naturale, nell'ambito delle norme armonizzate della serie EN 13445 (recipienti) e della serie EN 13480 (tubazioni)".

Sui suddetti punti, i WG 54 e 1 hanno proceduto con impegno e rapidità, sviluppando due progetti di norma che recentemente sono stati confermati con l'attivazione dei Preliminary Work Item (l'adozione di un PWI è necessaria per lo sviluppo di una norma armonizzata nuova o aggiornata): prEN 13445-15 "Unfired pressure vessels - Part 15: Additional requirements for hydrogen application" e prEN 13480-15 "Metallic industrial piping - Part 15: Additional requirements for hydrogen application". Il passo successivo è quello di sottoporre i progetti al consulente HAS (HArmonised Standards) che effettuerà le sue valutazioni verificando che i criteri comuni per la Commissione Europea/HAS e l'organismo di normazione siano debitamente considerati, prima di inviare la bozza di norma armonizzata al CEN/Cenelec Management Center per il controllo di qualità, la richiesta di valutazione, l'inchiesta pubblica (ENQ) e il voto formale FV.
Nel lasso temporale richiesto per la conclusione di questo iter articolato e delicato, si impone la necessità di mantenere l'attenzione su eventuali proposte di specifiche comuni mirate a tamponare la carenza normativa in un settore ormai strategico.

7. Ispezioni / controlli da remoto

Le ispezioni da remoto possono rappresentare un utile supporto alle attività di verifica della conformità, soprattutto in combinazione con le modalità tradizionali. Il loro impiego deve però essere valutato caso per caso, tenendo conto della complessità dell'attrezzatura. Attualmente l'Organismo di Accreditamento nazionale, per l'ambito regolamentato, prevede la possibilità di effettuare ispezioni da remoto soltanto in caso di gravi e fondati motivi riconducibili essenzialmente a situazioni emergenziali [24].
Il forum europeo degli organismi notificati (CABF PED/SPV) ha elaborato un documento contenente i principi guida per l'utilizzo delle ispezioni da remoto, recentemente inviato alla Commissione europea per un contributo alla revisione del NLF [25]. Ovviamente, affinché possano essere superate le limitazioni attualmente poste da Accredia, sarà necessario il recepimento nell'ambito del NLF e delle specifiche direttive ad essa afferenti, dei principi proposti dal CABF, di seguito illustrati.
Le uniche condizioni in cui ad un organismo di valutazione della conformità dovrebbe essere consentito effettuare ispezioni da remoto sono le seguenti:

- dopo una visita preliminare in presenza da parte del CAB;
- per valutazioni, successive alla prima, di un nuovo cliente;
- in caso di condizioni che impediscono la presenza fisica;
- se i risultati possono essere equivalenti ad un'ispezione in loco.

L'organismo dovrebbe valutare in via preliminare:

- le condizioni del sito, la complessità e l'accessibilità dell'attrezzatura;

- le tecniche di giunzione ed i CND;
- l'idoneità delle tecnologie e delle attrezzature;
- la sicurezza delle informazioni e la protezione dei dati.

L'organismo dovrebbe documentare: analisi dei rischi, attrezzature, procedure e motivazioni. Per quanto riguarda le procedure di valutazione della conformità:

- gli audit in caso di moduli qualità sarebbero ammessi da remoto, ma il primo audit dovrebbe essere in presenza e anche la ricertificazione prevederebbe una visita in loco;
- la sorveglianza (moduli A2 e C2) sarebbe possibile da remoto;
- alcune parti della verifica finale per gli altri moduli potrebbero essere remote, ma sarebbe sempre richiesto un controllo fisico dell'attrezzatura/insieme.

I requisiti tecnici principali, da tenere costantemente sotto controllo da parte dell'ispettore che dovrebbe essere presente da remoto per tutta la durata dell'ispezione e guidare l'operatore [25], sono riassunti in tabella 1.

Categoria	**Requisiti minimi suggeriti**
Qualità video	Visione ravvicinata fino ad almeno 0,8 mm; ≥20 fps; buona risoluzione delle sfumature di grigio; contrasto cromatico adeguato
Prospettive della telecamera	Vista d'insieme continua; vista ravvicinata; alimentazione adeguata (spesso due telecamere)
Caratteristiche della telecamera	Risoluzione 2K o superiore; immagini fisse 12 MP
Illuminazione	≥1000 lux; luce bianca neutra; Illuminazione diffusa + spot manuali
Qualità audio	Mani libere; bassa latenza; basso rumore di fondo
Trasmissione dati	Banda >10 Mbps; connessione stabile
Attrezzatura lato remoto	Schermo 1920×1080+; software registrazione; dispositivo audio
Operatore in loco	Operatore istruito; guidato dall'ispettore da remoto

Tabella 1. Requisiti tecnici per le ispezioni da remoto condivisi in ambito CABF PED/SPV

Inoltre, per gli audit da remoto:

- i documenti dovrebbero essere disponibili prima dell'audit;
- tutti i presenti dovrebbero essere visibili via webcam;
- per eventuali visite in officina i requisiti sarebbero gli stessi dell'ispezione da remoto.

Si tratta di condizioni in massima parte di efficacia già sperimentata durante l'emergenza Covid-19, con l'aggiunta di un target visivo per la "buona resa dei dettagli" [26], che non hanno evidenziato particolari criticità.

8. Conclusioni

L'analisi congiunta dei temi affrontati evidenzia come l'evoluzione del quadro normativo europeo riconducibile ai profondi mutamenti tecnologici, ma anche socioeconomici, e alla crescente centralità della sostenibilità, stia ridefinendo in modo sostanziale l'intero ecosistema della valutazione di conformità delle attrezzature e degli insiemi a pressione. La digitalizzazione, le nuove forme di tracciabilità dei prodotti, l'integrazione di sistemi di AI, l'avanzamento dei materiali e delle tecniche produttive nonché la transizione energetica si introducono in una catena del valore già di per sé articolata in ragione della molteplicità di attori coinvolti, della distribuzione geografica in paesi con normative e pratiche operative differenti, dell'interdipendenza dei processi di fabbricazione ed immissione sul mercato dei vari componenti. Al contempo tali elementi innovativi introducono opportunità significative in termini di efficienza, qualità e sicurezza, ma di contro generano complessità inedite che possono essere affrontate soltanto con la revisione metodologica e procedurale degli strumenti regolatori attualmente in corso.

Si impone, in merito, la necessità di una costante attenzione nell'evitare pericolose sovrapposizioni tra questi stessi strumenti regolatori, al fine di integrare il quadro di riferimento per le attrezzature e gli insiemi a pressione in modo chiaro, affidabile e adeguato al contesto emergente.

In questo nuovo paradigma operativo che si va delineando, fabbricanti, organismi notificati e autorità competenti sono chiamati a reinterpretare ruoli e responsabilità evolvendo verso competenze multidisciplinari integrate in chiave digitale e predittiva.

Concludendo è possibile affermare che l'interazione tra digitalizzazione, intelligenza artificiale, sostenibilità ed evoluzione dei materiali impone, in un futuro molto prossimo, un passaggio ad una valutazione di conformità evoluta, "smart" ed orientata all'intero ciclo di vita del prodotto ("green").

Bibliografia

[1] European Commission Staff Working Document – Executive Summary of the evaluation of the New Legislative Framework SWD (2022) 364 final

[2] Coordination of Conformity Assessment Bodies on Pressure Equipment and Simple Pressure Vessels (CABF PED/SPVD) on Council Directives 2014/68/EU and 2014/29/EU Minutes of the 75th meeting of the CABF PED/SPVD, 01 and 02 July 2025

[3] European Commission. Digital Transformation and Compliance with EU Safety Regulations, 2020

[4] Commissione Europea Proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio che modifica le direttive [...], 2014/68/UE e 2014/90/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda la digitalizzazione e le specifiche comuni, Bruxelles, 21.5.2025, COM(2025) 503 final 2025/0133 (COD), {SWD(2025) 130 final

[5] Aruna J.J., Nisha J.V., Richard Jimreeves J.S., Ravindran K., Dhinakaran D., A traceability set up using Digitalization of Data and Accessibility, 3rd Int. Conf. on Intelli. Sustainable Sys. (ICISS), 2020, 907–910
[6] Monteiro J., Barata J., Gentilini S. A Digital Twin-Based Digital Product Passport, Procedia Computer Science, 2024, 246, 4123-4132
[7] European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). Artificial Intelligence and Occupational Safety and Health: Challenges and Opportunities, 2020
[8] Zhang, Shaqing, et al., "A traceability public service cloud platform incorporating IDcode system and colorful QR code technology for important product", Mathematical Problems in Engineering, 2021(1), 5535535
[9] Commissione Europea – AI Act (quadro regolatorio e risorse ufficiali) — Pagina tematica della Commissione (AI Act, AI Office, AI Pact, Service Desk)
[10] Parlamento Europeo / EPRS – Briefing “Artificial intelligence act” — Sintesi legislativa sul percorso e contenuti dell’AI Act (settembre 2024)
[11] Commissione Europea – AI Act Service Desk: Timeline di implementazione — Scadenze di applicazione e governance previste dal Regolamento.
[12] Commissione Europea. AI and the Future of Safety in the Industrial Sector, 2021
[13] Commissione Europea. Artificial Intelligence in the Process Industry: Ensuring Compliance with Safety Standards, 2022
[14] UNI CEI ISO/IEC 42001:2024 Tecnologie informatiche - Intelligenza artificiale - Sistema di gestione
[15] Accredia, Circolare tecnica DC N° 08/2026 - Disposizioni in merito all’accreditamento UNI CEI EN ISO/IEC 17021-1 degli Organismi di Certificazione a fronte della norma UNI CEI ISO/IEC 42001, Milano, 19-02-2026
[16] UNI CEI ISO/IEC 17021-1: 2015 Valutazione della conformità - Requisiti per gli organismi che forniscono audit e certificazione di sistemi di gestione - Parte 1: Requisiti
[17] CEI EN 61511-1 (2017-10 + A1:2018-03) Classificazione CEI: 65-90 Sicurezza funzionale - Sistemi strumentati di sicurezza per il settore dell'industria di processo Parte 1: Struttura, definizioni, sistema, prescrizioni per l'hardware e il software
[18] Onyeke F.O., Odujobi O., Adikwu F.E., Elete T.Y. Innovative approaches to enhancing functional safety in Distributed Control Systems (DCS) and Safety Instrumented Systems (SIS) for oil and gas applications, OARJMS, 2022, 03(01), 106-112
[19] Fazle, A.B., Prodhan, R.K., Islam, M.M. AI-powered predictive failure analysis in pressure vessels using real-time sensor fusion: Enhancing industrial safety and infrastructure reliability American Journal of Scholarly Research and Innovation, 2023, 2(2), 102–134.
[20] Chuka A.A., Izionworu V.O., Daniel I., Cosmas D.D., Adedayo A. Integrating artificial intelligence into engineering processes for improved efficiency and

safety in oil and gas operations, Research Journal of Engineering and Technology, 2024, 06(01), 039–051
[21] Rashed, M., Ajay M. Safety Studies Using Artificial Intelligence. Proceedings Volume, ADIPEC, Abu Dhabi, United Arab Emirates, November 3–6, 2025, SPE-230047-MS
[22] Commissione Europea. La guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2022 (2022/C 247/01) Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 29.6.2022
[23] European Clean Hydrogen Alliance, Roadmap on Hydrogen Standardisation, March 2023
[24] Accredia, Dipartimento Certificazione e Ispezione, Circolare tecnica DC N° 23/2022 del 6/07/2022 - Aggiornamento della Circolare Tecnica DC N. 09/2022 del 31/03/2022 - Nuove disposizioni a seguito del termine di emergenza sanitaria da Coronavirus
[25] Coordination of Conformity Assessment Bodies on Pressure Equipment and Simple Pressure Vessels (CABF PED/SPVD) on Council Directives 2014/68/EU and 2014/29/EU N.25/038 (clean version of N 23/023 rev4) Recommendations for the application of remote techniques in the conformity assessment according to PED/SPVD – 02072025
[26] Bemporad E., Delle Site C., Pichini E., Tonti A., Monica L., Augugliaro G., Balistreri R. Galasso V., Giacobbe F. Procedura sperimentale per l’esecuzione da remoto di verifiche su attrezzature a pressione, nota INAIL.72000.06/04/2020.0004707

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

A. F. Magrì[1], D. Gadenz[2]

[1] LRQA Italy s.r.l.
[2] Sant'Ambrogio Servizi Industriali s.r.l.

Sommario
Il calcolo di piastre tubiere di apparecchi a pressione è stato condotto per decenni mediante l'uso dei metodi studiati da K.A. Gardner dalla fine degli anni 40 agli inizi degli anni 60 e confluiti prima nelle procedure di calcolo contenute nelle norme TEMA e poi nelle più moderne versioni ASME VIII ed EN13445-3 Clause 13.
La normativa Europea contiene anche un metodo di calcolo alternativo, contenuto nell' Annex J, che permette di ottenere enormi vantaggi in termini di spessori delle piastre nel caso di scambiatori di calore a piastre fisse.
Scopo del presente lavoro è quello di indagare i vantaggi connessi con l'uso di questo metodo per gli scambiatori che generano vapore nel lato mantello recuperando il calore del fluido circolante nel lato tubi, normalmente costituito da un gas molto caldo in pressione.
Questo tipo di piastre tubiere veniva calcolato in passato con metodologie semplificate simili a quelle utilizzate per le piastre delle caldaie a tubi di fumo (in particolare le norme Italiane VSR contenevano una procedura di calcolo per questo tipo di scambiatori), mentre oggi si ricorre molto spesso all'uso delle moderne procedure di Design by Analysis (sia di tipo lineare che non lineare) che comportano però costi e tempi di ingegneria più elevati.
Dopo una presentazione dei presupposti teorici su cui si basa il metodo dell' Annex J, si considereranno degli esempi di scambiatori-generatori di vapore a piastre sottili calcolati con tale metodo e si confronteranno i risultati con quelli ottenibili mediante DBA.

1. Introduzione

Una tipologia particolare di scambiatori a piastre fisse è costituita da alcuni apparecchi usati nel settore petrolchimico (per esempio *Process Gas Boilers* di impianti di *Steam Reforming*, *Transfer Line Exchangers* di impianti di *Cracking* dell'Etilene) in cui viene sfruttato un fluido estremamente caldo proveniente dal processo per generare vapore.
Il fluido caldo circola nel lato tubi, mentre la produzione di vapore avviene nel lato mantello che è collegato ad un corpo cilindrico mediante tubazioni di caduta e risalita.

Queste attrezzature sono caratterizzate da basse dilatazioni termiche differenziali fra tubi e mantello; infatti, il coefficiente di adduzione all'esterno dei tubi, in cui è presente acqua in transizione di fase, è di molto superiore a quello all'interno e la temperatura media di parete dei tubi è quindi più vicina a quella dell'acqua bollente che non a quella del gas e di conseguenza simile a quella del mantello.
Per le piastre tubiere la questione è leggermente più complicata, in quanto nella zona forata la piastra è attraversata dai gas per tutto il suo spessore e pertanto la temperatura media di parete della piastra sarà tanto maggiore quanto maggiore è il suo spessore (maggiore superficie a contatto con il fluido caldo): questi apparecchi hanno pertanto la necessità di avere piastre tubiere sottili e sono del tutto analoghi a caldaie a tubi di fumo, con l'unica differenza di essere soggetti a pressione anche nel lato tubi.
Il metodo di calcolo impiegato dal codice di costruzione ASME VIII e sostanzialmente ripreso dal metodo di calcolo "standard" del codice Europeo EN13445 contenuto nella Clause 13 non si adatta a queste configurazioni e richiederebbe spessori delle piastre troppo elevati, portando ad un aumento della temperatura media di parete e diminuzione delle sollecitazioni ammissibili con il risultato di non permettere di trovare una soluzione al problema.
Il metodo di calcolo alternativo proposto da EN13445-3 nell'Annex J permette invece, per motivi che spiegheremo meglio nei prossimi paragrafi, di ottenere spessori molto inferiori.

2. Il metodo di calcolo dell'Annex J

In generale uno scambiatore a piastre fisse è una configurazione di attrezzatura che dal punto di vista meccanico presenta un'iperstaticità dovuta al collegamento dei tubi sia alle piastre che al fasciame. Con le normali procedure di calcolo, basate in sostanza su analisi lineari elastiche, si ricavano le sollecitazioni in varie parti dei componenti (piastra, tubi, giunto tubo-piastra, fasciame e distributore) e le si confronta con i limiti derivanti dalla categorizzazione delle sollecitazioni, sia nelle condizioni di progetto in cui sono presenti solo carichi dovuti alla pressione, che in quelli operativi in cui si considerano anche le sollecitazioni di origine termica dovute alle dilatazioni impedite fra tubo e mantello.
A questo proposito va però osservato che l'attribuzione della corretta categoria delle sollecitazioni sarebbe tutt'altro che banale, infatti, mentre è abbastanza ovvio che le sollecitazioni di origine termica danno origine a sollecitazioni di natura secondaria, dovute quindi ad un problema di congruenza di deformazioni, non è a priori scontato definire quali siano effettivamente le sollecitazioni di origine primaria, cioè quelle dovute ad un effettivo problema di equilibrio di carichi agenti.
Da un punto di vista teorico, infatti, anche i momenti flettenti indotti dalla pressione generano delle sollecitazioni che sembrano ragionevolmente più dovute ad un problema di congruenza delle deformazioni che non alla necessità di equilibrare dei carichi, in quanto se il fascio tubiero è in grado di sopportare il carico di trazione (o di

compressione) dovuto alla pressione, anche ammettendo di arrivare ad una totale plasticizzazione della zona periferica delle piastre (dove i momenti flettenti risultano più elevati se le piastre sono sottili) si avrebbe una situazione di equilibrio dei carichi agenti. In altre parole, le vere sollecitazioni primarie agenti sono quelle dei tubi, mentre le altre sollecitazioni che si generano nelle piastre per effetto dell'iperstaticità di cui sopra sarebbero da considerarsi delle secondarie.
La progettazione delle piastre potrebbe essere condotta con concetti analoghi a quelli da sempre utilizzati per le caldaie a tubi di fumo, ovvero verificando la flessione della zona più estesa della piastra libera da tubi, lasciando a questi ultimi il compito di reggere il carico della pressione.
Il metodo Europeo contenuto nell'Annex J sostituisce il tradizionale calcolo delle sollecitazioni ammissibili con un calcolo basato sull'analisi limite e trae origine, per gli scambiatori a piastre fisse, da presupposti simili a quelli appena spiegati, ma con una trattazione più rigorosa. Possiamo così riassumere i punti principali del metodo:

- la verifica al collasso plastico è condotta mediante utilizzo di *load ratios* considerando i soli carichi da pressione
- non viene eseguita alcuna verifica per la plasticizzazione alternata, cade cioè il limite dello *shakedown*, tradizionalmente utilizzato dai codici di costruzione come limite alle sollecitazioni secondarie (che possono portare a rottura solo nel caso di cicli di carico e scarico ripetuti)
- i carichi da sollecitazioni termiche sono considerati solo per una verifica a fatica.

Il modello di calcolo considera una geometria del fascio tubiero sostanzialmente assialsimmetrica; sono permesse delle necessarie deviazioni dovute alla reale tracciatura della piastra che devono soddisfare dei limiti imposti dalla normativa. Le piastre vengono calcolate come lastre piane di spessore costante e_P, sostanzialmente divise fra una zona forata e una zona esterna alla foratura: il confine fra queste due zone è approssimato da una circonferenza avente un diametro d_1 "realisticamente" mediato per tener conto della non perfetta omogeneità della tracciatura. La posizione di questa circonferenza, cioè il valore di d_1, potrebbe essere non univocamente definito: tanto più la zona forata si allontana dalla forma circolare, tanto più sarà necessario eseguire più calcoli con diametri equivalenti diversi, considerando in ultima analisi quello che fornisce la situazione peggiore (maggiore load ratio).
Il metodo permette di considerare i seguenti carichi:

- pressione lato tubi (P_T) e lato mantello (P_S), interne od esterne
- momenti alla periferia delle piastre
- peso nel caso di scambiatori verticali
- espansione termica assiale (per la verifica a fatica).

I momenti flettenti agenti in periferia, che vengono poi trasformati in pressioni equivalenti, sono quelli dovuti all'eventuale carico dei bulloni (M_A) – per configurazioni di piastre bullonate al fasciame e/o al distributore, al carico da

pressione sul bordo della piastra qualora i diametri lato mantello e lato distributore siano diversi (M_B) e il momento di reazione dovuto alle connessioni (saldate o flangiate) con fasciame e distributore (M_C).
A questi si aggiunge il calcolo di un momento limite (M_D) che coincide con il raggiungimento di una cerniera plastica nella zona più esterna della piastra tubiera e che "taglia" i contributi degli altri tre momenti: come introdotto prima, infatti, al raggiungimento di tale cerniera plastica, il carico da pressione si sposterebbe interamente sui tubi e non si avrebbe più alcuna trasmissione dei momenti flettenti sulla parte interna della piastra tubiera.
In ultima analisi ci teniamo a precisare che il calcolo, per quanto riguarda gli scambiatori a piastre fisse senza giunto di dilatazione, permette di considerare un qualunque valore, compreso fra due valori limite, della pressione effettiva agente sulle piastre (P_R), ottimizzando la progettazione per raggiungere i minori load ratios. I valori limite dipendono, fra le altre cose, dai carichi massimi sopportabili dal fasciame e dal fascio tubiero sia in trazione che in compressione.
Per quanto riguarda i carichi termici, se le dilatazioni differenziali rispettano un criterio di screening fornito dalla norma, nessuna analisi è richiesta. Altrimenti sono disponibili due metodi, uno semplificato e uno dettagliato, per considerare gli effetti della variazione dei carichi termici e della pressione nelle due camere ai fini della vita a fatica dell'attrezzatura.

3. Analisi non lineari secondo il metodo della "Direct Route"

Trattando un metodo di calcolo basato sull'analisi limite, si è deciso per questo lavoro di utilizzare come metodo di analisi di confronto quello della "Direct Route", contenuto nell'Annex B di EN13445-3, basato su analisi elasto-plastiche. Le verifiche proposte dal metodo ci sembrano le più paragonabili in termini di tipo di output al calcolo eseguito con Annex J, rispetto alle tradizionali analisi lineari elastiche basate su categorizzazione delle sollecitazioni (Annex C).
Il metodo si basa su un comportamento del materiale elastico perfettamente plastico e richiede di eseguire una serie di verifiche - *Design Checks* nella terminologia del Codice – per i diversi meccanismi di collasso.
I due meccanismi che ci interessano per la verifica delle piastre tubiere (e che sono sempre obbligatori per il metodo) sono:

- Gross Plastic Deformation Design Check (GPD-DC)
- Progressive Plastic Deformation Design Check (PD-DC)

Il primo consiste nella verifica al collasso plastico, condotta considerando dei *partial safety factor*, che in sostanza separano il tradizionale coefficiente di sicurezza in due termini, applicati rispettivamente come incremento all'azione di progetto e come diminuzione della "caratteristica" RM del materiale (limite elastico). Le azioni sono classificate in base alla loro natura come permanenti o variabili e a questa categorizzazione corrisponde un partial safety factor γ_G. Ai materiali viene invece associato un partial safety factor γ_R.

Il Codice chiede, oltre alla verifica di convergenza propria di un'analisi limite, anche la verifica di un limite alla deformazione massima in ogni punto, pari al 5% in condizioni operative e al 7% in condizioni di prova.
Questo design check coincide, da un punto di vista teorico, alla verifica dei load ratios dell'Annex J.
Il check per le Progressive Plastic Deformation è invece una verifica nei confronti della plasticizzazione alternata e sostituisce la verifica a *ratcheting* di un'analisi lineare elastica per le sollecitazioni secondarie. Il metodo fornisce quattro diverse possibili verifiche (*Application Rules*). Per quanto visto, l'Annex J non considera una verifica per la plasticizzazione alternata dovuta ai carichi operativi (meccanici e termici), ma la sostituisce con una verifica a fatica; pertanto, il confronto nel nostro caso sarà fra la verifica a fatica Annex J e questo design check.

4. Casi studio considerati

Si è deciso di considerare due diversi scambiatori a piastre sottili, le cui principali caratteristiche geometriche e i dati di progetto sono riportati nelle Tabelle 1 e 2.
Le temperature dei vari componenti sono state calcolate con analisi termiche semplificate "by formula".
In particolare:

- la temperatura del fasciame è univocamente legata alla pressione, dato che il lato mantello contiene acqua bollente; le temperature di progetto e operative saranno pertanto pari alle temperature di saturazione dell'acqua rispettivamente alla pressione di progetto e alla pressione operativa;
- la temperatura dei tubi è considerata pari alla temperatura di saturazione dell'acqua aumentata di 25°C, come da prescrizioni della norma sulle caldaie a tubi di fumo EN12953-3;
- la temperatura di calcolo della piastra tubiera è calcolata con il metodo rigoroso fornito dalla EN12953-3 in Annex C in funzione delle temperature del gas caldo, dell'acqua e dei coefficienti di scambio termico nelle varie zone;
- le temperature dei distributori sono state ottenute con semplici relazioni sullo scambio termico di cilindri e coni concentrici (data la presenza di materiale refrattario all'interno dei distributori di entrata); non vengono riportate in tabella in quanto hanno scarsa influenza sui risultati.

Tipologia di scambiatore	Transfer Line Exchanger (TLE)	Waste Heat Boiler (WHB)
Installazione	Verticale	Orizzontale
Configurazione distributori	Conici flangiati	Cilindrici integrali
Pressione di progetto lato mantello [bar]	110 / -1	47 / -1
Pressione di progetto lato tubi [bar]	5 / 0	30 / 0

Pressione operativa lato mantello [bar]	100	42
Pressione operativa lato tubi [bar]	3.5	25
Temperatura di progetto fasciame [°C]	320	262
Temperatura di progetto piastra tubiera [°C]	445	400
Temperatura di progetto tubi [°C]	345	290
Sovraspessore di corrosione fasciame [mm]	3	1.6
Sovraspessore di corrosione distributore [mm]	0.5	1.6
Sovraspessore di corrosione piastra lato mantello [mm]	0.5	0.8
Sovraspessore di corrosione piastra lato tubi [mm]	0.5	0.8

Tabella 1. Caratteristiche scambiatori

Tipologia di scambiatore	Transfer Line Exchanger (TLE)	Waste Heat Boiler (WHB)
Materiale mantello	SA-516 Gr. 70	EN10028-2 - P355GH
Diametro esterno mantello [mm]	898	1410
Spessore mantello [mm]	39	25
Materiale distributore	SA-387 Gr 22 Cl 2	EN10028-2 - 13CrMo4-5
Diametro esterno distributore [mm]	894	1600
Spessore distributore [mm]	12	22
Materiale piastra tubiera	SA-336 F11 Cl 3	EN10222-2 - 11CrMo9-10
Spessore piastra tubiera [mm]	25	27
Materiale tubi	SA-213 T11	EN10216-2 - 11CrMo9-10
Numero dei tubi	109	685
Diametro tubi [mm]	42.5	33.7
Spessore tubi [mm]	4.75	3.2

Tabella 2. Parametri geometrici

5. Risultati ottenuti con il metodo Annex J

In Tabella 3 si riporta uno schema riassuntivo delle principali verifiche dei *load ratios* (che essendo dati dal rapporto tra un carico applicato e il carico massimo ammissibile dovranno risultare inferiori o al limite uguali a 1) e i risultati della verifica a fatica. Si è deciso di utilizzare un numero di cicli pari a 500 (molto elevato per il tipo di attrezzatura) in quanto è il numero di cicli minimi richiesto dalla Direct Route per la verifica allo shakedown.
In tabella riportiamo il load case relativo alla contemporanea pressione sulle due camere, in quanto risulta il più significativo.
Per il TLE è stata eseguita anche la verifica della connessione flangiata e del peso (essendo un apparecchio ad asse verticale), entrambe non applicabili al WHB.
Tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Tipologia di scambiatore	Transfer Line Exchanger (TLE)	Waste Heat Boiler (WHB)
Load ratio: flessione Φ_B	0.81	0.84
Load ratio: taglio Φ_S	0.57	0.61
Load ratio: connessione flangiata Φ_F	0.6	N.A.
Load ratio: peso Φ_W	0.17	N.A.
Load ratio: combinazione carichi Φ_P	0.97	0.84
Analisi a fatica richiesta	SI	SI
Numero di cicli richiesto	500	500
Analisi a fatica con metodo semplificato	Verifica soddisfatta	Verifica soddisfatta

Tabella 3. Principali risultati ottenuti con Annex J

6. Confronto con i risultati ottenuti con il metodo "Direct Route"

Al fine di verificare i risultati ottenuti è stato sviluppato un modello ad elementi finiti e sono state svolte prima le analisi termiche (imponendo gli stessi valori di temperatura del gas e dell'acqua e gli stessi coefficienti di scambio termico usati per le analisi termiche semplificate). Le mappe termiche trovate sono in sostanziale accordo con le temperature di progetto/operative determinate precedentemente. Disponendo di un modello FEM, è ovviamente stato possibile adottare una più precisa schematizzazione delle temperature nei vari componenti, in particolare dividendo fra la zona della piastra forata (la più calda) e quella esterna alla foratura.
Le temperature così determinate, opportunamente arrotondate, sono state utilizzate per la definizione delle caratteristiche meccaniche (limite elastico e modulo di

elasticità) e quindi della curva sforzo-deformazione (che in un'analisi con il metodo Direct Route è di tipo elastico-perfettamente plastico).
Per alleggerire il peso computazionale è stato deciso di sfruttare la simmetria del problema modellando 1/8 dell'attrezzatura (metà in senso longitudinale e un quarto in senso circonferenziale) e applicando gli opportuni vincoli.
Nel caso del PD Design Check la curva può essere considerata ad una temperatura media del ciclo di carico e scarico, data dalla relazione $0.75*T_{max} + 0.25*T_{min}$, in cui T_{max} e T_{min} sono rispettivamente le temperature massime e minime assunte (temperatura massima operativa e temperatura ambiente).
Le verifiche al collasso plastico (GPD) sono risultate positive (convergenza al valore 1.2*P richiesto dal codice e verifica della deformazione massima inferiore al 5%), come pure le verifiche alla plasticizzazione alternata. Riportiamo un estratto degli output grafici più significativi delle GPD-DC. Il comportamento della piastra tubiera è quello atteso. Si può infatti osservare come all'aumentare della pressione si verifichi una plasticizzazione nella zona più esterna della piastra che tende a "trasferire" il carico della pressione sul fascio tubiero.

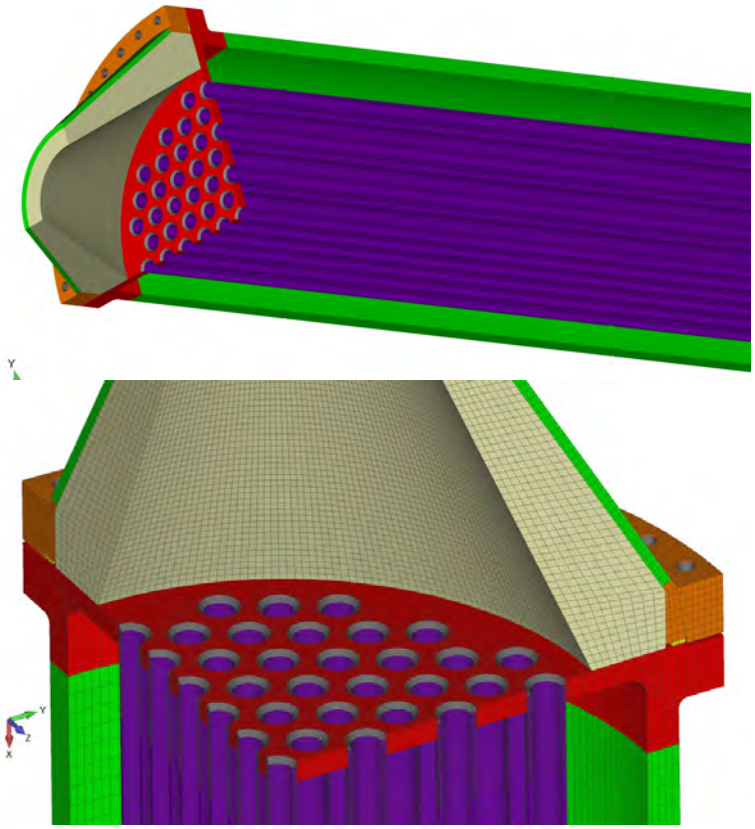


Figura 1. Modello e mesh - TLE

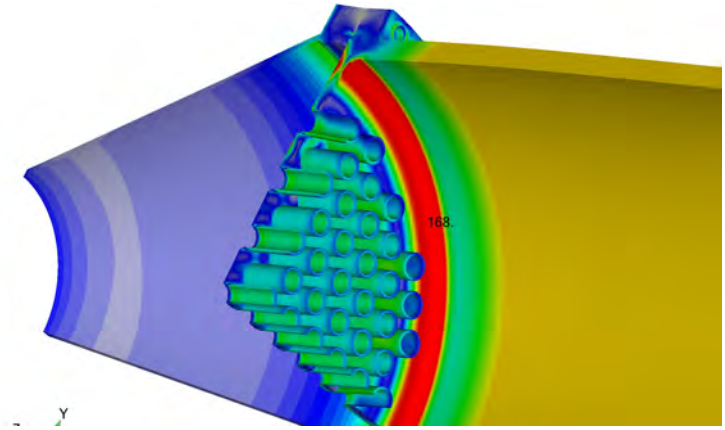


Figura 2. Sollecitazione equivalente di Von Mises a convergenza - TLE

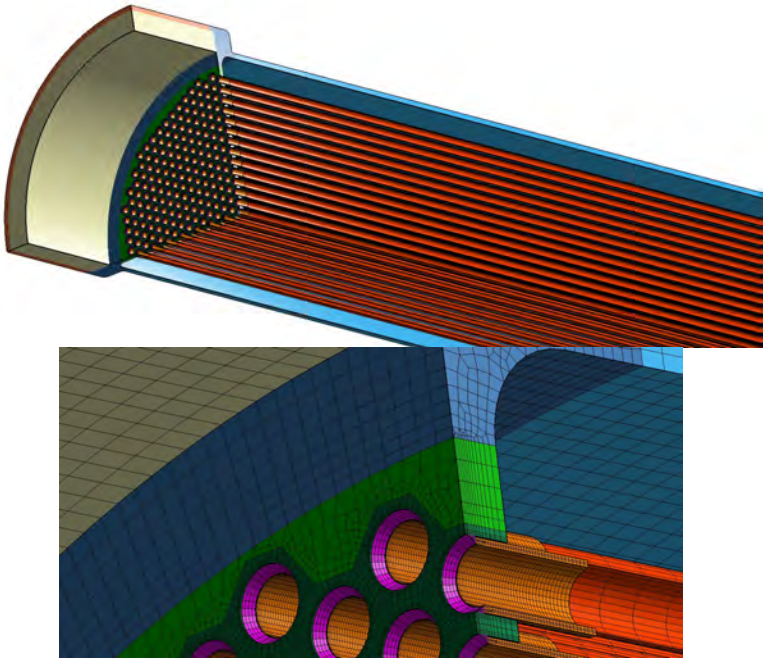


Figura 3. Modello e mesh - WHB

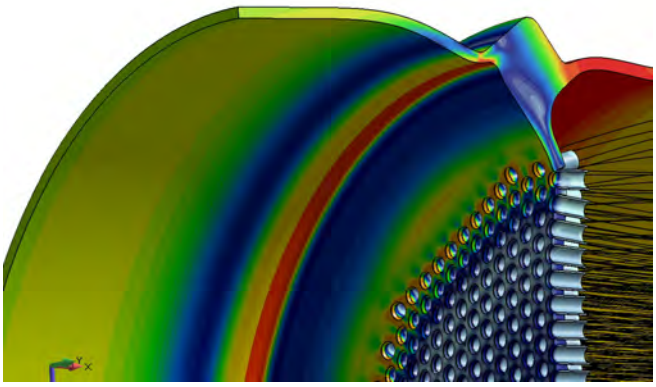


Figura 4. Sollecitazione equivalente di Von Mises a convergenza - WHB

7. Conclusioni

In questa memoria sono stati considerati due diversi casi di scambiatori di calore a piastre tubiere sottili per la generazione di vapore al fine di valutare l'applicabilità del metodo alternativo di calcolo contenuto nell'Annex J della EN13445-3. Entrambi gli scambiatori sono poi stati verificati anche con il metodo di analisi "Direct Route" contenuto nel Codice, che ha confermato la validità dei risultati ottenuti con le formule.

La scelta di "testare" il metodo su questa tipologia di scambiatori è dovuta alla necessità di contenere lo spessore delle piastre tubiere in questa particolare applicazione per i motivi illustrati; in realtà il metodo di calcolo può essere applicato a qualunque tipo di scambiatore di calore e permetterebbe, in tutti i casi di scambiatori a piastre fisse senza giunto di dilatazione, di abbassare gli spessori delle piastre e di conseguenza i pesi e i costi degli apparecchi.

Bibliografia

[1] EN13445-3 Edition 2021 + A1: 2025: Unfired pressure vessels – Part 3: Design

[2] EN12953-3 Edition 2016: Shell boilers – Part 3: Design and calculation for pressure parts

[3] G. Baylac, D. Koplewicz. EN 13445 "Unfired pressure vessels" Background to the rules in Part 3 Design. UNM. 2024

[4] J. L. Zeman. Pressure Vessel Design – The Direct Route. Elsevier Ltd. 2006.

[5] F. Lidonnici – Evolution of the methods used in tubesheet design and description of the alternative design method contained in Annex J of EN13445.

Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – Teorie di calcolo ai fini della progettazione

E. Pichini Maini[1], I. Mazzarelli[2], A. Alvino[1], A. Antonini[1], A. Meleddu[3], J. Ferino[3]

[1]Inail – Dit
[2]Inail – Uot di Milano
[3]Astarte Strategies Srl

Sommario
I materiali compositi a matrice polimerica rinforzata con fibre di vetro (PRFV) trovano crescente applicazione in numerosi settori industriali grazie alla loro inerzia chimica, leggerezza, elevata resistenza meccanica specifica e buone proprietà dielettriche. Tubazioni in pressione per impianti petrolchimici e farmaceutici, bombole per autorespiratori e componenti isolanti per apparecchiature di media e alta tensione costituiscono esempi tipici di membrature dal profilo circolare realizzate in PRFV soggette a pressione interna.
Nonostante l'apparente uniformità geometrica, tali componenti sono progettati e verificati secondo standard sviluppati per settori industriali e – conseguentemente - contesti concettuali differenti. Il presente lavoro analizza e confronta modelli teorici, codici normativi e metodi sperimentali per la verifica della stabilità alla pressione massima di esercizio di membrature in PRFV dal profilo circolare. Con riferimento alla sola sollecitazione circonferenziale effetto della pressione del fluido contenuto, vengono dapprima richiamate le formulazioni classiche della teoria delle membrane, per confrontarle poi con i criteri adottati da norme specifiche per materiali compositi quali la EN 13121-3 e l'ASME RTP-1 (recipienti), la UNI EN ISO 14692-3 e l'ASME B31.1 (tubazioni), nonché con la Raccolta ISPESL PRFV.

1. Membrature cilindriche e tubolari in pressione: due paradigmi di riferimento

1.1 Approccio classico per materiali isotropi

La teoria classica delle membrature cilindriche di recipienti in pressione ne modella le pareti come gusci sottili isotropi. In tali condizioni, la pressione interna genera principalmente tensioni circonferenziali e assiali.
Volendo qui considerare solo le tensioni circonferenziali generate dalla pressione interna a elementi cilindrici quali i tubi, l'equazione di Lamé (1a) permette di determinare la tensione circonferenziale σ_θ che la pressione interna p genera nel punto di coordinata radiale generica r della parete di un tubo (Fig. 1a) di diametro interno D_i e diametro esterno D_e:

$$\sigma_\theta(r) = \frac{p\, D_i^2}{D_e^2 - D_i^2}\left[1 + \frac{D_e^2}{4\, r^2}\right] \qquad (1a)$$

che, espressa in funzione dei raggi $r_i = D_i/2$ ed $r_e = D_e/2$, diventa:

$$\sigma_\theta(r) = \frac{p\, r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}\left[1 + \frac{r_e^2}{r^2}\right] = \frac{p\, r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}\,\frac{r^2 + r_e^2}{r^2} \qquad (1b)$$

La tensione circonferenziale è minima in corrispondenza dei punti di coordinata radiale $r_e = D_e/2$ e massima in corrispondenza dei punti di coordinata radiale $r_i = D_i/2$.

Dunque, considerando i punti in cui la tensione circonferenziale è massima, si ha:

$$\sigma_\theta(r = r_i) = \frac{p\, r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}\,\frac{r_i^2 + r_e^2}{r_i^2} = p\,\frac{r_i^2 + r_e^2}{r_e^2 - r_i^2}$$

Se nella precedente si inseriscono lo spessore $t = r_e - r_i$ e il raggio medio $r_m = (r_i + r_e)/2$ si ottiene:

$$\sigma_\theta(r = r_i) = p\left(\frac{r_m}{t} + \frac{t}{4r_m}\right)$$

Laddove lo spessore del tubo possa essere considerato significativamente minore del suo diametro ($t \ll r_m$) e il termine $t/4r_m$ possa trascurarsi rispetto al termine r_m/t – cosa che accade se $D_i \geq 20\ t$) - la precedente diventa:

$$\sigma_\theta(r = r_i) = p\frac{r_m}{t} = p\frac{D_m}{2t} \qquad (2a)$$

che è la formula di Barlow.

La formula di Barlow permette dunque di determinare la tensione circonferenziale (massima) che in tubo di diametro medio D_m e spessore t soggetto a pressione interna p si ha in corrispondenza dei punti di coordinata radiale r_i.

Proprio perché ricavata nell'ipotesi di spessore sottile – e dunque di $D_i \approx D_m \approx D_e$ – la formula di Barlow, può trovarsi nelle due ulteriori scritture:

$$\sigma_\theta = p\frac{D_i}{2t} \qquad (2b) \qquad\qquad \sigma_\theta = p\frac{D_e}{2t} \qquad (2c)$$

Tuttavia, mentre la (2b) continua ad approssimare molto bene il valore della tensione circonferenziale nei punti di coordinata radiale r_i anche nel caso di cilindri che non possono considerarsi di parete sottile, la (2c) perde precisione all'aumentare dello spessore della parete e può utilizzarsi solo per tubi di piccolo spessore [1].

Alla stessa relazione (2b) giunse Mariotte imponendo le condizioni di equilibrio statico per la sezione semicircolare in Fig. 1b e considerando costante la resistenza del materiale lungo sulla sezione di lunghezza unitaria e spessore t.

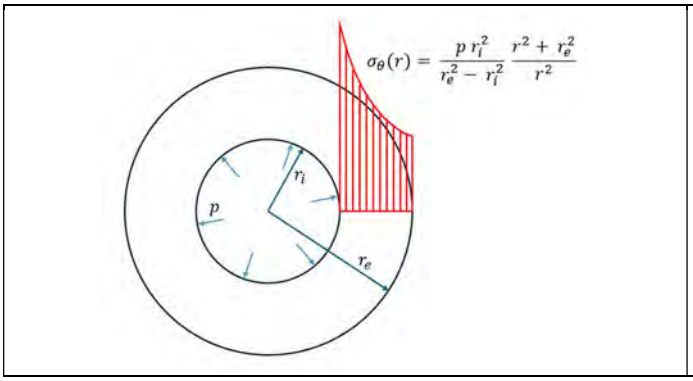


Figura 1a. Distribuzione delle tensioni secondo Lamé

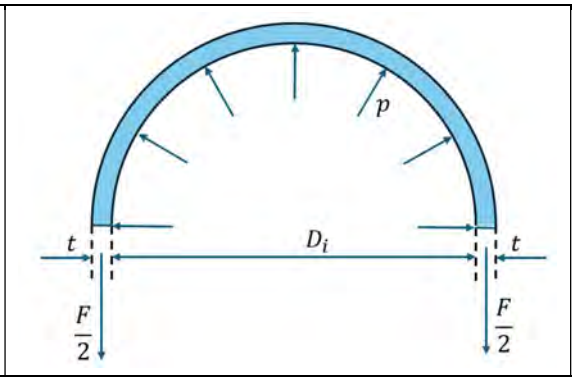


Figura 1b. Schema di Mariotte

Nelle condizioni di equilibrio infatti si ha:

$$F = p_{rott}\, D_i = 2\, R\, t \qquad R = p_{rott} D_i \,/\, 2\, t \qquad p_{rott} = 2\, R\, t/D_i \tag{3}$$

Tutti i codici di calcolo per il dimensionamento di componenti cilindrici in materiale metallico che derivano dalle formule qui richiamate, adottano ipotesi di comportamento elastico lineare isotropo e impongono verifiche della stabilità alle condizioni di progetto in considerazione di tensioni massime ammissibili definite in base a coefficienti di sicurezza legati a snervamento o rottura duttile.

1.2 Approccio per materiali compositi laminati

I materiali compositi laminati presentano un comportamento meccanico anisotropo, fortemente dipendente dall'orientamento delle fibre, dalla stratigrafia, dal rapporto fibra/matrice, dal processo produttivo.
Le norme specifiche per PRFV adottano pertanto modelli di lamina ortotropa, Teoria Classica della Laminazione (CLT), criteri di rottura multiasse per materiali fragili anisotropi [2].
Con ipotesi semplificative su deformazioni e sollecitazioni (come la trascurabilità degli sforzi tangenziali e la linearità delle deformazioni normali allo spessore), la CLT permette di dimensionare tubi in vetroresina multistrato e calcolare le proprietà meccaniche complessive del laminato composito, determinando rigidità e resistenza in funzione degli spessori, orientamenti e moduli elastici di ogni strato, per resistere a pressioni interne e/o esterne e ad altre eventuali sollecitazioni.
In particolare, le ipotesi di fondo della CLT sono:

- perfetta adesione: non vi è scorrimento tra una lamina e l'altra (assenza di delaminazione)
- assunzione di Kirchhoff-Love: le linee normali alla superficie media rimangono normali (assunzione classica per strutture sottili)
- spessore ridotto: lo spessore della lamina è piccolo rispetto alle altre dimensioni, così da consentire una formulazione bidimensionale.

A partire da queste ipotesi, per ogni strato la CLT deriva matrici di rigidezza che legano le forze e i momenti applicati al laminato alle deformazioni e curvature che il laminato subisce; determina quindi proprietà globali della singola lamina e del laminato (modulo di elasticità, coefficiente di Poisson, rigidità a flessione e trazione) con cui è possibile prevedere il comportamento finale della struttura realizzata.

2. Quadro normativo e confronto critico

2.1 Regole della Raccolta ISPESL VSR per tubazioni metalliche

L'approccio della Raccolta ISPESL VSR (Verifica della Stabilità di Recipienti) è del tipo classico per materiali isotropi.
La Regola VSR.1.M.2 per la determinazione dello spessore minimo di parete di tubi sottoposti a pressione interna p impone di verificare che lo spessore t di un tubo di diametro esterno D_e sia almeno pari a:

$$s_0 = \frac{pD_e}{2\,f\,z + p} \tag{4}$$

essendo f la tensione massima ammissibile del materiale e z il coefficiente di giunzione adottato per le saldature, laddove presenti.
Sostituendo nella (2a) $D_m = D_e - t$ e utilizzando la (4) per determinare lo spessore necessario affinché in un tubo privo di saldature ($z = 1$) si abbia $\sigma = f$, si dimostra facilmente che le due equazioni sono identiche.

2.2 Norme specifiche per PRFV

2.2.1 La Raccolta ISPESL PRFV

La Raccolta ISPESL PRFV, pubblicata nel 1982, rappresenta uno dei primi tentativi di regolamentazione nazionale delle apparecchiature in Plastica Rinforzata con Fibre di Vetro (da cui l'acronimo PRFV) soggette a pressione cui purtroppo non hanno fatto seguito ulteriori specifiche tecniche. Essa adotta formulazioni semplificate, coefficienti di sicurezza elevati, limitata caratterizzazione del laminato.
Pur mantenendo interesse storico e applicativo, il suo impianto e i suoi contenuti andrebbero aggiornati in considerazione del progresso dei processi tecnologici e della definizione di modelli e normative più recenti.
Va detto innanzitutto che il suo campo di applicazione è limitato a recipienti in PRFV progettati per pressioni non superiori ai $5\,bar$, temperature da $-40\,°C$ a $+65\,°C$, prodotto $P \times V$ non superiore a $1000\,bar \times litro$, diametro interno del fasciame non superiore a $3000\,mm$, fluidi contenuti non pericolosi.
I materiali che la Raccolta ISPESL PRFV ammette sono sia le resine poliestere insature sia le epossidiche, rinforzate con fibre di vetro così da ottenere diversi tipi di stratificato. In particolare, ammette l'impiego di multistrati di geometria cilindrica ottenuti avvolgendo su mandrini rotanti (*filament winding*) fibre di vetro continue srotolate da matasse (*roving*) e impregnate di resina.
Chiede poi di determinare i valori della resistenza a trazione globale del multistrato – sia in direzione assiale sia in quella circonferenziale - come media ponderale delle resistenze a trazione di ciascuno strato. Così, per esempio, nel caso di un multistrato composto dagli strati di spessore s_α, s_β ed s_γ ottenuti avvolgendo con angoli α, β, γ lo stesso tipo di fibre si ha:

$$\begin{aligned} R_{ass} &= \frac{s_\alpha \times R_{roving} \times cos^2\alpha + s_\beta \times R_{roving} \times cos^2\beta + s_\gamma \times R_{roving} \times cos^2\gamma}{s_\alpha + s_\beta + s_\gamma} \\ R_{circ} &= \frac{s_\alpha \times R_{roving} \times sin^2\alpha + s_\beta \times R_{roving} \times sin^2\beta + s_\gamma \times R_{roving} \times sin^2\gamma}{s_\alpha + s_\beta + s_\gamma} \end{aligned} \tag{5}$$

per valori della resistenza a trazione del materiale R_{roving} nella direzione delle fibre compresi tra 400 e $720\,MPa$.
Determinata la resistenza a trazione R del materiale nella direzione del carico e della deformazione di interesse, la Raccolta PRFV – così come la Raccolta VSR – impone di

verificare che, nelle condizioni di progetto, la sollecitazione del materiale raggiunga al massimo il valore:

$$f = \frac{R}{S\,K} \tag{6}$$

essendo $S = 2{,}7$ il coefficiente di sicurezza e K un fattore di 'riduzione dell'affidabilità del materiale' ottenuto moltiplicando i fattori parziali:

- $K_1 = 2$ - decadimento della resistenza dello stratificato nel tempo (fino a 100000 ore)
- $K_2 = 1{,}4$ - decadimento dovuto all'attacco chimico del fluido contenuto con la resina
- $K_3 = 1{,}2$ - anisotropia del laminato
- $K_4 = 1{,}2$ - disomogeneità delle materie prime.

Dunque, considerando tutti i fattori di riduzione dell'affidabilità del materiale, si ha $K = 4{,}032$ e $f = R/10{,}886$. Considerando invece solo il decadimento nel tempo e l'anisotropia del laminato, sia ha $K = 2{,}4$ e $f = R/6{,}48$.

Per la verifica dello spessore minimo di un fasciame cilindrico, anche la PRFV si pone nella condizione di parete sottile. Tuttavia, ricordando che il valore massimo delle sollecitazioni si ha in corrispondenza dei punti di coordinata radiale r_i, utilizza la formula di Barlow nella scrittura che fa riferimento al diametro interno D_i

$$\sigma_\theta = p\frac{D_i}{2t} \tag{2b}$$

e richiede che lo spessore t del fasciame sia almeno pari allo spessore minimo s_{circ}:

$$t \geq s_{circ} = \frac{p\,D_i}{2f_{circ}} \tag{7}$$

essendo $f_{circ} = R_{circ}/SK$ la sollecitazione massima ammissibile in senso circonferenziale determinata come richiesto dalla (6).

2.2.2 La UNI EN 13121-3

La parte 3 della norma UNI EN 13121 tratta la progettazione e la lavorazione di serbatoi e contenitori di materie plastiche rinforzate con fibre di vetro (PRFV) per utilizzi fuori terra e deve essere utilizzata congiuntamente alle parti 1 e 2 - che trattano rispettivamente le 'condizioni di specifica e uso delle materie prime' e i 'requisiti di resistenza chimica dei materiali compositi' - e la parte 4 relativa alle 'condizioni di consegna, installazione e manutenzione'. In particolare, la parte 1 della norma fornisce i valori minimi della resistenza a trazione e flessione, del modulo elastico a trazione, del contenuto di stirene in massa della resina.

La UNI EN 13121-3 è basata sulla determinazione della sollecitazione di progetto e dei carichi, la progettazione e la sua analisi, le condizioni di carico generali e localizzate su flange, supporti, ancoraggi, strutture e accessori. Contenendo anche i requisiti relativi alla progettazione in condizioni di vuoto, al vento, ai carichi sismici e agli aspetti ambientali al contorno, all'approvazione dei laminatori, ai controlli di qualità di produzione, alle prove su materiali e serbatoi finiti, la norma può essere

considerata un codice autonomo. Ulteriore elemento di pregio è la disponibilità, nell'annesso F, di un metodo di progettazione mediante *stress analysis*; mentre la parte 5 della norma fornisce un esempio di calcolo secondo formule.
Coerentemente con la Teoria Classica della Laminazione (CLT), la norma intende il laminato come sovrapposizione di lamine ciascuna con caratteristiche elastiche proprie; gli sforzi globali del laminato vengono ripartiti tra le singole lamine; la verifica è eseguita a livello di lamina (*stress/strain*); il collasso del laminato avviene al superamento della resistenza di una o più lamine.
Dopo aver indicato la percentuale minima e massima di fibre di rinforzo che devono contenere i tre tipi di laminati considerati nel suo prosieguo (CSM – *chopped strand mat*; WR - *woven roving*; FW – *filament wound*), la UNI EN 13121-3 ne riporta le specifiche minime (modulo di trazione unitario X_i in funzione dell'angolo di laminazione e resistenza massima a trazione U_i, entrambe in N/mm per kg/mm^2 di vetro) e la resistenza al taglio inter-laminare e resistenza a trazione (entrambe in N/mm^2, tabella 4 del punto 7.6). L'annesso B della parte 3 permette di determinare le proprietà di un laminato a partire da quelle delle singole lamine che lo compongono.
Lo spessore minimo della lamina (in mm) è determinato con la formula:

$$t_i = \left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{(100 - m_g)}{m_g \cdot \rho_r}\right] \cdot 10^3$$

essendo m_g il contenuto di vetro per area unitaria della lamina, in kg/m^2; ρ_r e ρ_g rispettivamente densità della resina indurita e del vetro in kg/m^3.
In base allo spessore t_i di ciascuna lamina, al numero di lamine, al modulo di trazione unitario X_i e al valore h_i della distanza tra la lamina *i*-esima e quella intermedia, è possibile calcolare i moduli di Young secondo l'appendice B per le varie condizioni di carico a trazione, compressione, flessione.
La norma prevede la scelta di uno dei due livelli di progettazione:

- livello base, che assume come limite i valori di resistenza e modulo di trazione dati dalla norma come specifiche minime per lamina e laminato, da confermare mediante prove (punto 7.9.2)
- livello avanzato, che fa riferimento a valori di resistenza e modulo di trazione più alti, determinati con programmi di prove elevate (punto 7.9.3); questo metodo consente di effettuare prove presso laboratori accreditati e con organismi di ispezione, mirate a determinare una deviazione standard dei valori ottenuti su tipo di materiale, lamina e laminato, in modo da limitare le prove successive - entro i 18 mesi di produzione - quale alternativa ai test su ogni produzione.

I metodi di prova previsti nei punti 7.9.2 e 7.9.3 sono dettagliati nell'appendice D.
Per entrambi i livelli la norma richiede di determinare i fattori:

K – di progettazione complessiva F – di instabilità

che considerano condizioni di carico a lungo termine e sono funzione dei fattori parziali:

A_1 relativo all'affidabilità delle prove eseguite sui materiali
A_2 relativo alla resistenza chimica dei materiali

A_3 relativo all'influenza della temperatura di progetto rispetto a quella di deflessione a caldo caratteristica della resina (HDT, *heat deflection temperature*) i cui valori minimi sono definiti nella parte 1 della norma
A_4 relativo ai carichi ciclici
A_5 relativo alle performance a lungo termine associate a un ciclo di vita stabilito
Y_M relativo ai materiali e pari a 1,4 per tutti i laminati
$Y_{F,i}$ relativo ai carichi e pari a 1,5 per la pressione

In particolare, la norma chiede di verificare che, per l'uno o l'altro livello di progettazione, risultino valori minimi di K e di F coerenti con la tabella seguente:

FATTORE	TIPO DI PROGETTAZIONE		
	Avanzata	Base	Base con prove ridotte
K_{min}	4 *5 se non si esegue la prova di flessione a creep, punto D.15*	6	8
F_{min}	≥ 2,7	≥ 3,0	≥ 4,0

Tabella 1. Valori minimi di K e di F in funzione del tipo di progettazione

Determinati i fattori K e di F dipendentemente dal tipo di progettazione che si vuole seguire, la progettazione prosegue con la determinazione della deformazione massima ammissibile

- della resina che dovrà essere $\varepsilon_{ar} \leq 0{,}1\varepsilon_R$ essendo ε_R l'allungamento a rottura della resina non rinforzata rilevato durante le prove
- della lamina e del laminato (insieme di lamine) $\varepsilon_d = \varepsilon_{lim}$ in condizioni di progetto e prova.

Nei test finali sui recipienti – che devono essere condotti secondo l'annesso C – la deformazione massima che si potrà riscontrare dovrà essere $\varepsilon_{test} \leq 1{,}3\,\varepsilon_{lim}$.

Dopo aver determinato il carico unitario limite delle singole lamine in base alle relazioni:

$$U_{i,d,R} = \frac{U_{lam,k}}{Y_M \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4}$$ per i carichi maggiorati dai fattori parziali $Y_F \cdot A_5$ in considerazione di condizioni limite

$$U_{i,\varepsilon} = U_{i,k,\varepsilon} = \varepsilon_{lim} \cdot X_i$$ per carichi non maggiorati da fattori parziali

occorre verificare che il carico unitario agente sul laminato verifichi entrambe le condizioni:

$$U_{lam} \leq U_{i,d} \qquad\qquad U_{lam} \leq U_{i,\varepsilon} = U_{i,k,\varepsilon}$$

avendo indicato con

$U_{i,d,R}$ Il valore di progetto del carico agente sulla lamina i-esima, per la verifica allo stato limite ultimo (resistenza/rottura)
$U_{lam,k}$ la resistenza massima a trazione caratteristica (k) del laminato
$U_{i,\varepsilon}$ il carico generico ε agente sulla lamina i-esima
U_i la resistenza massima a trazione della lamina i-esima
X_i il modulo di trazione unitario della lamina i-esima
U_{lam} il carico unitario agente sul laminato.

Il punto 9 della norma contiene equazioni, relazioni e valori dei fattori parziali A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, Y_M, Y_F necessari per verificare le condizioni precedenti in relazione ai diversi tipi di carico che possono sollecitare il laminato.
Una volta ottenuti i valori di sollecitazione massima per materiali, lamina e laminato è possibile calcolare i carichi massimi per le varie parti del recipiente. Qui ci si limita a rappresentare quelli circonferenziali – a rottura e in condizioni di carico generico - nella progettazione di un fasciame cilindrico di un serbatoio verticale:

$$n_{\varphi,d,R} = \frac{P_{d.R} \cdot D}{2} \qquad n_{\varphi,d,\varepsilon} = \frac{P_{d.\varepsilon} \cdot D}{2}$$

avendo indicato con

$$P_{d,R} = PS_{op} \cdot A_{5,i} \cdot Y_{F,p} + P_{hp} \cdot A_{5,i} \cdot Y_{F,w} \qquad \text{e} \qquad P_{d,\varepsilon} = PS_{op} + P_{hp}$$

le pressioni di *design* nelle peggiori condizioni di carico: PS_{op} pressione massima ammissibile in esercizio; P_{hp} *pressione* idrostatica; $Y_{F,p}$ fattore parziale dovuto alla pressione, $Y_{F,w}$ fattore parziale dovuto al peso.
Per la stabilità circonferenziale si dovrà verificare che risulti:

$$A_5 \cdot E_i \cdot Y_{F,i} \leq \frac{R_k}{Y_M \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4}$$

essendo E_i il modulo di Young ed R_k la resistenza del laminato.
Per la stabilità radiale si dovrà verificare che risulti:

$$P_{d,cr} = PS_{ep} \cdot \sqrt{A_{5,i}} \cdot Y_{F,p} + p_{wind} \cdot Y_{F,p}$$

considerando anche la pressione dovuta al vento p_{wind}.
Dunque, mentre per i materiali isotropi si determina uno spessore minimo utile in funzione di forma, dimensioni e pressione, per i materiali anisotropi si calcolano le sollecitazioni massime ammissibili nelle varie condizioni di carico solo dopo aver sottoposto i materiali e i semilavorati (lamina e laminato) a prove sperimentali volte a determinarne le caratteristiche specifiche. La ripetibilità dei processi di produzione, quindi, è un fattore determinante per ottenere dispersioni minime dei valori di prova.
Quando la stabilità di parti del recipiente non può essere verificata mediante formule (forme particolari), la norma fornisce una metodologia di progettazione sperimentale, utilizzata anche in combinazione al calcolo, e limitata a temperature di servizio *TS* non inferiori a HDT -20 °C. In tal caso occorre sottoporre il recipiente a una prova idraulica spinta fino a rottura in cui deve essere raggiunto un valore di pressione almeno uguale a 5 volte la pressione massima di servizio *PS*. In ogni caso sono previste prove idrauliche come indicate nell'annesso C a 1,3 volte la *PS* e per tempi non inferiori a 1 ora, oppure a prove di pressione statica (recipienti atmosferici) per durate non inferiori a 12 ore.
Nel caso di recipienti saldati, i particolari di saldatura devono essere testati mediante talloni di saldatura sui quali eseguire le prove di resistenza a trazione previste dalla EN ISO 527-4 e prove di piega, mentre per i controlli in produzione è possibile utilizzare prove dielettriche come indicato nell'annesso D; tale metodo non è indicato

per recipienti eserciti, per i quali è opportuno utilizzare metodi di controllo non distruttivo tradizionali.

2.2.3 La UNI EN ISO 14692-3

La UNI EN ISO 14692-3 tratta la progettazione di "Tubazioni in vetroresina (VTR)" per le industrie del petrolio e del gas naturale. Come la UNI EN 13121-3, adotta un approccio basato sulla caratterizzazione meccanica del laminato e verifiche a condizioni limite, integrando il calcolo con gli esiti di prove sperimentali: a un dimensionamento iniziale del tubo basato sulle sollecitazioni ammissibili nel multistrato stanti le caratteristiche dei materiali che lo compongono fa seguito una verifica sperimentale che permette di garantire la stabilità del tubo sottoposto alla pressione interna P nel tempo.

Parametro fondamentale di una tubazione – che deve essere dichiarato dal suo fabbricante – è il *Maximum Pressure Rating* (MPR) definito nella parte 1 della norma come il valore massimo della pressione al di sotto del quale il fabbricante garantisce che la tubazione conservi per 20 anni le sue caratteristiche. È ottenuto in base a prove a pressione idrostatica che determinano la rottura della tubazione: la pressione all'interno della tubazione viene dapprima portata al valore P_0 che ne determina la rottura al tempo T_0. A questa prima prova ne seguono altre al valore P_1 che determina la rottura al tempo T_1, al valore P_2 che determina la rottura al tempo T_2 ... e così via fino a tracciare la curva P_i vs T_i del tipo di quella riportata in Fig. 2.

Il valore di pressione interna estrapolato in corrispondenza di $T = 50$ anni - valore della pressione interna che nel 97,5% dei casi provocherebbe la rottura della tubazione dopo 50 anni – è indicato come *Pressure Long Term* (PLT).

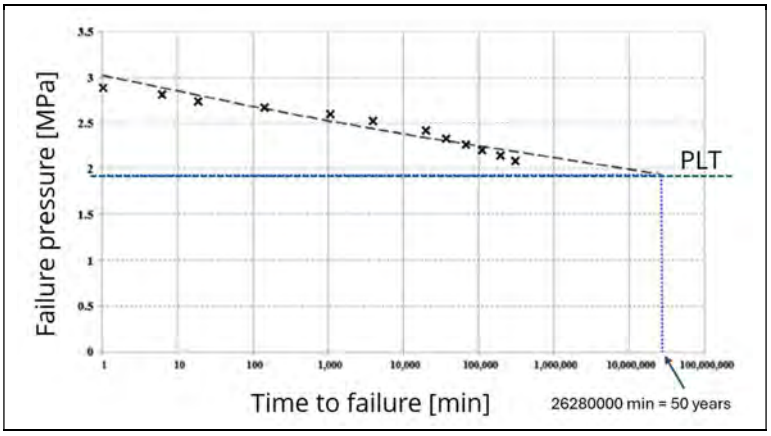


Figura 2. Estrapolazione a lungo termine del valore PLT

Dal valore PLT e con la formula di Barlow (2a), il fabbricante ricava la sollecitazione circonferenziale

$$\sigma_{LT} = PLT \frac{D_m}{2t}$$

per poi dichiarare un MPR che dovrà essere

$$MPR \leq 0{,}67 \frac{2\, t\, \sigma_{LT}}{D_m}$$

Il coefficiente di sicurezza 0,67 è imposto per tenere conto della dispersione dei dati sperimentali, di difetti di produzione, del degrado dei materiali nel tempo e di altri fattori imputabili a condizioni di esercizio non previste (errori o difetti nell'installazione, sovraccarichi accidentali). La pressione di progetto della tubazione - intesa come pressione massima di esercizio – dovrà essere ancora minore dell'MPR.

2.2.4 L'ASME RTP-1

Come la EN 13121-3, anche la ASME RTP-1 (ASME RTP-1 – *Reinforced Thermoset Plastic Corrosion Resistant Equipment*) è dedicata alla progettazione, costruzione, fabbricazione, ispezione e prove di attrezzature in PRFV quali serbatoi, recipienti a pressione atmosferica o a bassa pressione, colonne, scrubber, condotte e simili usati soprattutto nell'industria chimica, petrolchimica, del trattamento acque, galvanica e ambientale. Non specificamente di tubazioni.

Fornisce criteri dettagliati per la progettazione considerando le caratteristiche dei multistrati e i meccanismi di rottura tipici dei compositi. Il suo campo di applicazione è tuttavia ristretto ad attrezzature progettate per pressioni assai modeste (0,5-1 bar). Data la sua complessità a fronte di un utilizzo tanto limitato, non verrà trattata nel presente lavoro.

2.2.5 L'ASME B31.1 e la Mandatory Appendix N: ruolo e limiti per i PRFV

L'ASME B31.1 – *Power Piping* è un codice storicamente sviluppato per sistemi di tubazioni metalliche in pressione. Tuttavia, con la sua *Mandatory Appendix N – "Rules for Nonmetallic Piping and Piping Lined with Nonmetals"*, ammette all'impiego tubazioni in materiale plastico: termoplastico, termoindurente, rinforzato.

Pur estendendo il campo di applicazione dell'ASME B31.1 alle tubazioni in PRFV, l'Appendice N contiene requisiti relativi alla qualificazione dei materiali, ai limiti di impiego, alle prove a pressione da eseguirsi sulle tubazioni, ai criteri di collaudo e di accettazione senza però assumere un'impostazione progettuale basata su un modello meccanico: dal punto di vista meccanico non viene considerata esplicitamente l'anisotropia del materiale, né utilizzata la teoria classica della laminazione, né correlata la resistenza strutturale alla stratigrafia del componente.

A contrario, l'Appendice N mantiene l'impostazione concettuale dell'ASME B31.1 orientata al dimensionamento macroscopico delle tubazioni, evitando la modellazione meccanica del composito. Il suo utilizzo per componenti in PRFV deve pertanto essere inteso come quadro normativo di sistema, da integrare con norme specifiche, prove sperimentali e modellazioni numeriche dedicate.

Per la determinazione dello spessore minimo t di un tubo di soggetto alla pressione interna P fa riferimento alla formula di Barlow (2a) scritta, come nella Regola VSR.1.M.2, rispetto al diametro esterno D_e e chiedendo che sia:

$$t = \frac{D_e}{2\frac{S_c F}{P} + 1} = \frac{P D_e}{2\, S_c F + P} \tag{8}$$

La (8) è strettamente analoga alla (4), dal momento che S_c è l'"*hydrostatic design basis*' ossia il 'valore base' della tensione ammissibile da considerarsi – come la f della (4) – 'di partenza' salvo poi essere ridotto dal '*service design factor*' F che, analogamente al coefficiente z della (4), tiene conto di fattori che potrebbe inficiare la resistenza del materiale durante l'esercizio. Nella Table N-102.2.1-3 riportata parzialmente in Fig. 3, vengono indicati i valori di S_c e di F da utilizzare nella (8) per diverse tipologie di materiali in condizioni di carico ciclico o statico.

Table N-102.2.1-3
Hydrostatic Design Basis (HDB) for Machine-Made Reinforced Thermosetting Resin Pipe

SI Units

ASTM Spec. No. and Type	Grade	Class	Material Designation ASTM D2310	HDB Stress, S_c [Note (1)], at 23°C [Note (2)] Cyclic, MPa [Note (3)]	Static, MPa [Note (4)]
D2517 filament wound	Glass fiber reinforced epoxy resin	No liner	RTRP-11AD	34.5	...
			RTRP-11AW	...	110.3
D2996 filament wound	Glass fiber reinforced epoxy resin	No liner	RTRP-11AD	34.5	...
			RTRP-11AW	...	110.3
		Epoxy resin liner, reinforced	RTRP-11FE	43.4	...
			RTRP-11FD	34.5	...
	Glass fiber reinforced polyester resin	Polyester resin liner, reinforced	RTRP-12EC	27.6	...
			RTRP-12ED	34.5	...
			RTRP-12EU	...	86.2
		No liner	RTRP-12AD	34.5	...
			RTRP-12AU	...	86.2
D2997 centrifugally cast	Glass fiber reinforced polyester resin	Polyester resin liner, nonreinforced	RTRP-22BT	...	68.9
			RTRP-22BU	...	86.2
		Epoxy resin liner, nonreinforced	RTRP-21CT	...	68.9
			RTRP-21CU	...	86.2

NOTES:
(1) A service (design) factor must be applied to the HDB values to obtain the HDS.
(2) These HDB values apply only at 73°F (23°C). The standards covered in this table only require testing at 73°F (23°C), using ASTM D2992 test procedures. ASTM D2992 makes provision for testing at higher temperatures, and manufacturers also usually test to higher temperatures. It is the designer's responsibility to verify that the manufacturer has test data covering the design temperature for the application, and that pressure–temperature ratings provided by the manufacturer reflect the service factor selected by the designer for the application.
(3) When using the cyclic design basis, the service factor shall not exceed 1.0.
(4) When using the static design basis, the service factor shall not exceed 0.5.

Figura 3. Valori di S_c e di F da utilizzare per il calcolo dello spessore minimo *t*

Nota: considerazioni e risvolti pratici di quanto finora trattato, utili ai fini delle verifiche della stabilità di particolari membrature con profilo circolare realizzate in PRFV, vengono illustrati nel lavoro che segue.

Bibliografia

[1] Sulle formule di Barlow e di Mariotte – Allegato alla pagina 'Formula di Barlow o Formula di Mariotte?' del blog https://www.studioalicino.it/it/blog - 29 settembre 2020
[2] Irhirane EH, Echaabi J, Hattabi M, Aboussaleh M, Saouab A. - A comparative study of failure criteria applied to composite materials - Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 2, 141–147 (2008), ASMDO, EDP Sciences 2008 - https://doi.org/10.1051/smdo:2008019

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

E. Pichini Maini[1], I. Mazzarelli[2], A. Alvino[1], A. Antonini[1], A. Meleddu[3], J. Ferino[3]

[1]Inail – Dit
[2]Inail – Uot di Milano
[3]Astarte Strategies Srl

Sommario
Con riferimento al lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione", vengono qui riportate le considerazioni che hanno permesso di verificare la stabilità di membrature in PRFV pur nell'assenza di regole nazionali specifiche, i risultati di simulazioni agli elementi finiti eseguite a supporto delle valutazioni, lo standard UNI EN 1394 che permette di misurare la resistenza a trazione circonferenziale di un multistrato in PRFV seppure come caratteristica media di parete.

1. Esperienze e verifiche pratiche

Negli ultimi anni e in occasione di verifiche eseguite nell'ambito dell'approvazione di prototipi di cui al d.m. 1.12.1980 e altre attività istituzionali diverse, tecnici dell'INAIL si sono trovati a dover valutare le scelte progettuali di fabbricanti relative all'impiego e al dimensionamento a pressione interna di membrature con profilo circolare realizzate in materiale composito: tubazioni in PRFV per il trasferimento di sostante in industrie petrolchimiche o farmaceutiche, passanti cilindrici in PRFV utilizzati come isolatori in apparecchi per alta tensione, recipienti in esercizio presso impianti a rischio di incidente rilevante. Quando le verifiche si sono svolte in ambito certificativo PED o Seveso, per le loro valutazioni i tecnici hanno potuto fare riferimento a standard internazionali, a maggior ragione se adottati dall'Europa come la EN 13121 per serbatoi fuori terra o la UNI EN ISO 14692 per tubazioni.
Quando invece l'attività ispettiva ha riguardato membrature fabbricate nell'ambito di regolamenti rimasti esclusi dalla PED come da altre Direttive europee, l'indisponibilità di codici di calcolo o standard riconosciuti a livello nazionale specifici per membrature in composito ha rappresentato un problema di non facile soluzione: non potendo fare riferimento a regole della VSR per materiali non isotropi, e in particolare per la vetroresina, come utilizzare i criteri della Teoria delle Membrane e dei Gusci Sottili che sono alla base della stessa VSR e con quali considerazioni e attenzioni aggiuntive? Emblematico è il caso dei passanti cilindrici in vetroresina utilizzati dai fabbricanti di apparecchiature elettriche per alta tensione. La PED esclude "gli alloggiamenti per apparecchiature ad alta tensione" dal suo campo di applicazione, ma in Italia, diversamente da tutti gli altri Stati membri, è in vigore il d.m. 1.12.1980 che impone siano omologati dall'INAIL seguendo la specifica tecnica contenuta nel Raccolta VSR,

capitolo VSR8.B. La stessa specifica prevede che i materiali utilizzati dai fabbricanti siano contemplati dalla Raccolta M o ammessi all'impiego seguendo quanto questa prevede nei capitoli M.1.E ed M.1.F.; e che per materiali e/o geometrie per cui la VSR non offra ai fabbricanti regole con cui garantirne la stabilità, questa debba essere verificata con prova idraulica spinta fino a rottura.
A tal fine la VSR.8.B contiene due distinte regole per l'esecuzione delle prove idrauliche spinte fino a rottura che considerano:

- o membrature in solo materiale isolante, non calcolabili perché la VSR tratta solo materiali metallici
- o membrature in solo materiale metallico non calcolabili perché di geometria non trattata dalla VSR.

Ma gli isolatori in vetroresina che i fabbricanti di apparecchiature elettriche per alta tensione utilizzano, vengono prodotti secondo uno standard internazionale – l'IEC 61462 - che ne prevede il collaudo di tipo e di routine quando il passante cilindrico è già stato collegato permanentemente (mediante incollaggio) a flange metalliche.
Da canto suo, il tecnico INAIL incaricato della certificazione del prototipo

- non può considerare la conformità degli isolatori alla IEC 61462 perché il d.m.12.1980 non lo prevede;
- non può eseguire prove idrauliche spinte fino a rottura sui soli passanti in vetroresina e sulla sole flange metalliche laddove queste non siano state verificate mediante calcolo;
- non dispone di regole con cui eseguire prove idrauliche spinte fino a rottura su membrature ottenute assiemando materiali isolanti e materiali metallici quali sono appunto gli isolatori.

Il caso concreto illustrato nel seguito aiuterà a comprendere che cosa hanno considerato gli autori del presente lavoro per verificare la stabilità di passanti in vetroresina inseriti in prototipi di apparecchiature per alta tensione oggetto di omologazione INAIL ai sensi del Decreto del 1980.

1.1 Verifica di un isolatore in PRFV secondo VSR.8.B

L'isolatore risultava dall'assieme dato da un passante cilindrico in PRFV di diametro interno $D_i = 154\,mm$ e spessore $t = 6\,mm$ collegato permanentemente, mediante incollaggio, a due flange metalliche, e progettato per una pressione massima di esercizio $p = 8\,bar = 0{,}8\,MPa$. Il suo disegno di massima è riportato in Fig. 1.

1.1.1 Materiali

Flange: in lega di alluminio AlSi7Mg0.3 EN AC-42100-K-T6, caratterizzate una da $R_{1,f} = 297{,}38\,MPa$ e l'altra da $R_{2,f} = 298{,}66\,MPa$ essendo per entrambe $R_{min,f} = 290\,MPa$.
Passante in PRFV: un multistrato ottenuto per *filament-winding* avvolgendo 14 strati di fibre di vetro con angoli $\pm 60_2/\pm 22_4/\pm 60$.
A differenza delle produzioni metalliche che prevedono la misura della resistenza a trazione di ogni singola colata, la produzione di passanti in PRFV mediante *filament winding* non prevede la misura della resistenza a trazione circonferenziale di ogni

singolo tubo; pertanto, la resistenza R_n del passante n da sottoporsi a prova idraulica spinta fino a rottura è caratteristica non sempre nota. E laddove si imponga di misurarla, costringe il costruttore a richiedere al produttore una lavorazione particolare per il passante n che, prima di essere flangiato, dovrà avere una lunghezza maggiore di quella finale, utile a ricavare i campioni anulari da sottoporre a *ring test.* Inoltre, trattandosi di materiali compositi, non omogenei per loro stessa natura, ottenuti da componenti fragili, spesso i produttori dei multistrati dichiarano valori di resistenza a trazione R_{min} teorici – ottenuti in fase di progettazione da formule simili alle (5) già riportate nel lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione" – conservativi rispetto ai valori reali.

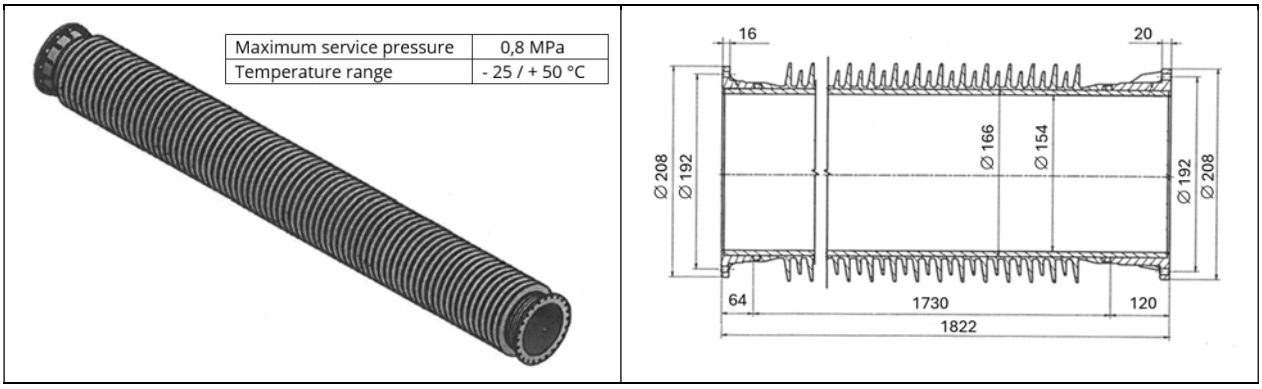


Figura 1. Disegno dell'isolatore oggetto della verifica

Nel caso specifico, il passante in vetroresina è stato ammesso all'impiego per uso particolare secondo Raccolta M.1.F. a condizione del buon esito di prove (*ring test* secondo UNI EN 1394 metodo B) che il fabbricante ha dovuto eseguire – in presenza di tecnico INAIL – e che hanno confermato il valore minimo della resistenza a trazione circonferenziale dichiarato dal produttore del passante e pari a $R_{min,PRFV} = 230\ MPa$. Come valore nominale R_{PRFV} della resistenza a trazione del passante da sottoporre a prova idraulica spinta fino a rottura, che il certificato redatto dal produttore secondo l'ISO 61462 non riportava, si è considerato il valore medio delle resistenze circonferenziali ottenute dai *ring test* e pari a oltre $290\ MPa$.

1.1.2 Verifiche omologative

La Regola VSR.8.B.2 richiedeva che tanto il passante in PRFV tanto le flange in lega di alluminio fossero sottoposti a prova idraulica spinta fino a rottura.
Ma se per le flange il valore minimo di scoppio dato dalla Regola VSR.8.B.2.2c era:

$$p_{scoppio,f} = \max\left[4{,}25\ p\ \frac{R_{1,f}}{R_{min,f}}; 4{,}25\ p\ \frac{R_{2,f}}{R_{min,f}}\right] = 4{,}25\ p \max[1{,}025; 1{,}029] = 35\ bar$$

per il passante in PRFV il valore minimo di scoppio dato dalla Regola VSR.8.B.2.2b era:

$$p_{scoppio} = 4{,}25\ p\ \frac{R_{PRFV}}{R_{min,PRFV}} = 4{,}25\ p\ 1{,}26\ =\ 42{,}84\ bar$$

L'esecuzione della prova idraulica spinta fino a rottura sull'isolatore avrebbe dunque dovuto prevedere il superamento di 35 bar per la validazione – secondo la regola VSR.8.B.2.2c – della stabilità delle flange; e il superamento di 42,84 bar per la validazione – secondo la regola VSR.8.B.2.2b – del passante in PRFV. Tuttavia, superati i 35 bar e non ancora raggiunti i 42,84 bar, le flange avrebbero potuto cedere facendo fallire la prova per l'intero isolatore.
D'altro canto, in base alla (3) già riportata nel lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione",

$$p_{rott} = \frac{2\,R_{circ}\,t}{D_i}$$

con $R_{min,PRFV} = 230\,MPa$, la pressione critica (teorica) del passante risultava pari a 17,92 MPa, ossia più di 20 volte maggiore della pressione di progetto P = 8 bar.
Analogamente, in base alla (6) già riportata nel lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione", anche con un coefficiente di sicurezza che avesse tenuto conto di tutti i fattori *K* di riduzione – da cui $f = R/10{,}886$ – lo spessore minimo di parete in corrispondenza di una pressione di progetto di 8 bar avrebbe dovuto essere 2,92 mm, contro i 6 mm di progetto.

$$t \geq s_{circ} = \frac{p\,D_i}{2f_{circ}}$$

Ancora: una pressione critica di 17,92 MPa, pari a 22,4 volte la pressione di progetto, assicurava che in condizioni di progetto anche la tensione al raggio interno del materiale, calcolabile con la (2b) già riportata nel lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione"

$$\sigma_\theta = p\frac{D_i}{2t} = 10{,}27\,MPa$$

fosse 22,4 volte inferiore alla $R_{min,PRFV} = 230\,MPa$ dichiarata per il materiale e ben al di sotto della tensione massima ammissibile richiesta dalla PRFV:

$$f_{circ} = \frac{R_{min,PRFV}}{SK} = \frac{230}{10{,}886} = 22{,}4\,MPa$$

anche nel caso peggiore di $SK = 10{,}886$.
In base a queste considerazioni – ossia potendo ritenere il passante in vetroresina capace di resistere bel oltre i 42,84 bar richiesti dalla VSR.8.B.2.2b – nella prova idraulica spinta fino a rottura si sono considerati solo i rapporti

$$\frac{R_{1,f}}{R_{min,f}} \qquad \text{e} \qquad \frac{R_{2,f}}{R_{min,f}}$$

delle flange e il suo esito è stato ritenuto positivo già dopo il superamento dei 35 bar.

1.1.3 Simulazione agli elementi finiti

Nell'ambito dello stesso percorso omologativo – approfittando della collaborazione del fabbricante del contenitore e di una ricerca in corso di svolgimento [1] – sono state anche condotte simulazioni agli elementi finiti che hanno dato evidenza della

distribuzione delle sollecitazioni coerentemente con quanto riportato nella precedente parte del lavoro “Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione”.
Con il software *Dassault Systèmes Abaqus* è stato realizzato un modello 3D agli elementi finiti (FE) di campione anulare estratto da un passante in PRFV e sagomato ai fini dell’esecuzione di *ring test* secondo la EN 1394 che verrà descritta nel seguito.
È stato quindi simulato il comportamento del campione quando sottoposto a *ring test* [2]. I semi-dischi del set-up descritto nella EN 1394 metodo B sono stati modellati come superfici rigide analitiche discrete in modo tale da rappresentare il contatto fisico con la superficie interna del campione anulare. Ogni semi-disco è stato associato a un punto di riferimento che rappresenta la posizione in cui sono applicate le condizioni al contorno e da cui viene acquisita la forza di reazione risultante.
L’anello composito è stato modellato come un corpo solido continuo tridimensionale e discretizzato mediante elementi *shell* esaedrici continui a 8 nodi (SC8R), con integrazione ridotta e controllo avanzato del fenomeno di *hourglass* (distorsione numerica degli elementi finiti durante le simulazioni di carico o stress). La sequenza di laminazione dell'anello composito è stata discretizzata utilizzando un elemento per strato. È stata preliminarmente eseguita un'analisi di sensibilità per determinare le dimensioni appropriate degli elementi, affinché i risultati fossero indipendenti dalla *mesh*. L'anello è stato infine discretizzato utilizzando elementi di 0,5 mm × 0,5 mm, con un affinamento a 0,3 mm × 0,3 mm nelle aree intagliate.
Per simulare accuratamente la risposta meccanica dell'anello composito, è stato utilizzato un modello elastico-lineare ortotropo che include il criterio di Hashin [3, 4] per prevedere l'inizio, la propagazione e l'interazione dei meccanismi di danneggiamento del materiale.

1.1.4 Effetto del rapporto tra diametro e spessore degli anelli

Il modello agli elementi finiti ora descritto è stato utilizzato [5] per confrontare le deformazioni e lo stato tensionale simulati con quelli misurati eseguendo i *ring test*.
Avendo ottenuto risultati reali sovrapponibili a quelli simulati (Fig. 2), lo stesso modello è stato utilizzato anche come strumento previsionale della pressione di scoppio di componenti con differente rapporto tra diametro e spessore.

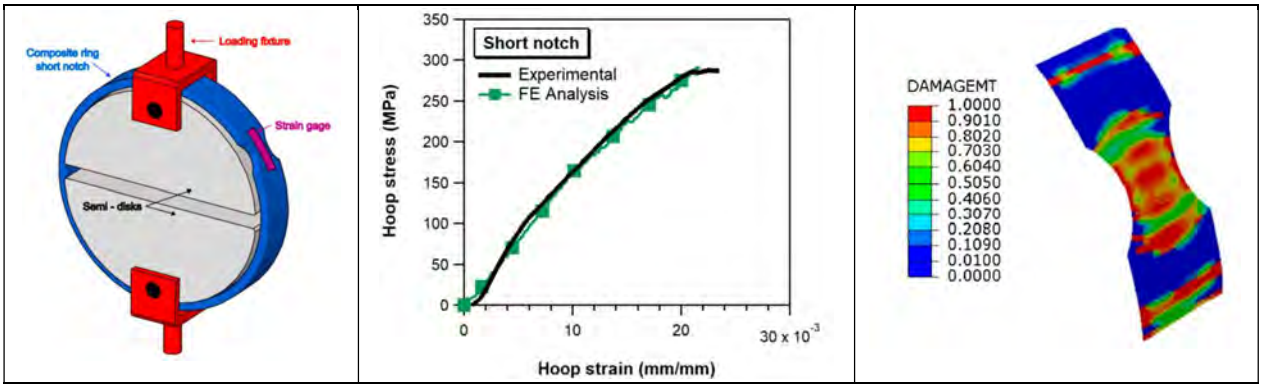


Figura 2. Sovrapposizione delle deformazioni misurate e di quelle simulate

Sono state condotte simulazioni FEM su un anello privo dei *notch* richiesti dalla EN 1394 metodo B, mantenendo costante lo spessore e variando il diametro interno. La stratificazione e il materiale sono rimasti invariati, utilizzando il modello di materiale Hashin per simulare il collasso degli elementi al raggiungimento dei limiti di rottura. L'anello è stato portato in pressione fino allo scoppio, simulando direttamente l'azione della pressione interna anziché quella dei semi-dischi.
La Tabella 1 riporta il valore della resistenza a trazione simulata in condizioni di rottura (stress ultimo), la pressione di scoppio corrispondente in funzione del valore del diametro interno e, con riferimento al diametro degli isolatori oggetto dell'omologazione, la variazione della resistenza a trazione circonferenziale a rottura: si può vedere come, a parità di materiale, spessore e sequenza di stratificazione, gli anelli con maggiore rapporto D_i/t hanno una resistenza leggermente più alta con una variazione dello stress di scoppio minima per grandi diametri.

D_i [mm]	t [mm]	D_i / t	Stress ultimo [MPa]	Variazione [%]	Pressione di scoppio [MPa]
77	6	12,8	252	-6,32	36
154	6	25,7	269	0,00	20,4
308	6	51,3	273	+1,49	11,1
426	6	71	274	+1,86	7.83

Tabella 1. Valori di stress ultimo e pressione di scoppio simulati

La Tabella 2 riporta i valori di stress nella posizione di raggio interno e raggio esterno del multistrato, determinati in base all'equazione di Lamé, confrontati con il valore dello stress ultimo determinato come 'medio di parete' in corrispondenza della pressione di scoppio.

D_i [mm]	t [mm]	D_i / t	Stress raggio esterno [MPa]	Stress raggio interno [MPa]	Stress ultimo [MPa]
77	6	12,8	229,3	267,8	252
154	6	25,7	254,7	254,7	269
308	6	51,3	257,7	257,7	273
426	6	71	274,1	274,1	274

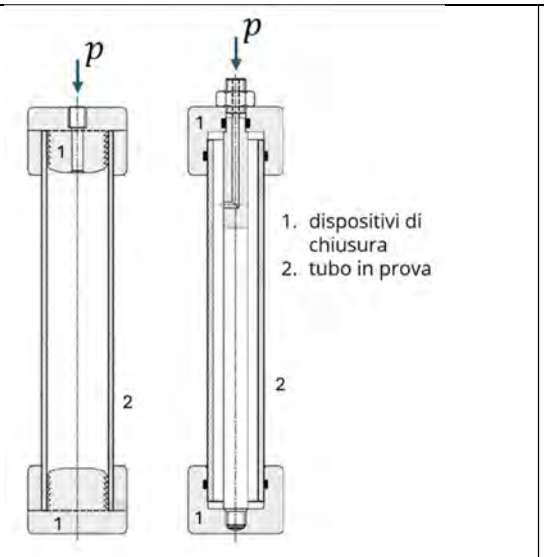
Tabella 2. Stress a raggio esterno e interno in corrispondenza dello stress ultimo a raggio medio

Si noti come le differenze tra interno ed esterno si annullano per rapporti $D_i/t \geq 25$ coerentemente con la condizione di 'parete sottile' che si ha per $t < 20\ D_i$.

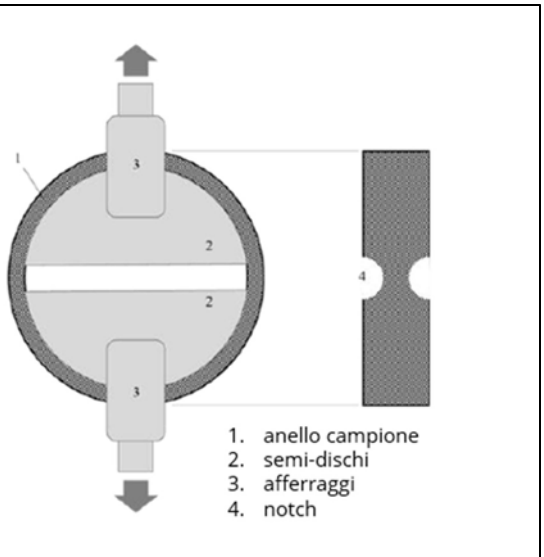
2. La UNI EN 1394 per la misura della resistenza a trazione circonferenziale

Da tutto quanto fin qui descritto risulterà evidente la necessità di misurare la resistenza a trazione circonferenziale dei multistrati con cui vengono realizzate le membrature di profilo circolare in composito: che si tratti di tubazioni o di recipienti, a valle della modellazione del multistrato effettuata dal fabbricante – seguendo la Teoria Classica della Laminazione (CLT) e regole simili alle (5) già riportate nel lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione" – chi si trova a dover certificare o omologare

membrature, deve poter disporre di caratteristiche, finanche macroscopiche, da confermare o confutare con metodi semplici.
A tale proposito si può fare riferimento alla UNI EN 1394 "Determinazione della resistenza a trazione circonferenziale di tubi in materiale termoindurente rinforzato con fibre di vetro (PRFV)". Per la determinazione della resistenza a trazione circonferenziale la UNI EN 1394 propone sei diversi metodi: mediante pressurizzazione idraulica di cilindri completi fino a rottura (metodo A); oppure mediante di trazione di provini circolari (*ring test* - metodo B); oppure mediante trazione di provini curvi in forma di strisce ritagliate dalla parete dei tubi nelle direzione circonferenziale (metodi C-D-E); oppure mediante prove su piastre intagliate ritagliate dalla parete dei tubi (metodo F). Tralasciando i metodi C-D-E-F poiché di difficile applicazione per via degli adattatori e dei sistemi di afferraggio richiesti, sia il metodo A sia il metodo B (Fig. 3) permettono di calcolare la tensione circonferenziale equivalente al momento della rottura assumendo uno stato di sollecitazione di membrana e mediante le relazioni classiche per cilindri sottili.
Il metodo A fornisce misure assai attendibili della resistenza a trazione circonferenziale poiché riproduce nel tubo-campione la sollecitazione reale pressurizzandolo fino a rottura e determinando la R ultima in base alla (2b) già riportata nel lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione": $\sigma_\theta = p\, D_i/2t$. Il metodo B invece, riproduce lo schema semplificato di Mariotte già riportato nella Fig. 1b del lavoro "Stabilità di membrature con profilo circolare realizzate in vetroresina – teorie di calcolo ai fini della progettazione" e misura la R in base alla relazione $\sigma_\theta = 2F_{ultima}/b$ dove b è la larghezza di gola del notch.



Metodo A



Metodo B

Figura 3. Schemi sperimentali proposti dalla UNI EN 1394

Il metodo B risente del fatto che le fibre dell'anellino campione, senza la 'complicità' del resto del tubo, partecipano alla resistenza a trazione del multistrato con la sola componente circonferenziale della loro resistenza, ovvero con il $\sin\Theta$ dell'angolo Θ

con cui sono avvolte. Per cui, le fibre degli strati che hanno direzione di avvolgimento molto circonferenziale riescono a opporre alla trazione circonferenziale una resistenza elevata; viceversa, le fibre degli strati che hanno direzione di avvolgimento molto assiale (avvolgimenti a spirale, tubi cosiddetti *bending*, angoli con l'asse di rotazione $\Theta < 65°$) riescono a opporre alla trazione circonferenziale resistenza minore (Fig. 4).

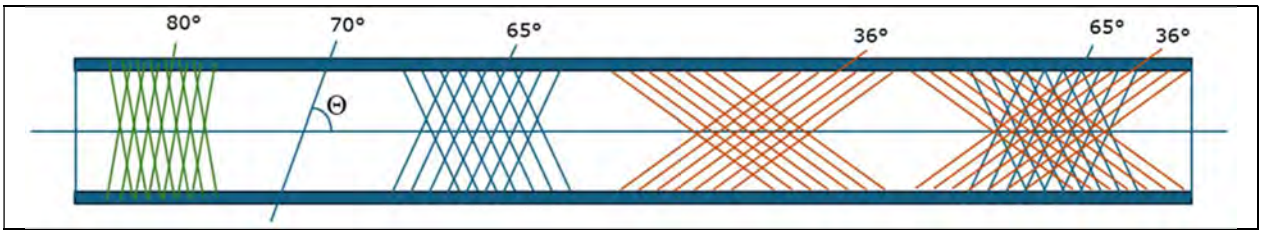


Figura 4. Angoli di avvolgimento delle fibre di rinforzo

Pertanto, nei tubi cosiddetti *pressure*, realizzati proprio per quei casi in cui la sollecitazione dovuta alla pressione interna è considerevole e dove un numero significativo degli strati è ottenuto avvolgendo le fibre con angoli $\Theta > 70°$, la misura della resistenza a trazione circonferenziale del multistrato eseguita con il metodo B è praticamente la stessa di quella che si otterrebbe con il metodo A. Viceversa, nei tubi cosiddetti *bending*, realizzati per quei casi in cui la sollecitazione prevalente è dovuta a flessione (per effetto del vento o del peso di altri componenti) e dove un numero significativo di strati è ottenuto avvolgendo le fibre 'a spirale', con angoli $\Theta < 70°$, la misura della resistenza a trazione circonferenziale del multistrato ottenuta con il metodo B è minore di quella che si otterrebbe con il metodo A.
Considerando che il metodo A – più attendibile in termini di caratteristiche misurate – richiede di portare a rottura dei tubi-campione con prove idrauliche che possono, eventualmente, anche dover raggiungere centinaia di bar, non è di semplice o sicura esecuzione, il metodo B – pur meno attendibile nella misura della resistenza a trazione – ne fornisce comunque un valore sottostimato e dunque cautelativo per le valutazioni eventualmente richieste in sede di collaudo.
Quale che sia il metodo utilizzato, la misura della resistenza a trazione circonferenziale mediante la UNI EN 1394 rappresenta una proprietà meccanica 'equivalente' del multistrato a scala di componente, che tiene implicitamente conto della stratigrafia, del processo produttivo e dei meccanismi di danneggiamento reali dovuti alla minore resistenza della matrice di resina epossidica: non ha la pretesa di misurare caratteristiche reali dei materiali, ma offre un dato sperimentale particolarmente idoneo all'impiego nelle verifiche previste dalle norme specifiche per PRFV, quali EN 13121-3 e ISO 14692, nonché nella calibrazione e validazione di modelli numerici agli elementi finiti basati su elementi *shell* multistrato.
In particolare, il metodo B permette di stimare – eventualmente 'sottostimare' – la resistenza a trazione circonferenziale del multistrato tubolare, semplicemente adattando gli afferraggi delle macchine per prove di trazione.

3. Conclusioni

Quanto emerge è che, al di là delle differenti impostazioni teoriche (basate o meno sulla CLT), tutte le norme considerate (nella prima parte del lavoro) riconducono, in ultima analisi, alle medesime equazioni di equilibrio delle membrature cilindriche sottili. In particolare, la relazione di Barlow per la tensione circonferenziale costituisce il riferimento fisico comune sotteso sia agli approcci più rigorosamente laminari, sia a quelli di tipo macroscopico.

Questo aspetto evidenzia come la differenza tra i vari codici di calcolo non risieda tanto nella statica di base del problema, che è la stessa, quanto nel modo in cui viene rappresentato il materiale: isotropo equivalente nei modelli classici, ortotropo stratificato negli approcci basati sulla CLT.

Ne consegue che, in fase di verifica rapida o di primo dimensionamento, laddove sia fondamentale disporre di uno strumento di calcolo semplice, immediato ma al tempo stesso robusto, l'impiego della formula di Barlow può risultare ancora tecnicamente giustificato anche per componenti in PRFV, a condizione di introdurre opportuni margini di sicurezza. L'utilizzo di coefficienti globali elevati, significativamente maggiori di quelli adottati per materiali isotropi (anche dell'ordine di 5 come previsto dalla UNI EN 13121 per le prove spinte fino a scoppio, o superiori come richiesto dalla Raccolta ISPESL PRFV), consente infatti di compensare l'anisotropia del materiale, la variabilità del processo produttivo, le incertezze sulla ripartizione reale delle tensioni nel laminato, le approssimazioni insite nel modello isotropo equivalente.

In questa prospettiva, la formula di Barlow non deve essere interpretata come uno strumento di progetto "fine", ma come una relazione ingegneristica di controllo, utile per verifiche preliminari, stime conservative, confronti rapidi tra diverse configurazioni geometriche, validazione di ordini di grandezza dei risultati più avanzati.

Essa conserva quindi un ruolo operativo rilevante anche nel contesto dei materiali compositi, purché il suo impiego sia accompagnato da una consapevole valutazione dei limiti del modello e da coefficienti di sicurezza adeguatamente cautelativi. Questo approccio consente di coniugare semplicità di calcolo e affidabilità tecnica, mantenendo un legame diretto tra la fisica del problema e gli strumenti normativi disponibili.

Bibliografia

[1] Ferino J, Mazzarelli I, Meleddu A, Pichini E. - Progettazione e fabbricazione di attrezzature a pressione in composito: proposte per la caratterizzazione e l'accettazione dei materiali - Atti del convegno SAFAP – 16-18 novembre 2021 - isbn 9788874847099

[2] Ferino J, Mazzarelli I, Meleddu A, Pichini E. - Caratterizzazione e accettazione di materiali in composito per attrezzature a pressione: setup della procedura sperimentale e primi risultati - Atti del convegno SAFAP - Brescia – 22-24 novembre 2023 - isbn 9788874848287

[3] Hashin Z. - Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites - *J. Appl. Mech*. 1980, 47, 329–334. https://doi.org/10.1115/1.3153664
[4] Hashin Z, Rotem A. - A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials - *J. Compos. Mater*. 1973, 7, 448–464, https://doi.org/10.1177/002199837300700404
[5] Ferino J, Loi G, Meleddu A, Aymerich F, Mazzarelli I, Pichini E. - Strength of Composite Pressure Insulators for High Voltage Circuit Breakers: An Experimental and Numerical Investigation - *Materials* 2024, 17, 2741. https://doi.org/10.3390/ma17112741

Sistemi iperbarici itineranti: rischi da atmosfere iperbariche, soluzioni tecniche e certificazione di prodotto

I. Mazzarelli[1], I. Ferrara[1], N. Visalli[2]

[1]Inail - UOT di Napoli
[2]Società NEMO

Sommario
Le attività lavorative in atmosfere iperbariche espongono i lavoratori a rischi per la salute e sicurezza. Il d.lgs. 81/08, Titolo VIII-art. 180, inserisce tali condizioni ambientali tra gli agenti fisici che il Datore di Lavoro ha l'obbligo di valutare per l'adozione di misure di prevenzione e protezione. Si propone un'analisi dal punto di vista tecnico-normativo delle soluzioni adottate per la realizzazione e la certificazione PED, nonché degli adempimenti previsti per la messa in servizio e l'esercizio dei sistemi iperbarici itineranti, inseriti in appositi container integrati con impianti e accessori di sicurezza, protezione e controllo, e trasferibili mediante autocarri. I lavori di escavazione nei tunnel (TBM, EPB), o le attività subacquee, vengono svolti in ambienti iperbarici, ovvero, con pressione del 10% superiore alla pressione atmosferica[1]. L'esposizione dei lavoratori a queste pressioni comporta rischi per la salute e sicurezza, con effetti di tipo acuto e cronico, con conseguenze più o meno gravi, dall'irritazione cutanea alla morte. Per la gestione e il controllo di tali attività risulta fondamentale la disponibilità, nelle immediate vicinanze, di una camera iperbarica per il trattamento e il soccorso tempestivo degli operatori.

1. Introduzione

L'art. 180, Titolo VIII, del d.lgs. 81/08 introduce tra i rischi fisici il rischio da esposizione ad atmosfere iperbariche, a cui sono esposti i lavoratori che svolgano la loro attività in condizioni ambientali in cui la pressione sia superiore del 10% rispetto a quella a livello del mare. Si intendono, quindi, lavoratori impegnati in attività iperbariche subacquee, in attività di escavazione nei tunnel, e coloro che siano impegnati nelle camere iperbariche sia per assistenza ai pazienti, sia per interventi tecnici. In questo ultimo caso specifico, in ambito sanitario, si parla di atmosfere iperbariche in riferimento agli ambienti, camere iperbariche, in cui i pazienti, che ne abbiano necessità, respirano ossigeno puro (o miscele gassose iperossigenate) a pressione superiore a quella atmosferica, attraverso maschere, caschi o tubi endotracheali. Le camere iperbariche vengono utilizzate come trattamento per alcune patologie, sfruttando la ossigenoterapia iperbarica (OTI) per l'ossigenazione di sangue e tessuti. L'esposizione professionale ad ambienti iperbarici è un rischio lavorativo che il datore di lavoro deve valutare, con la collaborazione di tutte le figure del sistema salute e sicurezza, con particolare riferimento alla figura del medico competente, in quanto si rende necessaria la comprensione di tutti gli effetti sulla salute dei lavoratori, fisici,

psichici, cognitivi. Le malattie connesse a queste condizioni di lavoro possono essere di tipo acuto e cronico e causare conseguenze sulla salute dei lavoratori più o meno gravi, temporanee o permanenti. Per una valutazione accurata dei rischi, per la prevenzione e per la protezione degli addetti a questo tipo di attività, è importante individuare sintomi e segni di condizioni di salute correlabili alle atmosfere iperbariche, e le potenziali complicanze, quali il barotrauma, la malattia da decompressione, la tossicità dell'ossigeno, l'embolia gassosa. Allo stesso modo risulta fondamentale l'aspetto organizzativo, nonché di formazione e informazione di tutti i lavoratori e di tutte le figure coinvolte. L'utilizzo stesso delle camere iperbariche come trattamento contro gli effetti dannosi di determinate attività lavorative svolte in ambienti a pressioni sfavorevoli, può comportare una serie di rischi per la salute e sicurezza, sia per il personale esperto che opera con e nelle camere iperbariche, sia per i lavoratori/pazienti che ne devono far uso medicale. Le controindicazioni principali all'utilizzo come trattamento terapeutico riguardano i rischi legati a pressione e ossigeno cui si viene sottoposti, tossicità da ossigeno, nonché condizioni legate all'assunzione di farmaci, patologie preesistenti, e problemi di claustrofobia. Per quanto attiene alla sicurezza delle procedure e dell'attrezzatura, risultano fondamentali controlli e sistemi antincendio, utilizzo di indumenti in cotone e formazione aggiornata su aspetti sia tecnici che operativi.

2. Uso delle camere iperbariche

L'impiego delle camere iperbariche containerizzate (o standard) in Italia prevede una specifica qualificazione del personale (medici, tecnici di camera), tramite corsi specialistici e Master universitari, nonché specifiche qualificazioni per manutentori.
In ambito sportivo e professionale la camera iperbarica si usa in seguito ad immersioni profonde o prolungate per la ricompressione e la decompressione controllata, per evitare la Malattia da Decompressione; in caso di embolia gassosa o sintomi di MDC come terapia d'urgenza, per il ripristino di una corretta pressione, favorendo il riassorbimento delle bolle di azoto. Per sommozzatori professionisti e militari, spesso sono previsti modelli portatili o installati su navi. Questi sistemi itineranti consentono di ovviare, in molti casi, alle difficoltà legate agli spostamenti in aereo, quale la diminuzione progressiva di pressione atmosferica verso le alte quote e relativo rischio di accelerazione dell'insorgere di embolie. La presenza della camera iperbarica, in questi casi, è indispensabile soprattutto considerando la lontananza o l'inesistenza di centri iperbarici presso i luoghi di operazione. Le camere iperbariche multiposto con camera di equilibrio consentono l'ingresso di personale tecnico specializzato in qualsiasi momento del trattamento, sono collegate a bombole di aria compressa respirabile, e sono dotate di scorte accessorie di ossigeno ed elio. Con il progresso tecnologico nel campo delle immersioni professionali, le camere iperbariche hanno trovato largo utilizzo nelle immersioni in saturazione che impiegano il sub in attività lavorative per diversi giorni a profondità notevoli. In questi casi le camere di decompressione, o meglio le stazioni iperbariche, sono dotate di

una tipologia di abitazione, solitamente sistemata sulla nave appoggio, collegata con campana pressurizzabile di trasporto al fondo marino, in modo da consentire l'effettuazione di una sola decompressione alla fine del ciclo di operazioni. La presenza di ossigeno in alte concentrazioni in un ambiente iperbarico espone l'ambiente al rischio da incendio. Un incidente connesso a questo rischio è spesso mortale, a causa dello spazio ristretto della camera e l'impossibilità di aprire rapidamente il portello, tenuto bloccato dalla pressione interna. La camera iperbarica, quindi, viene riempita con normale aria compressa e non con ossigeno puro. L'ossigeno, se somministrato, viene fornito tramite mascherine o erogatori a richiesta molto simili a quelli dei subacquei. Il pericolo maggiore, nell'utilizzo di un'atmosfera di ossigeno, è rappresentato dall'introduzione di oggetti in grado di generare fiamme o scintille, come abiti o coperte di materiale sintetico, che per sfregamento generano elettro staticità e, quindi, fiamme. Tutte le attrezzature mediche eventualmente necessarie (defibrillatori, elettrocardiografi, rianimatori, ecc.) devono essere progettate e costruite in modo da non produrre scintille. Il sistema di illuminazione esterno proietta la luce all'interno attraverso speciali oblò. L'umidità dell'aria viene mantenuta alta per ridurre l'accumulo di cariche elettrostatiche. Le procedure predisposte per ridurre il rischio di incendio comprendono: riduzione al minimo della quantità di ossigeno nella camera, attraverso un sistema di recupero dell'espirato, per eliminare, al di fuori della camera, l'ossigeno espirato; controllo degli oggetti introdotti dai pazienti per l' individuazione di tracce anche minime di prodotti di combustione; divieto assoluto per i pazienti di indossare abbigliamento sintetico e di oggetti che possano produrre una combustione, ad esempio accendini. A scopo precauzionale, inoltre, sono vietati all'interno anche telefoni cellulari, orologi non subacquei, chiavi, torce e, in genere, dispositivi a batteria.

I lavori in condizioni estreme, attività subacquee, escavazione nei tunnel, comportano una serie di rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori, tra i quali anche quelli connessi agli aspetti psicologici e sociali. Queste attività lavorative implicano per i lavoratori lunghi periodi di confinamento in camere iperbariche, per giorni o settimane, includendo l'intero iter di fasi di compressione, permanenza in profondità e fasi di decompressione. L'ambiente in cui si svolge questa lunga permanenza è caratterizzato da mancanza di privacy, riduzione di contatti sociali e relazionali, e da uno stato di noia causato dalla mancanza di stimoli e di interazioni umane che esulino da quelle con individui del team. Alcuni studi evidenziano la caratteristica stressante di questi ambienti lavorativi, sottolineando quanto risposte acute ad elevati livelli di ansia possano essere ricondotte a tratti di personalità dei singoli individui, quali per esempio, basso autocontrollo, mancanza di adattamento personale, e difficoltà relazionali di efficace partecipazione e coinvolgimento con i colleghi e il team, e possano essere considerate transitorie[2]. Queste riflessioni non conducono ad una sottostima degli aspetti socio-psicologici connessi ad attività lavorative in condizioni estreme, piuttosto sostengono la necessità che l'approccio alla valutazione dei rischi,

alla prevenzione e alla protezione per i lavoratori, sia condotto ponendo l'accento anche sulle caratteristiche individuali, sui tratti personali e relazionali, sui rapporti di coinvolgimento e partecipazione sia a livello personale, che di team, che organizzativo negli ambienti di lavoro. Anche i piani di intervento e cura per i disturbi legati alle attività in condizioni iperbariche devono basarsi sulla personalizzazione, in base a singoli fattori di rischio, caratteristiche di miglioramento del paziente, e riconoscimento precoce di segnali di allarme. Si evidenzia ancora, quindi, l'importanza della collaborazione interprofessionale per migliorare la sicurezza delle attrezzature, degli ambienti, le misure preventive e di protezione, nonché i trattamenti che riducano al minimo gli effetti avversi.
Con il miglioramento delle misure di sicurezza, di controllo, monitoraggio sulle camere iperbariche, sia fisse che itineranti, si presentano e si rinforzano le possibilità di un loro uso terapeutico non solo specifico in riferimento ai rischi per determinate attività lavorative, ma anche per altre tipologie di interventi curativi per diversi disturbi.

3. Descrizione dei sistemi iperbarici

I sistemi iperbarici realizzati dal fabbricante, oggetto del presente studio, sono di due tipi, come meglio descritti al paragrafo 3.1 - Sistema iperbarico con camera installata direttamente sull'autotelaio di un autocarro e 3.2 - Sistema iperbarico con camera installata in container; in quest'ultimo caso il vantaggio è di poter utilizzare il sistema iperbarico senza dover mantenere connessa la motrice del mezzo che la trasporta tra un luogo ed un altro. Tali sistemi sono, quindi, stazioni itineranti, o containerizzati, o installati direttamente su autocarri di grandi dimensioni.
L'utilizzo primario è rivolto al normale trattamento iperbarico di decompressione; sono idonee anche per eventuali interventi su embolizzati, con traumi e ferite intervenute durante una immersione o lavori in ambienti iperbarici.

3.1 Sistema iperbarico su autotelaio

Il primo sistema, come detto, è installato sul telaio retrostante la cabina di guida dell'autocarro, allestito con pannelli di chiusura coibentati con porte di accesso e diviso in 2 comparti climatizzati (1 per la camera e 1 per le bombole di accumulo aria respirabile). Il primo comparto è costituito da una camera iperbarica multiposto (fino a 12 + camera di equilibrio con postazione dell'operatore iperbarico) nella quale viene utilizzato come fluido terapeutico esclusivamente aria respirabile e, pertanto, classificato dalla Direttiva PED[3] quale fluido non pericoloso di gruppo 2. Tale fluido viene fornito alla camera iperbarica da un gruppo di bombole di accumulo della capacità di 140 litri ciascuna (6x140 litri), collegate in serie e alimentate da apposito compressore ad alta pressione per aria respirabile che, grazie a sistemi avanzati di filtrazione e tecnologie idonee, garantisce affidabilità e massima sicurezza dal punto di vista sanitario. Tali elementi, bombole e compressore, sono ubicati nel secondo

comparto rispettivamente in appositi vani, esclusivamente dedicati, ricavati a bordo dell'autotelaio dell'autocarro.
Il sistema complessivo è provvisto di strumentazioni di gestione e monitoraggio adeguate, disponibili direttamente nel comparto della camera iperbarica, e di impianti di comunicazione audio e visiva tra l'interno della camera stessa e l'esterno. Il sistema è dotato di accessori di sicurezza (valvole di sicurezza e dischi di rottura), protezione e controllo (solo in parte automatizzati), gestiti dall'operatore iperbarico autorizzato attraverso il pannello di controllo ubicato in adiacenza alla camera iperbarica, ovvero nello stesso vano/comparto dedicato. Per gli accessi dei pazienti e degli operatori, nell'allestimento dell'autocarro, sono state predisposte una scaletta a pioli retraibile e una pedana auto sollevante per i casi di pazienti in barella, che garantiscono un livello di sicurezza adeguato durante la salita e la discesa delle persone dall'autocarro. Per la camera iperbarica, in cui si utilizza esclusivamente aria respirabile e, quindi, fluido di gruppo 2, non è previsto un vero impianto di estinzione incendio ma l'uso di estintori portatili. Questo sistema richiede l'identificazione di un'area idonea, resa sicura nell'ambito dell'attività lavorativa, per l'ubicazione dell'autocarro in sosta, per il suo utilizzo, e per le eventuali operazioni d'emergenza. Nonostante queste indicazioni, risulta molto pratico e versatile, in quanto non necessita di ulteriori apprestamenti o apparecchi (a differenza delle camere containerizzate) per l'installazione in loco.

3.2 Sistema iperbarico containerizzato

Questo sistema è costituito da una camera iperbarica di minori dimensioni rispetto al caso già esaminato e installata all'interno di apposito container con pannellatura coibentata e provvisto di sistema di climatizzazione.
I principi d'installazione sono del tutto simili al caso precedente con la differenza che la camera iperbarica containerizzata, sempre multiposto (fino a 6 posti, con l'aggiunta di una camera di equilibrio con postazione dell'operatore iperbarico), può utilizzare quali fluidi terapeutici oltre l'aria respirabile, anche l'ossigeno, che è fluido comburente di categoria 1 secondo la dir. PED.
In tale container è previsto anche il sistema di controllo e supervisione, nonché sistemi di estinzione di eventuali incendi evidentemente accelerati dalla compresenza di sostanze combustibili e comburenti.
Per tal motivo, è stato allestito un secondo container di supporto in cui sono stati installati sia il sistema di alimentazione dell'aria respirabile per la camera iperbarica (compressore e serbatoio di accumulo), sia il gruppo ad acqua pressurizzata per l'impianto antincendio, compartimentati in due zone distinte. Su entrambi i container sono state predisposte le apposite piastre di collegamento con gli innesti dei tubi flessibili ad alta pressione, innesti da effettuarsi in loco tra i due container. In sostanza, l'intero insieme sistema iperbarico è costituito da tre unità impiantistiche distinte: *Unità 1* – Impianto di pressurizzazione con accumulo dell'acqua quale mezzo di estinzione per il sistema antincendio installato in apposito comparto del container

denominato B; *Unità 2* – Impianto di produzione dell'aria respirabile con compressore e serbatoio di accumulo per la fornitura del fluido terapeutico alla camera iperbarica, installato nel secondo comparto dedicato dello stesso container B; *Unità 3* - Camera iperbarica provvista di tutti gli accessori di sicurezza, protezione e controllo (solo in parte automatizzati), gestiti dall'operatore iperbarico autorizzato attraverso il pannello di controllo ubicato in adiacenza alla camera iperbarica, ovvero nello stesso container dedicato, denominato container A. Per quanto riguarda l'approvvigionamento dell'ossigeno, nel caso di utilizzo della camera iperbarica in ossigenoterapia, il fabbricante ha previsto l'utilizzo di fonte esterna mediante pacchi bombola dotati di relativo sistema di riduzione della pressione; la scelta è dettata sia da motivi di spazio insufficienti nei container, sia dal fatto che il trasporto di recipienti contenenti ossigeno richiederebbe un più adeguato allestimento e ulteriore certificazione per il trasporto di merci pericolose su strada secondo la Direttiva ADR, operazioni che risulterebbero troppo onerose per il fabbricante. I sistemi di collegamento previsti, permettono comunque di poter utilizzare il solo container A, ovviando all'utilizzo del container B con sistemi e impianti di approvvigionamento dei fluidi di esercizio (aria respirabile/ossigeno e acqua) reperibili o realizzati in loco, rendendo così il sistema più flessibile in considerazione anche dell'eventuale risparmio economico per il trasporto del secondo container. Il fabbricante nel manuale d'uso ha fornito tutte le indicazioni necessarie per l'idonea installazione in loco dei due container (preparazione delle aree d'installazione ed allacciamenti e connessioni impiantistiche eventualmente a carico dell'utente).

4. Analisi tecnico-normativa per la certificazione di prodotto del sistema Iperbarico itinerante

Le camere iperbariche ("monoposto" o "multiposto standard") in quanto attrezzature a pressione sono soggette alla dir. PED, oltre che alla dir. Macchine i cui cenni sono riportati al paragrafo 4.2 solo per quanto attiene la valutazione della conformità ed alcuni RES.

Tutte queste direttive prevedono il rispetto di puntuali requisiti essenziali di sicurezza (RES), non esistendo una norma specifica (di tipo verticale) per una camera iperbarica intesa come un'unica macchina o insieme a pressione dovranno essere applicate numerose norme armonizzate o meno alle rispettive Direttive, alcune citate nell'articolo[4]; tuttavia occorre tener conto che tali sistemi rientrano nel campo di applicazione del Regolamento UE 2017/745 (MDR), e che per essi si applica la norma UNI EN 14931[5]. Tali norme trattano le soluzioni tecniche a seconda del requisito essenziale di sicurezza affrontato.

Le camere iperbariche non sono contemplate in allegato IV della Direttiva Macchine pertanto si può applicare l'allegato VIII (autocertificazione del fabbricante), mentre dati i volumi e le pressioni in gioco generalmente rientrano nella IV categoria di rischio della dir. PED. In quest'ultimo caso è necessaria una valutazione della conformità effettuata da un Organismo Notificato (di seguito ON), che verifica la progettazione,

la scelta dei materiali, la fabbricazione ed il controllo/ispezione, nonché l'esame degli accessori di sicurezza nel caso di certificazione di insieme applicato al caso esaminato, sulla base del fascicolo tecnico predisposto dal fabbricante. È stata applicata la procedura globale della valutazione della conformità prevista dall'art. 10 comma 6 del d.lgs. 93/2000.

4.1 Percorso di conformità per l'insieme PED – Direttiva 2014/68/UE

In accordo con l'ALLEGATO II, ART. 2, della DIRETTIVA 2014/68/UE, è stato considerato un insieme comprendente almeno un'attrezzatura a pressione (camera) e gli accessori di sicurezza previsti dalla PED, per il quale sono valutati i rischi ed i pertinenti requisiti essenziali di sicurezza enunciati nell'allegato I.
Per entrambe le soluzioni tecniche le camere hanno una PS pari a 6 bar e volumi non inferiori a 10000 litri, pertanto i recipienti definiti all'art. 2, punto 6, e oggetto dell'art. 4, paragrafo 2, lettera b), sono classificati nella categoria IV sia se si applica la tabella 1 che la tabella 2 della PED (vedere figure 1a/b). Gli accessori di sicurezza definiti all'articolo 2, punto 4, e oggetto dell'articolo 4, paragrafo 1, lettera d), sono classificati nella categoria IV.
Per la classificazione del sistema iperbarico, in riferimento all' ALLEGATO II, ART. 4, DIRETTIVA 2014/68/UE, si fa riferimento alla tabella:

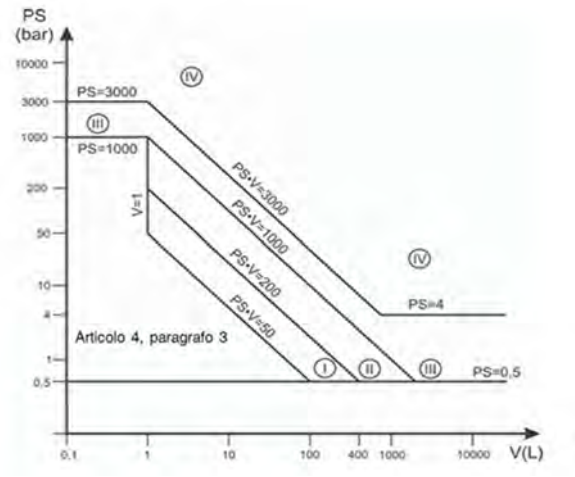


Figura 1a – Tabella 2 dir. PED
Sistema iperbarico su autotelaio o containerizzato solo con aria respirabile

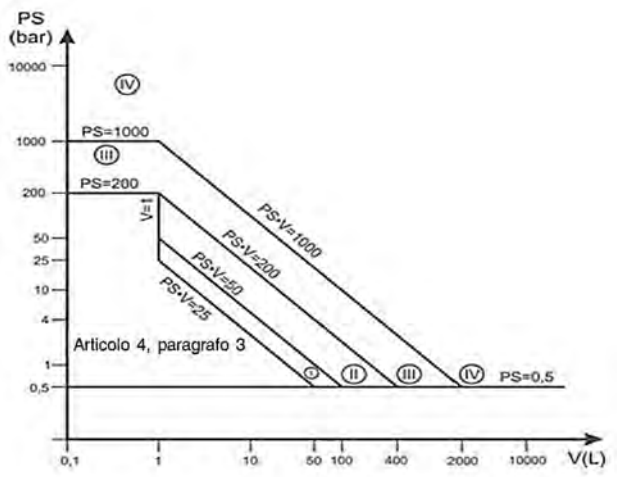


Figura 1b – Tabella 1 dir. PED
Sistema iperbarico containerizzato con aria respirabile ed ossigeno

Nel caso in esame (sistema iperbarico itinerante) per la procedura di valutazione della conformità è stato utilizzato il modulo G, anche se non esclusi altri moduli di valutazione per IV categoria, in tal caso trattandosi di un prodotto fabbricato in base ad esigenze specifiche indicate spesso dall'utente finale, risulta complessa l'applicazione di moduli basati sul tipo o sulla qualità data la notevole variabilità dei casi.

Il fabbricante ha predisposto tutta la documentazione tecnica necessaria e messa a disposizione dell'Organismo Notificato per la verifica della conformità ai RES pertinenti, comprensiva di adeguate analisi e valutazione dei rischi precisando le prescrizioni applicabili e includendo il progetto, la fabbricazione e il funzionamento dell'attrezzatura a pressione, nonché i dispositivi di protezione e gli accessori di sicurezza adottati.
In sede di fabbricazione, Il fabbricante ha attuato tutte le misure necessarie affinché il processo di fabbricazione e il suo controllo garantiscano la conformità dell'attrezzatura a pressione alle prescrizioni applicabili della dir. PED, in particolare ha predisposto un fascicolo tecnico composto da:

- Descrizione generale dell'insieme e suo funzionamento, inclusi i sistemi di sicurezza
- Disegni di progettazione e fabbricazione
- Calcoli di progetto per la verifica di stabilità alle condizioni di carico che in questo caso devono contemplate anche carichi specifici data la particolare tipologia di installazione e trasporto su automezzi
- Elenco delle norme applicate
- La valutazione del rischio
- Le soluzioni adottate qualora non si applichino norme armonizzate

La bontà dei processi di fabbricazione ed i relativi processi di ispezione e controllo del prodotto devono essere dimostrati, dalla documentazione relativa ai materiali, alle informazioni a norma dei punti 3.1.2 e 3.1.3 dell'allegato I della PED (processo di saldatura e saldatori), ai report di ispezione e controllo, inclusi quelli non distruttivi previsti dalle norme applicabili, di esami e prove, in particolare per i dispositivi di protezione ed accessori di sicurezza.
Il modulo G ha previsto l'approvazione del progetto da parte dell'ON scelto dal fabbricante, che lo ha effettuato sulla base dell'esame della documentazione tecnica relativa alla progettazione e ai processi di fabbricazione, oltre alle seguenti attività di esame e verifica della produzione:

- Acquisizione della documentazione relativa ai materiali (UNI EN 10204) in base al punto 4.3 dell'allegato I
- Verifica delle approvazioni per le giunzioni permanenti (qualifiche dei procedimenti di saldatura) e del personale (saldatori) di cui al punto 3.1.2 dell'allegato I; nel caso in esame le qualifiche erano state già rilasciate da altro ON della PED, obbligatorio nel caso di attrezzature di IV categoria. Le norme applicate sono state la EN 15614-1 ed EN 9606-1.
- Acquisizione dei report delle PnD e delle qualifiche degli operatori secondo EN 9712 prevista dal punto 3.1.3
- Esecuzione della prova idraulica prevista di cui al punto 3.2.2 dell'allegato I
- Gli esami e le prove, stabiliti dalle norme applicate dal fabbricante previsti rispettivamente dai punti 3.2.1 e 3.2.3 dell'allegato I.

4.2 Percorso di conformità DIRETTIVA 2006/42/CE (ART. 12)

Il fabbricante ha elaborato il fascicolo tecnico di cui all'allegato VII, parte A della Direttiva Macchine. Per la camera iperbarica containerizzata sono stati presi in considerazione i RES della dir. 2006/42/CE e principalmente: 1.1.2 Principi d'integrazione della sicurezza; 1.1.5 Progettazione della macchina ai fini della movimentazione; 1.2 Sistemi di comando; 1.2.4 Arresto; 1.3 Misure di protezione contro i pericoli meccanici; 1.4.2 Requisiti particolari per i ripari; 1.5 Rischi dovuti ad altri pericoli (energia elettrica e elettrostatica, incendio); eccetera[3].

4.3 La valutazione del rischio

Per tali sistemi si è tenuto conto dell'obbligo dettato dalle Direttive di prodotto di analizzare i pericoli e valutare il rischio (oltre che segnalare nei manuali d'uso i rischi residui). L'analisi dei pericoli e la valutazione dei rischi può essere svolta congiuntamente per la dir. Macchine e per la dir. PED e nel caso in esame è stato predisposto dal fabbricante un quadro sinottico che esplicita i RES pertinenti le due direttive e quelli comuni, utilizzando i principi della norma UNI EN 12100[4]. Sono stati considerati anche i rischi previsti ed i requisiti essenziali di sicurezza con riferimento ad altre Direttive applicabili non oggetto del presente lavoro.

Con riferimento alla figura 2 le fasi della valutazione hanno tenuto conto delle condizioni di progetto (fluidi e carichi previsti,), fabbricazione (processi) e prova sulla base dei materiali e degli accessori a pressione e di sicurezza adottati, dell'uso prevedibile (rischi in esercizio) , ivi incluse le manovre previste ed imponendo quelle vietate.

Si è tenuto conto di tutti gli elementi che caratterizzano la valutazione (utilizzo dell'attrezzatura, utenti finali, condizioni operative - pressione, temperature minime e max., livelli e portate, corrosione, condizioni e sollecitazioni esterne, esercizio, manutenzioni, usura). Per le camere installate su container dove è previsto l'impiego di fonti esterne per l'ossigeno sono stati valutati anche i rischi di assemblaggio ed integrazione del sistema bombola/camera iperbarica.

Il sistema di sicurezza è stato valutato mediante analisi SIL - Safety Integrity Level secondo la norma IEC 61508.



Figura 2. Criteri di valutazione del rischio per l'insieme PED

Per la fabbricazione sono state seguite le indicazioni esposte nei RES di cui all'Allegato I del d.lgs. 93/00, come modificato e integrato dal d.lgs. 15 febbraio 2016, n. 26, per i rischi corrispondenti (integrazione dei sottoinsiemi), nonché le norme armonizzate applicabili. Pertanto l'esame dei Rischi Residui (di seguito RR), individuati dalla valutazione del rischio, ha condotto alla definizione dei provvedimenti da adottare per rendere conforme il prodotto, fornendo all'utilizzatore precise informazioni sull'uso improprio e sui Rischi Residui, oltre che quanto previsto nel documento "istruzioni operative" previsto dal RES 3.4 della dir. PED e RES 1.7.4 della dir. Macchine. Pertanto la conformità dell'attrezzatura è garantita solo se la stessa viene utilizzata alle condizioni ragionevolmente previste dal Fabbricante. A seguito dell'analisi dei rischi dovuti alla pressione (temperatura, livelli, portate), connessi all'uso previsto dell'attrezzatura, la stessa è stata progettata (marchio CE separato per sottoinsiemi) e costruita tenendo conto di tale analisi anche sulla base di norme armonizzate applicabili, norme e rapporti tecnici. Alla valutazione sono state allegate delle check-list in cui sono stati elencati tutti i rischi certi e prevedibili, e per gli stessi viene indicata la misura di protezione adottata, qualora non sia stato possibile eliminarli o ridurli. Infine, nel fascicolo tecnico sono stati elencati i rischi prevedibili raggruppati in due famiglie entrambe riguardanti installazione, esercizio e manutenzione. Nella prima famiglia sono stati elencati quelli per i quali sono state adottate misure preventive già all'atto della progettazione, invece nella seconda, quelli per i quali nulla è possibile fare in progettazione e, pertanto, verranno ritenuti RR. Per i RR opportunamente individuati, sono state predisposte le avvertenze, gli obblighi e i divieti relativi all'uso dell'attrezzatura, indicazioni riportate anche nel Libretto d' uso e manutenzione.

4.4 Principio generale della valutazione del rischio applicato alla fabbricazione

Si è proceduto utilizzando il seguente Criterio generale di valutazione:
1) Definire il sistema; 2) Determinare i criteri di accettabilità (limiti ammissibili); 3) Identificare i pericoli; 4) Valutare la frequenza del pericolo; 5) Valutare le conseguenze; 6) Valutare il binomio frequenza – conseguenza (analisi del rischio); 7) Soluzioni adottate.
In conclusione si dà esito positivo a tutti i quesiti seguenti riguardo la valutazione effettuata ed i risultati ottenuti: 1) L'analisi è specifica per l'intero insieme; 2) Sono elencati tutti i rischi significativi; 3) Sono elencate le frequenze di tali rischi e le conseguenze (è stata costantemente considerata una frequenza medio-alta di eventi); 4) Sono stati eliminati o ridotti al livello più basso possibile; 5) L'analisi è stata condotta per i rischi simultanei e per la sommatoria degli effetti; 6) Si conosce lo stato dell'arte; 7) Le soluzioni sono ben documentate; 8) Esistono informazioni sui rischi residui (rif. Manuale d'uso); 9) Esistono prescrizioni di controllo sul sistema di sicurezza e sui singoli dispositivi di sicurezza.

Le procedure adottate sono: Tecniche idonee; Procedure opportune, tenendo conto anche delle prescrizioni dei rispettivi fabbricanti dei componenti costituenti il package dell'attrezzatura; Corretta esecuzione.
Nei punti di connessione dei sottoinsiemi viene analizzata la sicurezza per quanto attiene Compatibilità dei fluidi, PS/TS, Sicurezza (loop e/o dispositivi di limitazione). I risultati sono stati esposti elencando l'evento, le cause, le conseguenze, la frequenza ed i relativi controlli, o azioni, effettuati; è stato formulato un ulteriore elenco che riporta le soluzioni adottate per il rispetto dei requisiti essenziali di sicurezza della dir. 2014/68/UE.

5. Conclusioni

Le camere iperbariche trattate nel presente articolo hanno il vantaggio di potere essere spostate e impiantate temporaneamente laddove ci sia necessità presso cantieri e zone di lavorazioni in ambienti iperbarici, garantendo una immediata area dedicata di intervento e/o cura. Rappresentano soluzioni efficaci, rispondono a esigenze organizzative, risolvono criticità legate a trasporto e tempistica nei trattamenti terapeutici.
Per contro non sono installate come attrezzature fisse su un luogo di lavoro, pertanto l'analisi di rischio, oltre a dover tenere conto di svariati luoghi di utilizzo ed categorie di utenti finali (che dovranno essere precisati nelle istruzioni operative), anche di condizioni legate al tipo di automezzo sul quale sono installate.
E' ragionevole ipotizzare che occorre sempre tener conto di carichi specifici legati al trasporto su strada, che ne influenza nel tempo le caratteristiche di durabilità ed efficienza dei componenti del sistema. Questi aspetti apparentemente non contemplati dalle Direttive esaminate devono essere considerati con riferimento all'influenza che possono avere sulla progettazione, nonché sui requisiti di prova nel tempo delle attrezzature e dei dispositivi di protezione e accessori di sicurezza. Anche gli aspetti manutentivi devono tenere in considerazione il particolare tipo di allestimento.
Non di minore importanza sono gli aspetti legati all'uso frequente e/o intermittente di tali insiemi, oltre a differenti qualifiche del personale specialistico e non specialistico che utilizza l'insieme, che influenzano significativamente il processo di analisi dei rischi.

Bibliografia

[1] https://www.portaleagentifisici.it/fo_iperbariche_index.php?lg=IT

[2] Abraini JH, Ansseau M, Bisson T, de Mendoza JL, Therme P. Personality patterns of anxiety during occupational deep dives with long-term confinement in hyperbaric chamber. J Clin Psychol. 1998 Oct;54(6):825-30. doi: 10.1002/(sici)1097-4679(199810)54:6<825::aid-jclp10>3.0.co;2-n. PMID: 9783663.

[3] 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

Direttiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 maggio 2006 relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE

[4] EN ISO 12100:2010 - Sicurezza del macchinario - Principi generali di progettazione - Valutazione del rischio e riduzione del rischio

EN ISO 15614-1:2017 - Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici - Prove di qualificazione della procedura di saldatura - Parte 1: Saldatura ad arco e a gas degli acciai e saldatura ad arco del nichel e leghe di nichel

UNI EN ISO 9606-1:2017 - Prove di qualificazione dei saldatori - Saldatura per fusione - Parte 1: Acciai

EN ISO 9712:2022 - Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive

IEC 61508:2010 - Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems

[5] UNI EN 14931:2006 - Camere iperbariche per persone - Camere iperbariche multiposto per terapia iperbarica - Prestazioni, requisiti di sicurezza e prove

L’ispezione periodica dei recipienti trasportabili per GPL in correlazione con i principali danni riscontrati su recipienti oggetto di incidente

G. Giannelli[1], N. Altamura[2], A. Muratore[1], E. Zaccagnini[1], G. Grillone[3]

[1]Inail – Uot di Como
[2]Inail – Uot di Bari
[3]Inail – Uot di Palermo

Sommario
Con frequenza sempre maggiore si ripropone all’attenzione della cronaca il verificarsi di incidenti che coinvolgono recipienti per trasporto, in particolare per trasporto di GPL; questi episodi che hanno spesso conseguenze tragiche nascono spesso da un mix di disattenzione, sottovalutazione ed incoscienza.
I dati disponibili nell’analisi post incidentale, soprattutto laddove le indagini consentono un approfondito studio dei meccanismi che hanno portato all’evento, rivelano le motivazioni che hanno portato al cedimento strutturale del recipiente: non sempre tali meccanismi sono contrastabili con un’attenta applicazione dei controlli periodici, ma in taluni casi un’attenta analisi dello stato di conservazione potrebbe aiutare a prevenire alcuni degli eventi avversi.
I recipienti per trasporto gas – bombole GPL, sono particolari recipienti adibiti al trasferimento di GPL acronimo di Gas di Petrolio Liquefatto, che individua una miscela di idrocarburi in proporzioni variabili e principalmente Butano (C4H10) e Propano (C3H8); il GPL è trasportato liquefatto, applicando una pressione moderata in modo da garantire una riduzione dei volumi di circa 250 volte.
I recipienti oggi utilizzati per il trasporto del GPL su strada sono inquadrabili in due grandi categorie: recipienti “vecchio parco” e recipienti certificati TPED.

1. Il Vecchio Parco.

Le bombole del “Vecchio Parco”, identificabili nei contenitori costruiti ed immessi sul mercato in applicazione della norma nazionale vigente sino all’entrata in vigore della Direttiva TPED, in particolare il D.M. 12/09/1925 e la successiva serie di norme integrative che ne hanno garantito l’efficacia nel tempo. Questi contenitori recano una marcatura particolare: è presente un punzone RI (Repubblica Italiana) all’interno di una stella e sta a testimoniare una procedura omologativa nazionale oggi non più applicabile; questi recipienti possono essere riempiti e circolare liberamente solo sul territorio nazionale. Nonostante si tratti di recipienti datati, ne risultano ancora in servizio una notevole quantità; con detti recipienti è necessaria una particolare attenzione al fine di individuare l’emergere di segnali di degrado che possano portare ad un cedimento strutturale, attenzionando i recipienti sino alla loro dismissione nel tempo.

Questa tipologia di bombole ha attraversato dei periodi temporali fortemente disomogenei, con un'attenzione alla sicurezza via via crescente, ma comunque in presenza di periodi di forti variazioni in termini di:

- Attenzione al fluido contenuto nei recipienti; va osservato che la qualità del gpl contenuto all'interno dei recipienti si è via via assestata, attraverso un meccanismo di unificazione dei valori di inquinanti (con particolare attenzione al contenuto di elementi corrosivi) contenuti sempre più stringente. Oggi il GPL generalmente fornito attraverso i canali autorizzati, presenta un livello di inquinanti tali da vedere un accordo multilaterale operativo tra Italia e Francia che esenta dal controllo della visita interna prevista dalla norma EN 1440:2016 + A1:2018 + A2:2020 (salvo Allegato C) recepita dall'UNI con La norma UNI EN 1440:2020 e utilizzata per le ispezioni periodiche di recipienti non UN in ambito ADR (cfr. Recipienti di cui al successivo punto 2).
- Attenzione al tipo di conservazione in sede di temporaneo inutilizzo del recipiente, con assenza di un'idonea attività di prevenzione dei meccanismi di danneggiamento;
- Attenzione nella fase di movimentazione dei recipienti;
- Attenzione alle procedure di riempimento a volte ricorrendo a riempimenti al di fuori delle strutture autorizzate a tale funzione, con possibili sollecitazioni oltre i limiti di tollerabilità da parte dei recipienti, causando danneggiamenti critici ai fini della sicurezza.

A valle della procedura di controllo naturalmente connessa con la normativa originaria e che vedeva il controllo da parte dell'ISPESL e delle strutture territoriali della Motorizzazione civile, al giorno d'oggi l'INAIL che ha ereditato le attività dell'ISPESL continua a svolgere attività istituzionale di controllo su questi recipienti e parallelamente sono stati autorizzati ad agire in nome e per conto delle strutture della motorizzazione civile alcuni organismi notificati, accreditati dall'ente di accreditamento nazionale ACCREDIA e agenti in forza del Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 18/06/2015.

Nei meccanismi di controllo attuali va annoverato l'utilizzo dei sistemi di qualità, nei quali si ravvisa l'opportunità di un controllo molto attento al fine di prevenire eventuali derive che potrebbero risultare critiche nella gestione di recipienti fortemente datati.

2. Recipienti TPED, rispondenti alla Direttiva 2010/35/UE o precedenti.

Si tratta di recipienti costruiti secondo le previsioni delle direttive TPED succedutesi dal 1999 al 2001 e in vigore in Italia dal 01/07/2003. L'attuale Direttiva è la 2010/35/UE recepita in Italia con il D. Lgs. 12/06/2012 n° 78.

I recipienti costruiti secondo la Direttiva 2010/35/UE seguono una procedura di valutazione che porta all'apposizione del marchio "π" a testimoniare il rispetto dei requisiti imposti dalla Direttiva TPED.

Ovviamente parte dei criteri di criticità individuati nel punto precedente risultano applicabili anche a questa categoria di recipienti, anche se l'attenzione negli anni 2000 ha iniziato ad essere più alta in relazione a possibili attività "rischiose".
In particolare, il fenomeno del riempimento abusivo resta costantemente presente, recando con sé rischi legati al sovrariempimento ed all'uso di GPL di scarsa qualità, che possono costituire un innesco di possibili eventi tragici.
Questa categoria di recipienti può essere riempita e può circolare su tutto il territorio comunitario; ad essi si applica l'Accordo Europeo relativo al trasporto internazionale di merci pericolose su strada ADR.
In tale contesto per le bombole per trasporto di GPL viene applicata in sede di ispezione periodica la norma EN 1440:2016+A1:2018+A2:2020, recepita con norma UNI EN 1440:2020. Si deroga, limitatamente alle bombole circolanti in Italia e Francia, dalla visita interna in caso di utilizzo di GPL con tenore di inquinanti corrosivi indicato nella norma ISO 9162.

3. Danneggiamenti: i riscontri, le cause.

In fase di indagine per eventi l'esperienza operativa del personale VV.F. ha consentito di evidenziare delle tipologie di difetto tipiche di comportamenti errati nella gestione dei contenitori. Tra le tipologie di errata gestione più frequenti si possono riscontrare:

- Riempimento dei recipienti in centri non autorizzati;
- Sovrariempimento di liquido dei recipienti oltre l'80% in volume;
- Errato posizionamento delle bombole cariche;
- Errata conservazione dei recipienti in attesa di riempimento;
- Colpi alle strutture resistenti;
- Danneggiamento delle filettature;
- Trasferimento delle bombole in modo improprio.



Foto 1. Riempimento abusivo delle bombole. Trasporto non idoneo.

Il riempimento dei recipienti al di fuori dei circuiti autorizzati costituisce un elemento grave di rischio (oltre che avere implicazioni penali); intanto essendo fuori dal circuito

ufficiale non è garantita la qualità del GPL inserito che può dunque eccedere i limiti consentiti di inquinanti corrosivi. Inoltre le bombole richiedono un'ispezione periodica secondo cadenze definite dall'ADR; l'uscita dal circuito di ricarica ufficiale comporta il rischio di mancata sottoposizione al controllo periodico, in quanto i centri di riempimento ufficiali sono responsabilizzati nella verifica dell'ottemperanza alle disposizioni dell'ADR, mentre i centri abusivi non garantiscono analoga competenza. Infine, i centri di riempimento autorizzati verificano eventuali criticità evidenti e possono cooperare ad individuare situazioni di rischio.



Foto 2. Riempimento abusivo delle bombole. La freccia indica un attacco per pistola erogatrice connessa a tubazione flessibile interna per il trasferimento alla bombola

Di conserva con le precedenti considerazioni va osservato il pericolo reale, in caso di riempimento al di fuori del circuito autorizzato, di un caricamento di GPL liquido in misura superiore all'80% in volume del recipiente. Tale evento può sembrare poco importante ma riveste invece un essenziale elemento di rischio; tanto più il valore del sovrariempimento eccede il valore dell'80% in volume del recipiente per la parte liquida, tanto più lievita il rischio che modeste variazioni di temperatura possano comportare sovrapressioni nel recipiente fino al cedimento strutturale con conseguenze severe.



Foto 3. Riempimento liquido eccessivo oltre l’80% in volume: rigonfiamento.

In linea generale è molto importante posizionare correttamente le bombole, avendo cura di tenerle in posizione verticale e di proteggerle dal calore eccessivo e dall’eccessiva esposizione solare; questi fattori, che andrebbero comunque sempre tenuti in considerazione, costituiscono circostanze aggravanti della situazione di rischio conseguente al sovrariempimento. Il calore eccessivo comporta l’aumento della pressione interna e può, a lungo andare, influenzare anche le caratteristiche del materiale con cui le bombole sono realizzate.



Foto 4. Cedimento del recipiente in alimentazione stufa catalitica.

La conservazione dei recipienti tra una ricarica e l’altra può essere critica nella misura in cui non si procede alla corretta bonifica ed all’immagazzinamento conservativo. La presenza di atmosfere corrosive o di residui corrosivi e di liquido residuale può palesare fenomeni di attacco corrosivo che potrebbero portare alla diminuzione dello spessore resistente in forma più o meno estesa e più o meno accentuata. E’ buona

norma procedere ad una conservazione adeguata prevedendo l'asciugatura, la bonifica dei recipienti e la protezione contro atmosfere aggressive.



Foto 5. Cedimento di un recipiente

In sede di stoccaggio occorre inoltre verificare il posizionamento delle bombole in modo da evitare che le stesse possano subire danneggiamenti a seguito di movimentazione delle stesse o perché coinvolte in urti e cadute indotte da movimenti esterni. La presenza di danni evidenti è segno di alterazione delle caratteristiche meccaniche che potrebbero essere correlate a diminuzione della sicurezza d'uso del recipiente.
Una delle motivazioni di incidentalità nell'uso del gas sta nella dispersione del fluido nell'ambiente esterno; tale eventualità può essere correlata alla perdita di integrità del recipiente, ma più spesso è correlata all'errata manutenzione dei raccordi di erogazione. Il recipiente è sottoposto a rischio laddove l'utilizzatore proceda ad interventi di sostituzione dei raccordi e dei rubinetti in modo autonomo, erroneamente convinto della facilità del processo. Ebbene va osservato che di fondamentale importanza ai fini della tenuta della filettatura è la coppia di serraggio con cui si procede alla corretta installazione del rubinetto; il mancato utilizzo di chiave dinamometrica può portare al danneggiamento della filettatura con conseguente pericolo nella tenuta del recipiente. E' appena il caso di osservare che anche in questo caso il ricorso al circuito di ricarica abusivo non aiuta nella corretta prevenzione.



Foto 6. Esplosione di una bombola sottoposta a ricarica abusiva.

Infine, una valutazione a parte merita il trasporto dei recipienti in pressione: è necessario aver cura del posizionamento delle bombole in modo che le stesse non subiscano danni da movimenti inconsulti; inoltre è opportuno proteggere i recipienti dall'eccessiva esposizione alla radiazione solare e curare il caricamento e lo scaricamento dei recipienti dai mezzi al fine di eliminare il rischio di colpi che potrebbero minare l'integrità della struttura dei recipienti.

4. L'ispezione periodica.

Le considerazioni del capitolo precedente possono fornire alcune utili indicazioni in fase di ispezione periodica dei recipienti per trasporto di GPL. Occorre prioritariamente riscontrare la presenza e la leggibilità delle marcature di collaudo. A seguire, un'indicazione delle condizioni delle bombole può essere dedotta in prima istanza dall'osservazione del recipiente dall'esterno; la presenza di colpi evidenti con ammaccature decise, intagli o incisioni, soprattutto nella zona di saldatura richiede un'analisi approfondita e la presa in considerazione dello scarto del recipiente. Danneggiamenti nei pressi della saldatura possono nascondere zone di indebolimento che possono portare, in una fascia particolarmente delicata, alla rottura del recipiente; lo stesso dicasi ovviamente per la zona dell'ogiva. Sempre in fase di osservazione esterna del recipiente, va attenzionata la geometria e le dimensioni del recipiente al fine di cogliere possibili rigonfiamenti e procedere, senza indugio, allo scarto del recipiente. In sede di visita interna (vecchio parco) occorre rilevare l'assenza di fenomeni corrosivi, soprattutto per recipienti molto vecchi e risalenti a periodi di scarsa attenzione alla ricarica nei circuiti ufficiali. Particolare attenzione anche al collare ed al piede per escludere danni legati alla movimentazione ed al trasporto.

Al fine di identificare possibili danni legati all'esposizione al calore risulta essenziale ricercare sulla superficie della bombola la presenza di vernice carbonizzata,

deformazione della bombola, fusione del valvolame, e fusione di parti in plastica: in tali evenienze occorre procedere direttamente allo scarto del recipiente.
La prova idraulica potrà fornire utili informazioni circa la tenuta del recipiente e delle sue parti. Indispensabile procedere ad un attento esame della filettatura per verificarne l'integrità verificando al contempo l'idoneità della rubinetteria utilizzata.
Al termine dell'ispezione periodica e previo controllo dello stato del rubinetto e delle filettature, occorre procedere all'installazione delle valvole con applicazione di una coppia di serraggio compresa nei valori forniti dai fabbricanti di valvola e bombola mediante chiave dinamometrica certificata. Da ultimo va effettuata una prova di tenuta in sede di ispezione ovvero presso il centro di riempimento.

5. Conclusioni.

Questa breve trattazione ha inteso mettere in evidenza i rischi connessi con l'utilizzo e la manipolazione dei recipienti per trasporto di GPL che hanno una capillare diffusione sul territorio nazionale. Sulla base delle esperienze operative dei verificatori si sono individuate le principali linee di rischio connesse con le bombole in questione; in sede di ispezione si sono fornite le principali indicazioni per la gestione dei rischi individuati.

Bibliografia.

[1] D. Lgs. 12/06/2012 n.78 "Attuazione della Direttiva 2010/35/UE in materia di attrezzature a pressioni trasportabili" (TPED);
[2] DECRETO 13 febbraio 2025 di recepimento della Direttiva 2025/149/UE concernenti l'adeguamento al progresso scientifico e tecnico della materia del trasporto di merci pericolose su strada, recanti modifiche degli allegati A e B dell'ADR;
[3] Norma UNI EN 1440:2020: "Attrezzature ed accessori per GPL – Bombole trasportabili e ricaricabili di acciaio saldato e brasato per gas di petrolio liquefatto (GPL) – Ispezione periodica;
[4] C.N.V.V.F. - N.I.A. – Scoppi Bombole e serbatoi: analisi ed interpretazione dei segni. N.I.A.
[5] ADR 2025 - Accordo europeo relativo ai trasporti internazionali di merci pericolose su strada (ADR) – ARS Edizioni informatiche srl;
[6] DM n. 585 del 21 dicembre 2017 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Ispezione periodica di recipienti trasportabili a pressione (TPED) mediante controllo ad ultrasuoni in accordo alla norma UNI EN ISO 18119:2024

L. Polotti[1], R. Iovene[2], R. Vasile[2], A. Lanciotti[2], R. Tucceri[2]

[1]Air Liquide Italia Gas e Servizi
[2]INAIL UOT Pescara

Sommario
La norma UNI EN ISO 18119:2024 regolamenta le procedure relative all'ispezione periodica e alle prove per verificare l'integrità dei recipienti trasportabili a pressione (bombole) per essere re-introdotti in servizio per un ulteriore periodo di tempo, prevedendo la possibilità di esecuzione di una prova in pressione o, in alternativa, di un controllo non distruttivo mediante l'utilizzo di ultrasuoni.
In Italia, la prova idraulica in pressione rappresenta il metodo maggiormente utilizzato per la verifica delle bombole in pressione.
Il presente studio si propone di approfondire i punti di forza e le limitazioni del controllo ad ultrasuoni applicato sia al collaudo che all'ispezione periodica, basandosi su evidenze operative raccolte presso un centro di revisione, situato sul territorio nazionale.
Tra i principali vantaggi emersi figurano la tracciabilità e la rilevanza dei dati strumentali acquisiti sulle bombole ispezionate, la ridotta potenziale incidenza dell'errore umano, l'assenza di contatto tra la superficie interna della bombola e l'acqua, nonché – per le bombole prive di "piede riportato" – la possibilità di omettere l'ispezione visiva interna, evitando così eventuali sollecitazioni meccaniche durante le operazioni di rimozione e installazione della valvola.
Per contro, la principale criticità nell'applicazione del controllo mediante ultrasuoni riguarda la necessità di disporre di documentazione che certifichi precisamente lo spessore effettivo della bombola in sede di costruzione. La scarsa accuratezza di tale informazione può incrementare la selettività del controllo, con conseguente aumento ingiustificato del tasso di rigetto delle bombole.
L'analisi condotta consente di affermare che il controllo non distruttivo ad ultrasuoni presenta complessivamente più vantaggi che svantaggi e che tale metodologia potrà ulteriormente migliorare nel tempo.

1. Introduzione

1.1 Inquadramento Normativo

La Direttiva 2010/35/UE (TPED) indica all'art.4 c.1 che "*All'atto dell'immissione delle loro attrezzature a pressione trasportabili sul mercato, i fabbricanti garantiscono che esse*

siano state progettate, fabbricate e corredate di documentazione conformemente ai requisiti stabiliti negli allegati della direttiva 2008/68/CE (ADR) e nella presente direttiva».
Inoltre, al CAPO III "*Conformità delle attrezzature a pressione trasportabili",* l'art. 12 prevede che *"Le attrezzature a pressione trasportabili di nuova fabbricazione soddisfano i requisiti relativi alla valutazione della conformità, alle ispezioni periodiche (…) stabiliti negli allegati della direttiva 2008/68/CE e nei capi III e IV della presente direttiva. (…) I certificati di valutazione della conformità (…) e le relazioni sulle ispezioni periodiche (…) rilasciati da un organismo notificato, sono validi in tutti gli Stati membri."*
La Direttiva 2008/68/CE è stata aggiornata con cadenza biennale fino all'ultima formulazione Direttiva 2025/149/UE (ADR 2025), recepita in Italia con Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 13/02/2025, in vigore a livello internazionale dal 01/01/2025, diventata pienamente operativa a livello nazionale dal 01/07/2025. La ADR 2025, introduce alcune novità rispetto alla precedente versione ADR 2023, in particolare al capitolo 6.2, punto 6.2.1.6, che regolamenta i controlli periodici e le prove da eseguirsi sui recipienti a pressione ricaricabili, ad eccezione dei recipienti criogenici, è stata reinserita la NOTA 3: "*Il controllo dello stato interno del 6.2.1.6.1 (b) e la prova di pressione idraulica del 6.2.1.6.1 (d) possono essere sostituiti da un controllo ad ultrasuoni, effettuato conformemente alla norma ISO 18119:2018 + Amd 1:2021 per gli involucri di bombole senza saldatura in acciaio e in leghe di alluminio".*
La nuova ADR 2025 prolunga quindi la possibilità di utilizzare il controllo ad ultrasuoni, in alternativa alla tradizionale prova idraulica in pressione, nell'esecuzione delle ispezioni periodiche sulle bombole TPED, fino al 31 dicembre 2026.
La norma UNI EN ISO 18119:2024 stabilisce le procedure da seguire per controllare e collaudare regolarmente le bombole, prevedendo una sequenza di 11 operazioni necessarie a verificare l'idoneità del contenitore al fine di proseguirne l'utilizzo.
Le suddette operazioni consistono in:

- identificazione della bombola e preparazione per ispezioni e verifiche;
- depressurizzazione e rimozione della valvola;
- ispezione visiva esterna;
- ispezione del collare della bombola;
- verifica delle condizioni interne;
- prove supplementari;
- riparazioni della bombola;
- prova in pressione o controllo ad ultrasuoni;
- ispezione della valvola o altri accessori;
- sostituzione di parti della bombola;
- operazioni finali.

Tra queste la prova in pressione o controllo ad ultrasuoni, pur non essendo a priori la più decisiva per la riqualifica della bombola, ha il maggiore impatto sul processo di lavorazione, in quanto può rendere non obbligatoria l'esecuzione di alcune delle altre operazioni.

1.2 Obiettivi del Lavoro

L'ispezione e il collaudo periodico dei recipienti a pressione mobili, come le bombole, svolgono un ruolo fondamentale per garantire la sicurezza sia degli utenti che degli operatori di settore.
Il presente lavoro si propone di analizzare i risultati operativi di un centro di revisione periodica ubicato sul territorio nazionale, recentemente equipaggiato con un sistema di controllo ad ultrasuoni, utilizzato in luogo della prova idraulica in pressione, al fine di individuare i punti di forza e i limiti di questa tecnica di controllo non distruttivo.

2. Materiali e Metodi

2.1 Descrizione del Contesto Operativo

Il centro di revisione periodica oggetto dello studio è costituito da un impianto automatico, nel quale le operazioni principali vengono eseguite da macchinari collegati tramite una linea catenaria. L'impianto comprende una stazione per l'ispezione visiva esterna e il caricamento delle bombole sulla catenaria, una macchina granigliatrice per il trattamento della superficie esterna delle bombole, una cabina di verniciatura, una cabina di asciugatura mediante ventilazione forzata, una macchina per il controllo non distruttivo ad ultrasuoni e una stazione di scaricamento delle bombole.
Sono inoltre presenti, fuori linea, postazioni dedicate allo smontaggio e all'installazione delle valvole, oltre a uno strumento manuale per il controllo spessimetrico ad ultrasuoni.

2.2 Criteri di Analisi e Confronto

Lo studio analizza le risultanze delle ispezioni periodiche effettuate su 1.865 bombole da 50 litri, in acciaio al carbonio, testate con tecnica ad ultrasuoni nel corso dell'anno 2025. L'indagine si concentra sul tasso di scarto delle bombole e sulle relative cause emerse durante i test di ispezione.

3. Risultati

3.1 Punti di forza: Tracciabilità e Rilevanza dei dati

Per ogni bombola sottoposta ad ispezione periodica con controllo ad ultrasuoni viene generato un tracciato delle misurazioni eseguite dalla macchina (Figura 1, Figura 2, Figura 3). I tracciati, generati per ogni bombola sono quindi archiviati in modo permanente presso il centro di revisione. Le misurazioni risultano estremamente importanti perché, come evidenziato nella Tabella 1, il controllo ad ultrasuoni rappresenta il fattore determinante nella maggior parte dei casi di rigetto delle bombole durante il collaudo. Di conseguenza, i dati rilevati non solo sono

sempre disponibili, ma rivestono un ruolo centrale, in sede di ispezione, per la valutazione dello stato di conservazione delle bombole, rappresentando un dato affidabile ed oggettivo.

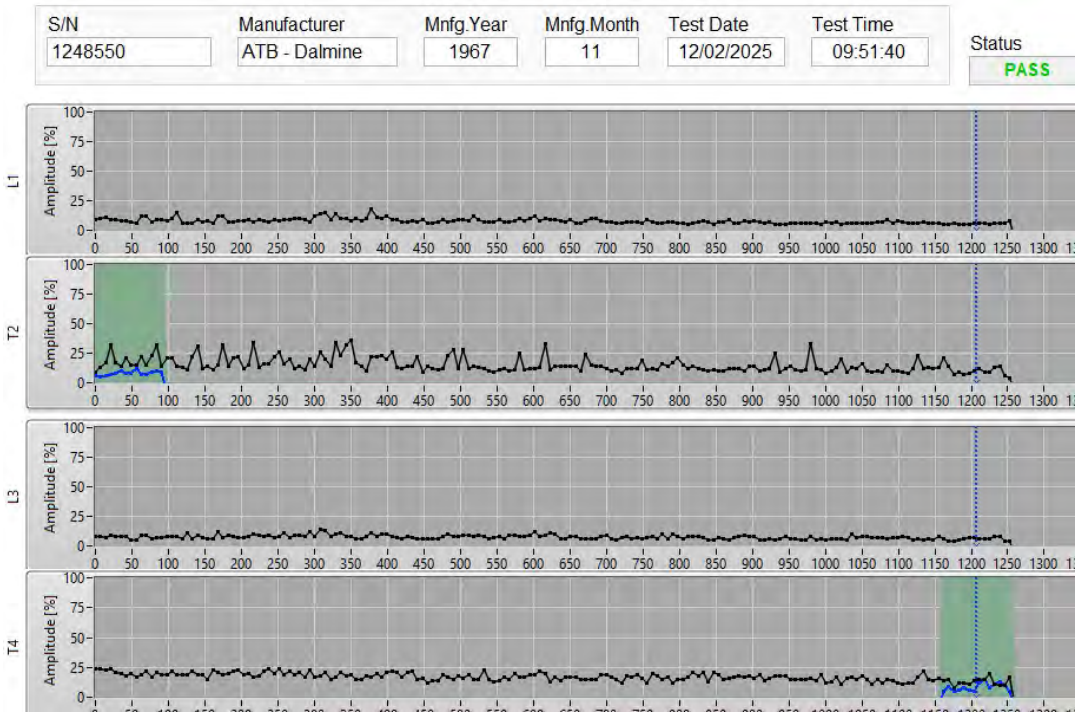


Figura 1. Tracciato di una bombola conforme

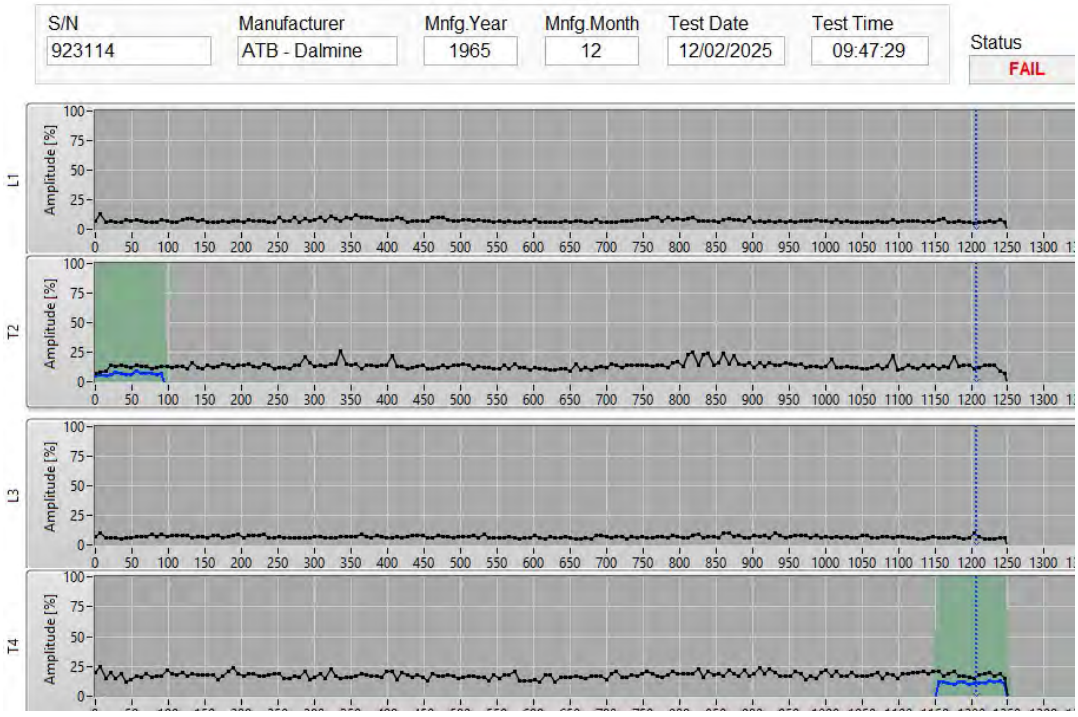


Figura 2. Tracciato di una bombola NON conforme per spessore insufficiente

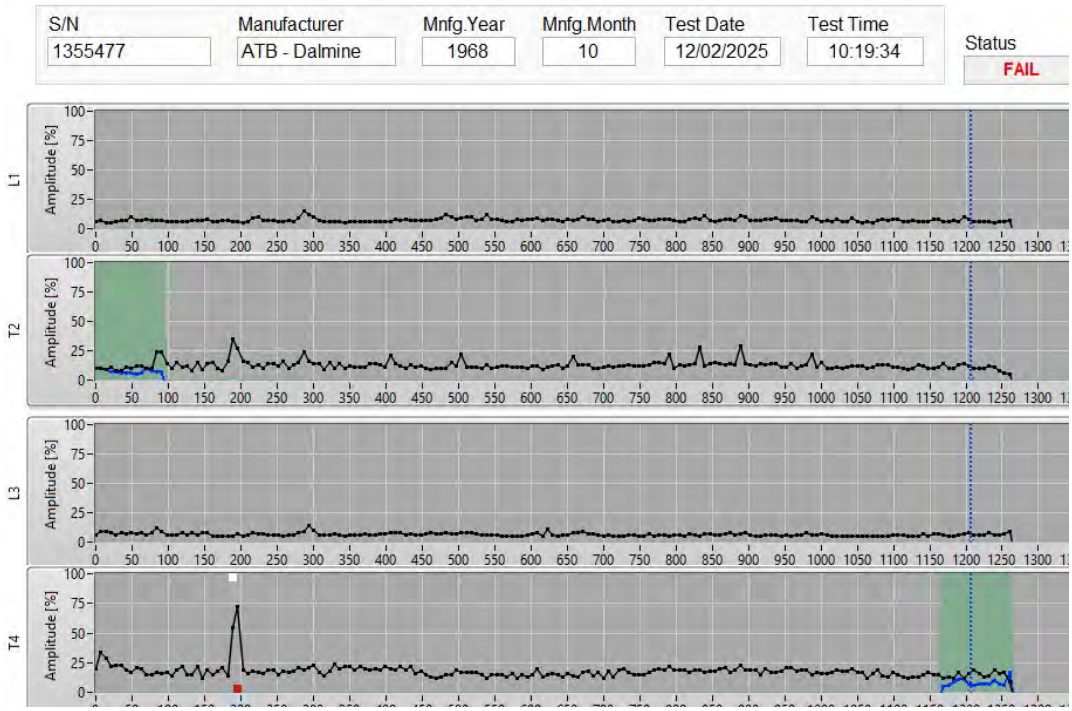


Figura 3. Tracciato di una bombola NON conforme per spessore insufficiente e difetto trasversale interno

Descrizione	Numero di bombole	Percentuali Totali
Bombole lavorate	1865	100%
Esito collaudo:		
Bombole collaudate	1613	86,5%
Bombole scartate	252	13,5%
Operazione che ha determinato lo scarto:		
Verifica visiva fallita	5	0,3%
Controllo Ultrasuoni fallito	247	13,2%
Causa dello scarto relativo al solo Controllo Ultrasonico:		
Spessore minimo non conforme	204	10,9%
Fessura interna	25	1,3%
Fessura esterna	11	0,6%
Taglio	3	0,2%
Corrosione interna localizzata	2	0,1%
Corrosione interna diffusa	1	0,1%
Tacca o scanalatura	1	0,1%

Tabella 1. Esito del collaudo con controllo ad ultrasuoni, sul campione di bombole

3.2 Punti di forza: Accuratezza strumentale ed esito dell'ispezione periodica

Come illustrato dalla Tabella 1 il controllo ad ultrasuoni risulta la fase determinante per valutare l'esito dell'ispezione periodica. Si osserva infatti che, tra le 252 bombole respinte in sede di ispezione, soltanto 5 sono state scartate in fasi diverse dal controllo ad ultrasuoni.

Si rimanda al successivo paragrafo 3.3 per l'analisi delle cause dell'elevato tasso di scarto dovuto allo spessore minimo non conforme.

La norma UNI EN ISO 18119:2024 descrive in modo preciso le specifiche prestazionali degli strumenti di misura, le procedure di calibrazione e la configurazione dei difetti sui campioni di riferimento per il controllo ad ultrasuoni.

Questo elevato grado di dettaglio, unitamente all'automazione della calibrazione integrata nel ciclo produttivo, che viene effettuata ogni 10 bombole controllate, e al ruolo determinante del controllo ad ultrasuoni, assicura la ripetibilità dell'intero processo di collaudo e la piena conformità ai requisiti normativi.

3.3 Punti di forza: Riduzione dell'Errore Umano

Il tracciato delle misurazioni è reso disponibile in tempo reale dal macchinario all'operatore preposto all'ispezione. Tale operatore, qualificato come Esperto di livello II ai sensi della UNI EN ISO 9712, ha il compito di analizzare il tracciato ed effettuare una valutazione: può quindi decidere di convalidare la prova, o di effettuare un secondo controllo ultrasonico, o di scartare la bombola dal processo di collaudo, oppure di rivalutare il risultato proposto dalla macchina in accordo con quanto previsto dall'Annex B della ISO 18119:2018 - "*Description, evaluation of defects and conditions for rejection of seamless steel and seamless aluminium-alloy cylinders at the time of periodic inspection*".

Grazie a questa metodologia d'esame, l'operatore è quindi posto nelle condizioni ottimali per adottare decisioni fondate su elementi quantitativi e strumentali, riducendo il rischio di errori di valutazione legati a informazioni qualitative o a condizioni operative sfavorevoli.

3.4 Punti di forza: Limitato impatto sullo stato di conservazione della bombola

La norma UNI EN ISO 18119:2024 consente la sostituzione dell'ispezione visiva interna con il solo controllo ad ultrasuoni per tutte le bombole prive di "piede riportato".

Con tale modalità di conduzione dell'ispezione è possibile evitare tutte le sollecitazioni derivanti dalle operazioni di smontaggio e installazione della valvola.

Inoltre, anche nei casi in cui sia necessaria l'esecuzione dell'ispezione visiva interna, il fatto di non procedere alla prova idraulica, fa in modo che la superficie interna della bombola non venga esposta a contatto diretto con l'acqua, eliminando le successive attività di asciugatura e le risorse impiegate al fine di riottenere un grado di purezza idoneo al riempimento della bombola, a seguito delle operazioni di collaudo.

3.5 Criticità: Conoscenza dello spessore "reale" di fabbricazione

Il controllo non distruttivo tramite ultrasuoni permette non solo di rilevare difetti sulle superfici interne ed esterne, ma anche di misurare con esattezza lo spessore della parete della bombola sottoposta a collaudo, al fine di confrontarlo con il relativo valore indicato dal costruttore in sede di fabbricazione.

Per le bombole prodotte, prima che diventasse obbligatorio il controllo dello spessore durante la fabbricazione, la relativa documentazione tecnica riporta solo un valore nominale dello spessore, che spesso non corrisponde a quello reale di costruzione. La discrepanza, tra lo spessore nominale e lo spessore reale di fabbricazione, rappresenta la causa principale dell'alto tasso di scarto delle bombole più datate, come evidenziato dalla seguente Tabella 2, quando le stesse sono sottoposte a controllo spessimetrico con ultrasuoni, e tale evidenza è stata ulteriormente confermata da analisi dettagliate condotte dal centro prove sui campioni di bombole scartate.

Età (anni)	Bombole sottoposte a Collaudo UT	Bombole scartate per Spessore minimo	Tasso di scarto
.. < 20	104	0	0,0%
20 < .. < 40	555	4	0,7%
40 < ..< 60	1042	144	13,8%
.. > 60	164	56	34,1%
Totale	1865	204	10,9%

Tabella 2. Esito del collaudo ad ultrasuoni realizzato sul campione di bombole.

4. Documentazione fotografica

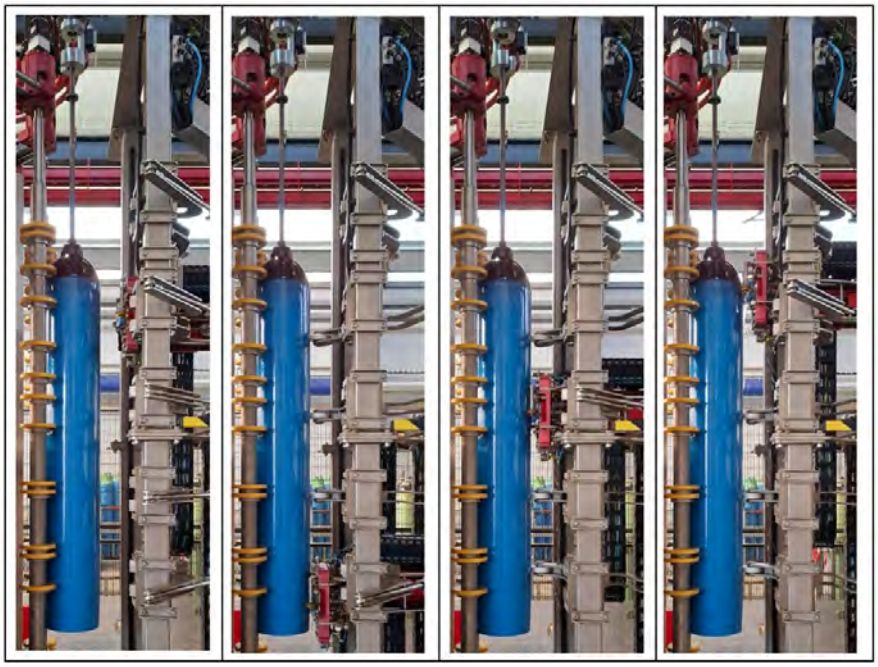


Figura 4. Sequenza fotografica di un controllo ad ultrasuoni



Figura 5. Sequenza fotografica di calibrazione della macchina per controllo ad ultrasuoni



Figura 6. Strumento manuale per il controllo spessimetrico ad ultrasuoni (sx) e stazione per l'ispezione visiva esterna e il caricamento delle bombole sulla catenaria (dx)

5. Conclusioni

Il controllo non distruttivo mediante l'utilizzo della metodologia ad ultrasuoni si conferma una metodologia efficace per l'esecuzione delle ispezioni periodiche dei recipienti trasportabili in pressione, previste dalla Direttiva 2010/35/UE e dalla ADR, risultando rispondente all'esigenza di strutturare un processo rigoroso, che assicuri una verifica affidabile ed oggettiva dell'effettivo stato di conservazione delle bombole.

La principale criticità riscontrata nel processo riguarda la necessità di reperire

informazioni essenziali, quali lo spessore reale di fabbricazione, dei contenitori sottoposti ad ispezione.
Tale criticità, ad oggi particolarmente rilevante per le bombole di età più avanzata, tenderà a ridursi progressivamente con il trascorrere del tempo, grazie al conseguente rinnovo delle bombole in circolazione. Ne deriva che i vantaggi associati a questa tecnica e la sua applicazione sono destinati ad assumere un peso sempre maggiore negli anni a venire.

Bibliografia

[1] UNI EN ISO 18119:2024 “Bombole per gas - Bombole e tubi per gas di acciaio e di lega di alluminio senza saldatura - Ispezione periodica e prove”.
[2] Direttiva 2010/35/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 giugno 2010, in materia di attrezzature a pressione trasportabili.
[3] Direttiva 2008/68/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 settembre 2008, relativa al trasporto interno di merci pericolose.

Progettazione, realizzazione e test di un sistema di rifornimento per treni a idrogeno senza compressore e stoccaggi fissi, alimentato da carro bombolaio a 500 barg

R. Stringhetti[1], S. Verzeri[1], L.G. Villa[1]; D. Corso[1]; E. Di Ponzio[2]

[1]SAPIO Produzione Idrogeno Ossigeno S.r.l
[2]Inail – Uot di Taranto

Sommario
L'idrogeno come vettore energetico ricopre un ruolo cruciale per la riduzione delle emissioni di gas serra sostituendo combustibili fossili in settori difficili da decarbonizzare, come l'industria pesante e i trasporti.
L'adozione di treni alimentati a idrogeno costituisce una soluzione innovativa ed efficace per ridurre le emissioni di CO_2 nel settore dei trasporti, consentendo l'impiego di tecnologie pulite anche in aree non elettrificabili.
Il presente lavoro descrive la progettazione, realizzazione e test di una stazione di rifornimento idrogeno, per treni a fuel cell, senza l'uso di compressione e stoccaggi fissi.
Il rifornimento del treno avviene tramite travaso del gas per differenza di pressione tra il serbatoio del treno e il carro bombolaio utilizzato come sorgente di idrogeno. Tale soluzione rende la stazione snella e ottimizzata, includendo solo gli elementi necessari alla distribuzione dell'idrogeno e alla gestione del rifornimento. Inoltre, la permanenza di idrogeno in sito viene limitata ai soli periodi necessari alle operazioni di rifornimento, riducendo così i rischi.
Per consentire l'esecuzione di rifornimenti fino a 350 barg è progettato e realizzato un carro bombolaio capace di trasportare idrogeno a 500 barg. Nell'unità di erogazione sono state integrate tutte le logiche necessarie per effettuare il travaso dell'idrogeno in maniera ottimizzata.
La progettazione è stata svolta applicando il d.m. 23/10/2018 [1] e implementando le logiche per garantire i rifornimenti in sicurezza. Il carro bombolaio è stato progettato secondo la normativa ADR 2023 [2] e la Direttiva 2010/35/UE (TPED) [3], l'unità di erogazione fissa è progettata e fabbricata secondo la Direttiva 2014/68/UE [4].

1. Introduzione
Il progetto nasce dalla necessità di realizzare un sistema di rifornimento (Hydrogen Refueling Station o HRS) per treni alimentati a idrogeno, da installarsi all'interno di un deposito ferroviario. In particolare, il sistema ha lo scopo di rifornire l'idrogeno durante le fasi di test dei treni, prima della loro messa in servizio o a seguito di una manutenzione effettuata sui treni stessi all'interno del deposito ferroviario. Nella fase di regolare operatività dei treni l'HRS installata presso il deposito ferroviario funge solo

da stazione di rifornimento straordinario, in caso di malfunzionamento di una delle stazioni di rifornimento principali localizzate lungo la tratta di percorrenza.
Partendo dalle specifiche esigenze di progetto si è svolta una prima fase di analisi e valutazione tecnico-economica per individuare la migliore configurazione impiantistica con l'obiettivo di selezionare la soluzione tecnica più adeguata, minimizzare i rischi presenti nel sito di installazione, e infine ottimizzare l'investimento economico. Si è passati poi alle fasi di progettazione esecutiva, costruzione e infine collaudo e messa in servizio del sistema.
In questo lavoro si vuole porre l'attenzione sulle implicazioni legate al rispetto della normativa italiana applicabile in materia di sicurezza e sull'applicabilità e i vantaggi derivanti dall'utilizzo di una fornitura di idrogeno con carri bombolai ad alta pressione. Giova ricordare che il d.m. 23/10/2018 [1] ha sostituito il d.m. 31/08/2006 [5], superando la maggior parte delle barriere significative del vecchio decreto introducendo un approccio innovativo in cui l'analisi prospettica è stata supportata dall'analisi del rischio. Il nuovo decreto consente la pressione di riempimento a 700 barg ed è allineato alla ISO/FDIS 19880-1 [6].

2. Configurazione impiantistica della stazione di rifornimento

In base alle finalità di utilizzo dell'HRS, per la scelta della migliore configurazione impiantistica, sono stati considerati i seguenti aspetti specifici di progetto:

- Utilizzo periodico e non continuativo: viste le finalità di utilizzo dell'HRS, il suo funzionamento non è continuativo e possono intercorrere periodi anche di diverse settimane in cui la stazione non viene utilizzata. La possibilità di programmare le operazioni di rifornimento con il dovuto anticipo rende possibile portare l'idrogeno presso il sito solo quando necessario.
- Capacità di rifornimento: per dimensionare correttamente l'HRS è stata considerata la capacità nominale dei serbatoi del treno che possono contenere un totale di circa 320 kg di idrogeno a una pressione di 350 barg (a 15°C)
- Semplicità impiantistica: la ridotta disponibilità di spazio nel sito, le finalità di utilizzo dell'HRS e la volontà di avere una soluzione tecnica semplice con limitate sorgenti di rischio, hanno implicato la necessità di ridurre il più possibile gli elementi di impianto cercando di evitare la presenza di macchine per ridurre anche le probabilità di guasto e di eventuali incidenti e, non da ultimo, per limitare l'impatto economico dell'investimento.

Questi obiettivi hanno portato a una configurazione impiantistica ottimizzata, di seguito rappresentata graficamente (Figura 1), che prevede la presenza di due soli elementi chiave per l'esecuzione dei rifornimenti di idrogeno garantendo le prestazioni richieste:

1. Il carro bombolaio di nuova concezione, sorgente del gas, che contiene idrogeno compresso a 500 barg;
2. L'unità di erogazione che gestisce il trasferimento dell'idrogeno dal carro bombolaio ai serbatoi del treno.

A completamento dell'impianto rimangono solo le tubazioni e gli elementi di interconnessione tra il carro bombolaio e l'erogatore per la corretta distribuzione del gas.

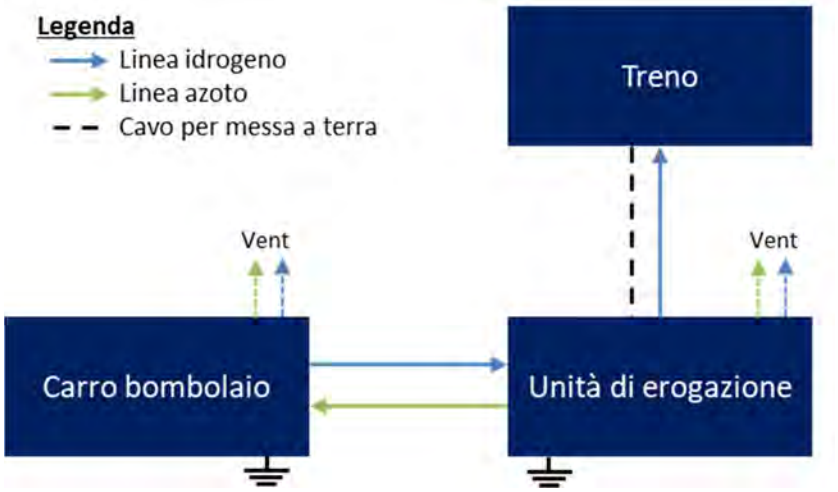


Figura 1. Rappresentazione semplificata della configurazione impiantistica

Questa configurazione ha permesso di evitare la presenza di compressori e di stoccaggi di idrogeno fissi in sito, rendendo l'impianto più compatto e sicuro, garantendo allo stesso tempo efficienza e soddisfacimento delle prestazioni richieste. L'impianto realizzato non è certificato come un "insieme" ai fini della Direttiva 2014/68/UE [4], ma è considerato come assemblaggio di attrezzature a pressione protette da idonei dispositivi di sicurezza. Le attrezzature che compongono l'impianto sono composte da tubazioni e accessori a pressione caratterizzati da PS massima di 875 barg e diametro massimo DN25; pertanto, ricadono nella categoria descritta dall'articolo 4.3 della Direttiva 2014/68/UE [4] e non necessitano di marcatura CE e conseguentemente di denuncia di messa in servizio all'INAIL secondo d.m. 329/04 [7]. Il quantitativo massimo di idrogeno presente all'interno del sito è limitato a circa 1,5 tonnellate considerando contemporaneamente gli interi volumi geometrici sia per la presenza del carro bombolaio che del treno; quindi, il sito non risulta soggetto al D.Lgs. 105/15 [8] che per l'idrogeno, nell'Allegato 1, identifica 5 tonnellate come quantità limite per rientrare nella categoria degli stabilimenti di soglia inferiore.
Il carro bombolaio che trasporta idrogeno ad alta pressione staziona in sito solo per il tempo necessario al rifornimento dei convogli e la sua sosta avviene in un apposito box realizzato seguendo le prescrizioni del Decreto Ministeriale del 23 ottobre 2018 [1]. Lo stazionamento temporaneo del carro bombolaio permette di minimizzare il tempo di permanenza dell'idrogeno all'interno del sito di installazione, rendendo quindi il rischio, associato alla presenza dell'idrogeno discontinuo.

3. Distanze di sicurezza

La progettazione e realizzazione dell'HRS è stata effettuata seguendo, oltre alle varie normative applicabili, tutte le prescrizioni contenute nel Decreto Ministeriale del 23 ottobre 2018 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione" [1].
L'applicazione di questo decreto se da una parte ha fornito una linea guida per la progettazione, dall'altra parte ha imposto vincoli che hanno influito in maniera rilevante sulla definizione del layout di impianto.
Si vuole in particolare porre l'attenzione sulle distanze di sicurezza imposte dal Decreto Ministeriale del 23 ottobre 2018 [1]. La Tabella 1 riporta le principali distanze di sicurezza applicabili.

Elemento	Distanza di protezione (m)	Distanza di sicurezza interna (m)	Distanza di sicurezza esterna (m)
Compressori	15	-	30
Stoccaggi	15	15	30
Box carro bombolaio	15	15	30
Unità di erogazione	15 (riducibile del 50% con schermature)	15	30 (riducibile del 50% con schermature)

Tabella 1 Principali distanze di sicurezza tratte dal d.m. del 23 ottobre 2018 [1]

Per le ulteriori distanze di sicurezza tra gli elementi pericolosi e locali destinati a servizi accessori, che non si vogliono approfondire nel presente lavoro, si rimanda al Decreto Ministeriale del 23 ottobre 2018 [1].
Il d.m. in oggetto prevede la possibilità di applicare distanze di sicurezza diverse da quelle prescritte applicando le metodologie dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio previste dal Decreto Ministeriale 9 maggio 2007 [9], tuttavia, con l'obiettivo di rendere più agevole possibile il percorso di ottenimento dei titoli autorizzativi, per questo progetto si è deciso di applicare le distanze di sicurezza prescritte.
I valori riportati in Tabella 1 combinati con i vincoli imposti dalla dimensione e dalla forma dell'area del sito di installazione hanno portato ad avere distanze tra gli elementi pericolosi anche superiori ai valori minimi prescritti. A titolo esemplificativo, tra il box del carro bombolaio e l'unità di erogazione si è ottenuta una distanza di circa 35 metri con conseguente aumento della complessità dell'impianto di distribuzione dell'idrogeno ed estensione delle zone classificate ATEX.

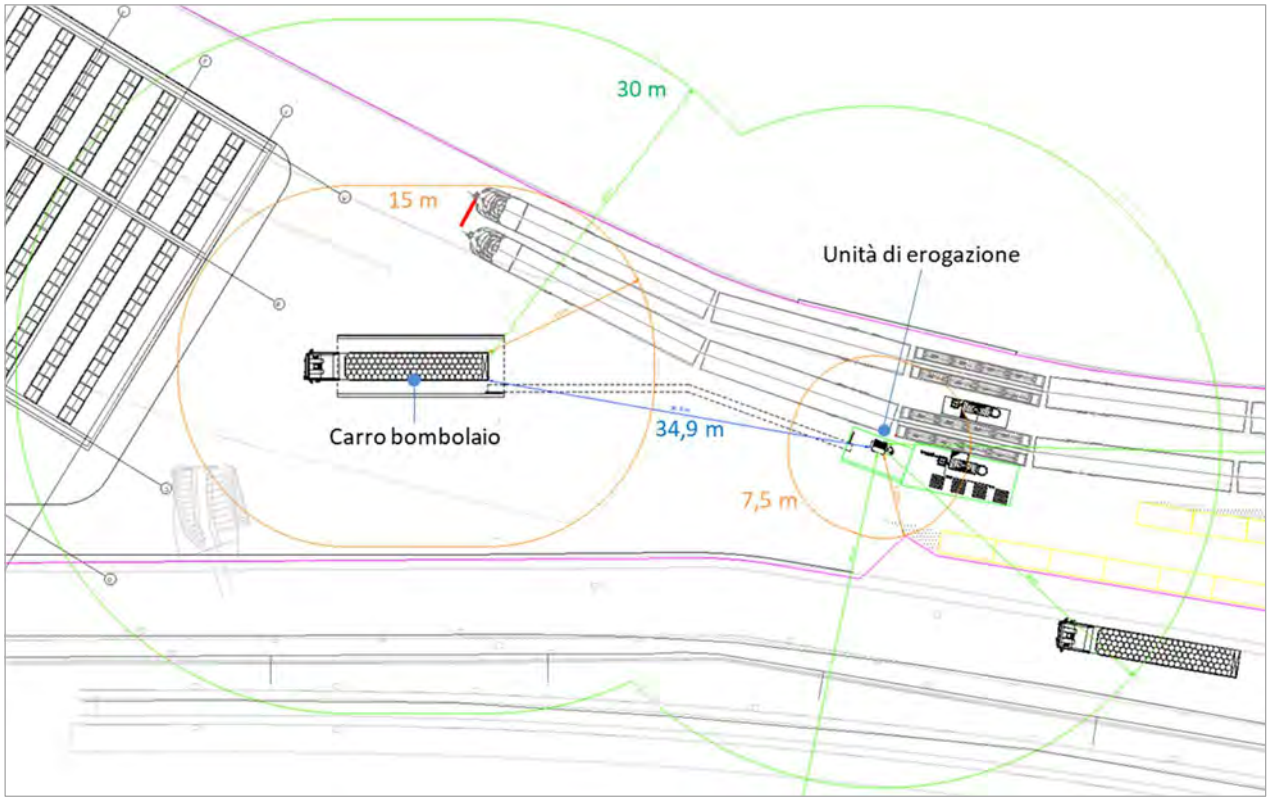


Figura 2. Planimetria distanze di sicurezza

Si evidenzia come le regole tecniche nei diversi stati europei e anche nei paesi extra europei siano disomogenee tra loro e prescrivano distanze di sicurezza differenti nonostante l'applicazione sia la medesima. Lo stesso standard internazionale di riferimento ISO/FDIS 19880-1 [6], al momento della sua stesura, riporta come valide tutte le distanze di sicurezza imposte dai vari paesi evidenziando un ampio intervallo di risultati non coerenti tra loro. Viene reso disponibile anche il link a un documento [10] che riporta informazioni risalenti al 2016 che rilevano differenti distanze di sicurezza applicabili nei vari paesi. Si suggerisce quindi di definire linee guida di armonizzazione degli standard tecnici da applicare.
Si sottolinea inoltre che il calcolo delle distanze di sicurezza basato su un'analisi di rischio può portare a risultati differenti a seconda della metodologia utilizzata e dei parametri di calcolo considerati (es. ai fini della classificazione delle aree ATEX, CEI 31-87 vs Purple Book vs World Bank). Ancora una volta quindi si evidenzia l'esigenza di avere delle linee guida chiare e uniformi, allineate allo stato dell'arte.

4. Carro bombolaio

L'assenza di compressori e stoccaggi fissi in sito combinata con la capacità di rifornimento richiesta ha comportato la necessità di realizzare un nuovo carro bombolaio in grado di trasportare idrogeno ad una pressione di lavoro di 500 bar (Pressione di calcolo delle bombole 750 barg), in quanto i tradizionali carri bombolai utilizzati ad oggi in Italia per il trasporto di idrogeno hanno una pressione di lavoro di

200 barg, insufficiente per poter raggiungere la pressione di 350 barg all'interno dei serbatoi del treno senza l'utilizzo di compressori.
Dal punto di vista normativo il carro bombolaio a 500 barg rispetta le medesime normative di riferimento dei tradizionali carri a 200 barg e non risente quindi di alcuna restrizione aggiuntiva per la circolazione su strada. Si riportano come principali normative applicabili l'accordo ADR 2023 [2] e la Direttiva 2010/35/UE (TPED) [3], oltre alle normative e regolamenti applicabili per il traffico veicolare.
Al fine di mantenere il peso complessivo del carro bombolaio al di sotto del limite massimo imposto dalle norme del trasporto su gomma a livello europeo dalla Direttiva 96/53/CE [11], è stato necessario utilizzare per lo stoccaggio dell'idrogeno bombole di Tipo 4, cioè bombole realizzate con un liner interno di materiale plastico (poliammide) e un rivestimento esterno in materiale composito. Questa tipologia di bombole si differenzia dalle bombole di Tipo 1, realizzate interamente in acciaio, utilizzate normalmente per il trasporto dell'idrogeno a 200 barg, perché permette di immagazzinare idrogeno ad una pressione di 500 barg mantenendo però un peso molto contenuto; questa caratteristica rende le bombole di Tipo 4 , realizzate rispettando la norma UNI EN 17339:2020 [12] e certificate in conformità alla Direttiva 2010/35/UE (TPED) [3], particolarmente adatte per le applicazioni in cui è necessario trasportare gas ad alte pressioni.
Il carro bombolaio così realizzato permette di trasportare una massa di idrogeno di circa 1230kg, pari a circa 3,5 volte la massa trasportabile con un carro bombolaio tradizionale a 200 barg, mantenendo lo stesso peso complessivo del mezzo. In questo modo la logistica per la fornitura del gas risulta estremamente vantaggiosa permettendo di ridurre il numero di trasporti necessari, con conseguente impatto positivo sulle emissioni in atmosfera generate dal mezzo di trasporto e sul prezzo finale della molecola di idrogeno.
Ovviamente è necessario considerare che l'idrogeno caricato sul carro bombolaio deve essere compresso ad una pressione più alta con conseguente consumo di energia per il sistema di compressione nel sito di produzione; quindi, i vantaggi generati dalla logistica a 500 barg risultano tanto più rilevanti quanto maggiore è la distanza tra il punto di produzione e il punto di utilizzo dell'idrogeno. È in corso la fase operativa di utilizzo dei carri bombolai che permetterà di monitorare i dati reali e valutare gli effettivi benefici rispetto alla logistica a 200 barg, sia in termini economici che di emissioni di CO_2 in atmosfera.
È opportuno citare che l'utilizzo delle bombole di Tipo 4 implica anche alcuni svantaggi:

- l'utilizzo di un numero più elevato di bombole con conseguente aumento della complessità impiantistica;
- l'esecuzione della prima messa in pressione secondo una procedura specifica con incremento di pressione controllato;
- e il mantenimento della pressione all'interno delle bombole sempre ad un valore superiore a 20 barg.

L’impiego di bombole in composito sempre più diffuso nel mercato anche per il contenimento di sostanze classificate pericolose, rispetto ai più diffusi autorespiratori indossabili, introdurrà interessanti spunti di approfondimento sulle metodologie ed esperienze necessarie allo svolgimento dei controlli periodici di integrità dei materiali costituenti i contenitori (si veda ISO11623 [13]).

5. Conduzione impianto

Il carro bombolaio, una volta parcheggiato all’interno del box dedicato, viene collegato all’impianto di distribuzione del gas tramite una tubazione flessibile che è fissata in maniera permanente all’impianto di distribuzione fisso e viene collegata al raccordo presente sul pannello valvole a bordo del carro bombolaio.
L’operazione di rifornimento viene gestita completamente tramite l’unità di erogazione al cui interno sono presenti tutti i sistemi per comandare l’apertura e chiusura delle valvole pneumatiche, poste sul carro bombolaio, e per gestire l’operazione di rifornimento.
Il trasferimento dell’idrogeno dal carro bombolaio avviene per travaso grazie alla differenza di pressione tra la sorgente e i serbatoi del treno, quindi senza la necessità di ulteriori fasi di compressione del gas. L’operazione avviene in maniera automatica e controllata per garantire il mantenimento dei parametri di processo e lo svolgimento in sicurezza sulla base dello standard internazionale SAE J2601 MAR2010 [14].
Il volume complessivo delle bombole del carro bombolaio è suddiviso in otto sezioni, ciascuna intercettata sia da una valvola manuale che da una valvola automatica. Durante l’operazione di rifornimento le valvole automatiche di ciascuna sezione vengono aperte in maniera sequenziale, in base al comando proveniente dall’unità di erogazione: quando la pressione della prima sezione arriva in prossimità della pressione del serbatoio del treno, con conseguente diminuzione della portata di idrogeno in travaso, il sistema passa alla seconda sezione che si trova a pressione maggiore, e così via. In questo modo si massimizza il quantitativo di idrogeno travasabile dal carro bombolaio al treno, che risulta maggiore rispetto al caso in cui il carro bombolaio non fosse suddiviso in sezioni. Nonostante questa ottimizzazione, siccome il rifornimento avviene esclusivamente per travaso, è inevitabile al termine delle operazioni la presenza di un residuo di idrogeno nel carro bombolaio, la cui quantità dipende dalla pressione iniziale del serbatoio del treno da rifornire e dal numero di rifornimenti eseguiti. L’obiettivo è minimizzare il più possibile il residuo di idrogeno del carro bombolaio in modo tale da ridurre il rischio legato alla presenza di idrogeno su strada e ottimizzare energeticamente ed economicamente il trasporto del gas. L’attuale fase operativa della stazione è volta a un’ottimizzazione che prevede di eseguire il riempimento del carro bombolaio con un quantitativo tale da soddisfare l’esigenza di rifornimento e minimizzare il residuo di gas nel carro bombolaio al termine delle operazioni.

Le attività di rifornimento sono effettuate da un solo operatore che, dopo aver collegato il flessibile, ha la sola funzione di controllo (da posizione sicura) che il loop automatico di rifornimento funzioni correttamente.
L'impianto è dotato di tutti i sistemi Fire&Gas (rilevamento e controllo temperatura, fughe di gas, fiamma) e di protezione antincendio prescritti dal 23 ottobre 2018 [1]. In caso di intervento del sistema Fire&Gas o di azionamento di uno dei pulsanti di emergenza da parte dell'operatore viene disalimentata elettricamente l'unità di erogazione interrompendo l'operazione di rifornimento, viene intercettata la sorgente di idrogeno tramite chiusura della valvola automatica di radice del carro bombolaio e, infine, vengono automaticamente depressurizzate tutte le linee contenenti idrogeno tramite apertura di valvole automatiche di sfiato in atmosfera. Se l'evento segnalato dal sistema Fire&Gas è relativo alla presenza di fiamma o innalzamento di temperatura all'interno del box del carro bombolaio, oltre a tutte le azioni appena descritte, viene attivato un sistema di raffreddamento ad acqua per evitare che le bombole del carro bombolaio si surriscaldino e vadano in sovrapressione.

6. Conclusioni

Il progetto dimostra come, in alcune applicazioni che richiedono un utilizzo della stazione di rifornimento idrogeno non continuativo, una soluzione impiantistica semplificata costituita dalla sola presenza di un carro bombolaio, fonte di alimentazione dell'idrogeno, e dall'unità di erogazione, che gestisce il trasferimento dell'idrogeno dal carro bombolaio al veicolo, possa essere la soluzione ottimale.
Una configurazione di questo tipo permette di:

- Evitare l'installazione di uno stoccaggio di idrogeno fisso, limitando i tempi di permanenza dell'idrogeno in sito e riducendo quindi tutti i rischi ad esso associati;
- Evitare la presenza di produzione e compressione dell'idrogeno in sito, con conseguente ottimizzazione e semplificazione della gestione e manutenzione dell'impianto;

Al contempo l'utilizzo della logistica a 500 barg per il trasporto e la fornitura dell'idrogeno garantisce il soddisfacimento delle prestazioni di rifornimento richieste e risulta essere una soluzione vantaggiosa per applicazioni di questo tipo in ambito mobilità.
La fornitura di idrogeno compresso tramite carri bombolai ad oggi risulta essere già capillarmente diffusa, soprattutto in ambito industriale, e l'incremento di pressione rispetto alla tradizionale logistica a 200 barg, permette di ridurre le emissioni in atmosfera e i costi legati al trasporto, soprattutto quando la distanza tra il punto di produzione e il punto di utilizzo dell'idrogeno è rilevante.
Il progetto ha portato alla luce però anche alcune criticità, in quanto l'applicazione delle prescrizioni contenute nel d.m. 23 ottobre 2018 [1] ha comportato l'adozione di alcune soluzioni tecniche che hanno reso più complesso l'impianto andando contro la filosofia di semplificazione adottata come requisito progettuale; in particolare si

evidenza la necessità di uniformare le metodologie di calcolo e i risultanti valori delle distanze di sicurezza prescritte nei vari paesi, sia europei che extra europei, per questo tipo di applicazioni legate all'idrogeno.

Bibliografia

[1] Decreto Ministeriale del 23 ottobre 2018. *Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione*

[2] Economic Commission for Europe Inland Transport Committee. ADR 2023. *Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*

[3] DIRETTIVA 2010/35/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 giugno 2010 *in materia di attrezzature a pressione trasportabili e che abroga le direttive del Consiglio 76/767/CEE, 84/525/CEE, 84/526/CEE, 84/527/CEE e 1999/36/CE*

[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] Decreto Ministeriale del 31 agosto 2006. *Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione. (Abrogato dal d.m. 23/10/2018).*

[6] ISO/TC 197. ISO/FDIS 19880-1. *Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 1: General requirements*

[7] DM n. 329 del 01/12/2004. *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*

[8] 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.*

[9] DM 9 maggio 2007. *Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

[10] https://standards.iso.org/iso/19880/-1/ed-1/en. *Example Safety Distances For Hydrogen Fuelling Stations*

[11] Direttiva 96/53/CE del Consiglio del 25 luglio 1996 *che stabilisce, per taluni veicoli stradali che circolano nella Comunità, le dimensioni massime autorizzate nel traffico nazionale e internazionale e i pesi massimi autorizzati nel traffico internazionale.*

[12] UNI EN 17339:2020. *Bombole per gas trasportabili - Bombole e tubi completamente avvolti in composito di carbonio per l'idrogeno*

[13] UNI EN ISO 11623:2023. *Bombole per gas - Bombole di materiale composito - Ispezione e prove periodiche*

[14] SAE International. SAE J2601 MAR2010. *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*

Analisi degli scostamenti dai requisiti essenziali di sicurezza più frequentemente rilevati in fase di riesame della documentazione presentata dai fabbricanti PED

F. Giacobbe[1], E. M. Carducci[2], R. Martini[2], F. Buti[2], L. Pugliese[2]

[1]Inail - UOT di Messina
[2]Inail - Dit - Organismo Notificato per le direttive di prodotto

Sommario
Gli Organismi Notificati (ON) per le direttive europee di prodotto, tra cui la Pressure Equipment Directive 2014/68/UE (PED), attuano le procedure di valutazione della conformità previste dall'allegato II. La loro operatività comprende l'esecuzione delle attività di valutazione tecnica (es. esame del progetto, prove, ispezioni e audit), il riesame indipendente e la successiva delibera. La decisione finale sull'emissione del certificato è assunta dal comitato di delibera, sulla base delle risultanze della valutazione e del riesame, in riferimento ai Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES) dell'allegato I e ai requisiti specifici del modulo applicato.
La presente memoria riporta i risultati dell'analisi statistica dei rilievi emersi nelle attività di riesame svolte nel biennio 2024÷2025 nell'ambito della valutazione della conformità condotta da INAIL ON 0100. I rilievi, registrati durante gli audit presso fabbricanti che hanno adottato il modulo qualità, sono stati raccolti tramite l'applicativo gestionale delle pratiche concluse e classificati in base ai RES e/o ai requisiti del sistema qualità.
L'elaborazione statistica ha consentito di individuare ed analizzare le diverse casistiche, ed in particolare i RES ed i requisiti del SQ aventi indici di frequenza elevati nonché l'incidenza del peso del rilievo (Non Conformità – NC; Osservazione – OSS; Raccomandazione - RAC).
Tali esiti, forniscono elementi utili per orientare azioni mirate di formazione e sensibilizzazione del personale tecnico coinvolto nelle attività di certificazione. L'approccio adottato rappresenta uno strumento di miglioramento continuo, favorendo maggiore omogeneità e robustezza nelle valutazioni di conformità.

1. Introduzione

La Direttiva 2014/68/UE disciplina la progettazione, la fabbricazione e la valutazione di conformità per l'immissione nel mercato comunitario delle attrezzature a pressione con PS > 0,5 bar. I moduli, la cui scelta dipende dalla categoria dell'attrezzatura (I÷IV) e dal tipo di prodotto (recipiente, tubazione, generatore), sono schemi procedurali standardizzati, previsti dall'Allegato III della PED, che stabiliscono le fasi di verifica (progettazione, produzione o entrambe eventualmente gestite con un approccio sistemico) ed il livello di intervento dell'Organismo Notificato.

In tale contesto, l'analisi statistica degli esiti degli audit, nei casi dei moduli "qualità", costituisce uno strumento essenziale per valutare l'efficacia dei processi implementati in qualità di Organismo Notificato e supportare un approccio basato sul rischio.

2. Caratteristiche e descrizione del campione

L'analisi è stata sviluppata con l'obiettivo di valutare, in chiave statistica, gli esiti degli audit condotti presso fabbricanti che applicano moduli di garanzia della qualità (H e H1) nell'ambito della Direttiva 2014/68/UE. Il campione considerato comprende 9 differenti fabbricanti e un totale di 32 audit condotti nel periodo 2024÷2025, includendo sia audit iniziali di rinnovo, sia audit periodici di sorveglianza e sia audit non programmati.

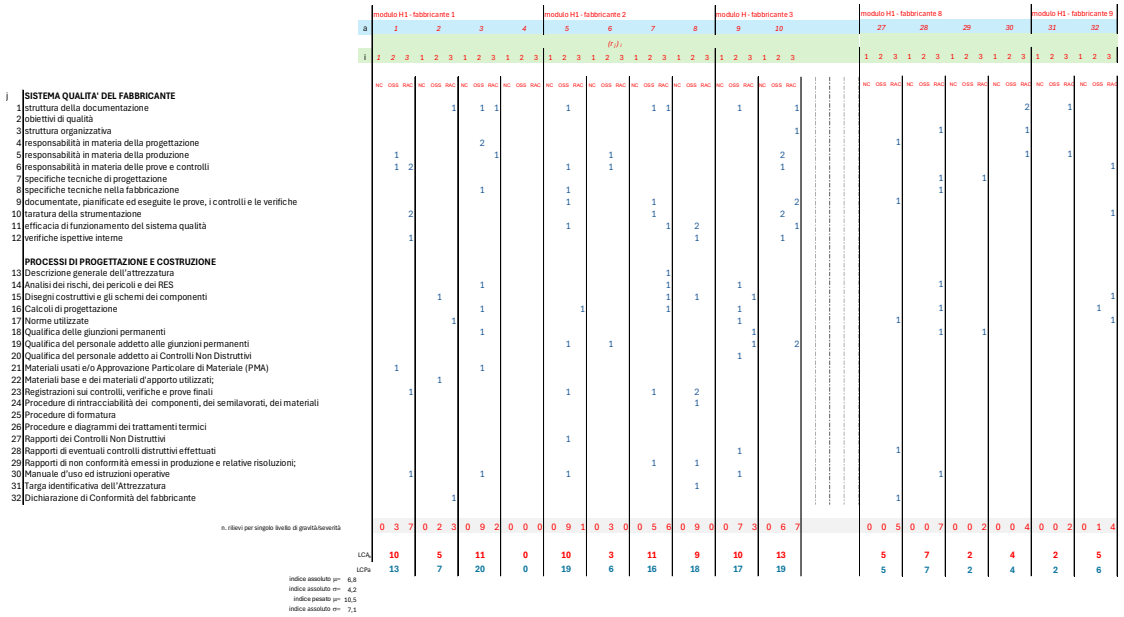


Figura 1. Stralcio del campione con indicazione dei rilievi emersi negli audit

L'unità di analisi è rappresentata dal singolo audit, mentre l'unità organizzativa di riferimento è il fabbricante. Tale impostazione consente di osservare sia le dinamiche interne alla singola organizzazione nel tempo, sia le differenze inter-aziendali in termini di distribuzione e ricorrenza dei rilievi.

Lo strumento di rilevazione e riferimento utilizzato durante gli audit è costituito da una check list strutturata in 32 argomenti sui requisiti previsti dalla PED per il fabbricante, articolati in due macro-ambiti: il "sistema qualità del fabbricante" e i "processi di progettazione e costruzione".

Per quanto concerne il "sistema qualità del fabbricante", i 12 argomenti previsti sono stati ulteriormente aggregati in sei aree (A÷F) mentre per i "processi di progettazione e costruzione" i 20 argomenti sono stati aggregati in cinque aree (G÷M). Tali raggruppamenti, aree che denominiamo nel prosieguo come "macrocontesti

funzionali", sono stati attuati al fine di ridurre la frammentazione del dato e consentire un'analisi statistica più robusta e significativa. Gli 11 "macrocontesti funzionali" riguardano: (A) la documentazione del sistema qualità, (B) l'organizzazione e gli obiettivi, (C) la progettazione, (D) la fabbricazione, (E) le prove e la gestione della strumentazione, (F) l'efficacia complessiva del sistema qualità, (G) fascicolo progettuale, (H) giunzioni permanenti, (I) prove e controlli, (L) lavorazioni e rintracciabilità, (M) documentazione a corredo.
Le non conformità rilevate durante gli audit sono state considerate come variabili discrete e analizzate secondo criteri di frequenza assoluta e relativa. L'elaborazione statistica ha previsto una prima fase descrittiva, finalizzata a determinare la distribuzione dei rilievi per argomento.
I rilievi formalizzati a conclusione dell'attività di audit presso il fabbricante, in funzione della loro incidenza rispetto alla conformità imposta dalla direttiva, sono stati classificati su tre livelli caratterizzati da gravità/severità decrescente: Non Conformità (NC), Osservazione (OSS) e Raccomandazione (RAC).
L'impostazione metodologica adottata privilegia un approccio descrittivo-comparativo, considerata la numerosità contenuta del campione, pur consentendo l'individuazione di trend ricorrenti e argomenti di maggiore criticità.
Nel complesso, la metodologia mira a integrare l'analisi qualitativa tipica dell'attività di audit con strumenti quantitativi di lettura del dato, in un'ottica di supporto alla pianificazione della sorveglianza basata sul rischio e di miglioramento continuo dell'efficacia dei moduli qualità previsti dalla Direttiva 2014/68/UE.
Per discretizzare la numerosità dei rilievi, per singolo argomento, sono stati definiti tre ordini di criticità (alta: ≥10 rilievi; media: ≥4 rilievi ≤9; bassa: ≤3).
Sono stati ideati due indici per determinare la rappresentatività sia della frequenza di accadimento (Livello Criticità Assoluta - LCA) che della frequenza di accadimento tenuto conto del livello di gravità del rilievo (Livello Criticità Pesato - LCP).
Il sistema di valutazione della criticità degli argomenti si basa su:

- 32 argomenti, indicizzati con $j \in \{1, 2, 3, \ldots\ldots, 32\}$
- 3 tipologie di rilievo, indicizzati con $i \in \{1, 2, 3\}$, classificati in funzione della gravità:
    - Non Conformità (NC); Osservazioni (OSS); Raccomandazioni (RAC)

A ciascuna tipologia di rilievo è associato un peso di criticità (indicizzato con w_i), crescente non lineare con la gravità:

$$w_1 = 4 \text{ (per le NC)} \qquad w_2 = 2 \text{ (per le OSS)} \qquad w_3 = 1 \text{ (per le RAC)}$$

Per ogni argomento j, il numero di eventuali rilievi emessi per ciascuna tipologia di gravità è indicato con:

$r_{j\,i}$ dove: $i = 1 \rightarrow$ relativamente alle NC
$i = 2 \rightarrow$ relativamente alle OSS
$i = 3 \rightarrow$ relativamente alle RAC

Introduciamo l'indice k:

$k = 1, \dots, n_j$ indice dei rilievi formalizzati nell'audit per l'argomento j

$n_j \in \mathbb{N}$ numero totale di rilievi registrati per l'argomento j

Introduciamo la variabile indicatrice δ_{ijk}:

$$\delta_{ijk} = \begin{cases} \text{assume valore 1} & \text{se il rilievo k dell'argomento j è di tipo i, ovvero NC oppure OSS oppure RAC} \\ \text{assume valore 0} & \text{se diverso da tipo i (nessun rilievo registrato, argomento j valutato conforme)} \end{cases}$$

Il numero di rilievi di tipo i per l'argomento j è quindi:

$$r_{j\,i} = \sum_{k=1}^{n_j} \delta_{ijk}$$

Quanto sopra indicato vale per un singolo audit, ma per effettuare considerazioni a livello statistico questi devono essere molteplici. Indichiamo i singoli audit con la lettera a. Nel caso in esame $a \in \{1, 2, 3, \dots\dots, 32\}$.

<u>Calcolo del Livello di Criticità Assoluto</u>

Livello di Criticità Assoluto (LCA) è un indicatore di frequenza. L'indice LCA misura il numero totale di rilievi emessi, indipendentemente dalla loro gravità. È definito come:

$LCA_j = \sum_{i=1}^{3} r_{j\,i}$ rappresenta la quantità complessiva di rilievi emessi riferiti all'argomento *j*

$LCA_a = \sum_{j=1}^{32} \sum_{i=1}^{3} r_{j\,i}$ rappresenta la quantità complessiva di rilievi emessi riferiti all'audit *a*

<u>Calcolo del Livello di Criticità Pesato</u>

Il Livello di Criticità Pesato (LCP) è un indicatore di rischio/criticità. L'indice LCP tiene conto non solo del numero totale dei rilievi per un determinato argomento j, ma anche della loro gravità, trattasi quindi un fattore lineare ponderato di gravità, che attribuisce maggiore incidenza alle Non Conformità rispetto alle Osservazioni e alle Raccomandazioni. Tale valore rappresenta l'indice sintetico complessivo della gravità dei rilievi emersi in un determinato audit. Esso è definito come:

$LCP_j = \sum_{i=1}^{3} r_{j\,i}\, w_i$ rappresenta l'indice ponderato in funzione dei rilievi emessi riferiti all'argomento *j*

$LCP_a = \sum_{j=1}^{32} \sum_{i=1}^{3} r_{j\,i}\, w_i$ rappresenta l'indice ponderato complessiva di rilievi emessi riferiti all'audit a

<u>Determinazioni numeriche in forma matriciale</u>

È possibile ritrarre in modo compatto il sistema, attraverso una rappresentazione matriciale del modello. Si introduce, pertanto, la matrice dei rilievi:

$$R = \begin{bmatrix} r_{1\,1} & r_{1\,2} & r_{1\,3} \\ r_{2\,1} & r_{2\,2} & r_{2\,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{j\,1} & r_{j\,2} & r_{j\,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{32\,1} & r_{32\,2} & r_{32\,3} \end{bmatrix}$$

dove $R \in \mathbb{R}^{32\times 3}$

Si definiscono inoltre:

il vettore colonna dei pesi

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{dove } w \in \mathbb{R}^{3\times1}$$

I vettori unitari di sommazione

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{dove } \tau \in \mathbb{R}^{3\times1}$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \cdot\cdot \\ \gamma_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cdot\cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{dove } \gamma \in \mathbb{R}^{32\times1}$$

Dai seguenti prodotti matriciali otteniamo gli indici LCA e LCP:

	Livello di Criticità Assoluto		Livello di Criticità Pesato	
per argomento *j*				
	$LCA_j = R * \tau$	dove $\text{LCA}_j \in \mathbb{R}^{32\times1}$	$LCP_j = R * w$	dove $\text{LCP}_j \in \mathbb{R}^{32\times1}$.
per singolo audit *a*				
	$LCA_a = \gamma^T * (R * \tau)$	dove $\text{LCA}_a \in \mathbb{R}^{1\times1}$	$LCP_a = \gamma^T * (R * w)$	dove $\text{LCP}_a \in \mathbb{R}^{1\times1}$

3. Analisi statistica degli esiti degli audit sui moduli qualità

Per poter analizzare gli esiti degli audit ed esprimere le conseguenti considerazioni tecniche sono stati introdotti due indici. Il primo denominato Livello di Criticità Assoluto (LCA) permette di quantificare la numerosità di tutti i rilievi emessi per singolo argomento j, il secondo denominato LCP oltre che tener conto della numerosità introduce un fattore che considera la gravità del rilievo, ovvero se trattasi di Non conformità, Osservazione o Raccomandazione. Sia per LCA che per LCP, come già illustrato nel paragrafo precedente, per discretizzare la numerosità dei rilievi, sono stati definiti tre ordini di criticità, ovvero: alta: ≥10 rilievi (colore rosso); media: ≥4 rilievi ≤9 (colore giallo); bassa: ≤3 (colore verde).

Attraverso una rappresentazione ad istogramma si distinguono facilmente i casi ove registrano le maggiori o minori ripetitività. Al fine di dare una classificazione sono state distinte 3 fasce orizzontali caratterizzate da diversi intervalli di tassi di accadimento. In particolare: colore verde = bassa frequenza; colore giallo = media frequenza; colore rosso = alta frequenza.

<u>Argomenti inerenti il sistema qualità del fabbricante</u>

Si evidenzia, in generale, che gli auditor non hanno rilevato condizioni critiche tali da emettere Non Conformità evidenziando la condizione che i SQ implementati dai singoli fabbricanti sono risultati formalmente conformi con la presenza di aree con debolezza organizzativa e documentale. Pertanto, i rilievi riguardano solamente aspetti classificati con livello di raccomandazione ed osservazione. In particolare, le osservazioni sono in maggioranza, in percentuale pari al 63%. La frequenza di accadimento maggiore, quasi il 18% dei casi, si registra in merito all'argomento "responsabilità in materia della produzione" (vedi figure 2 e 3).

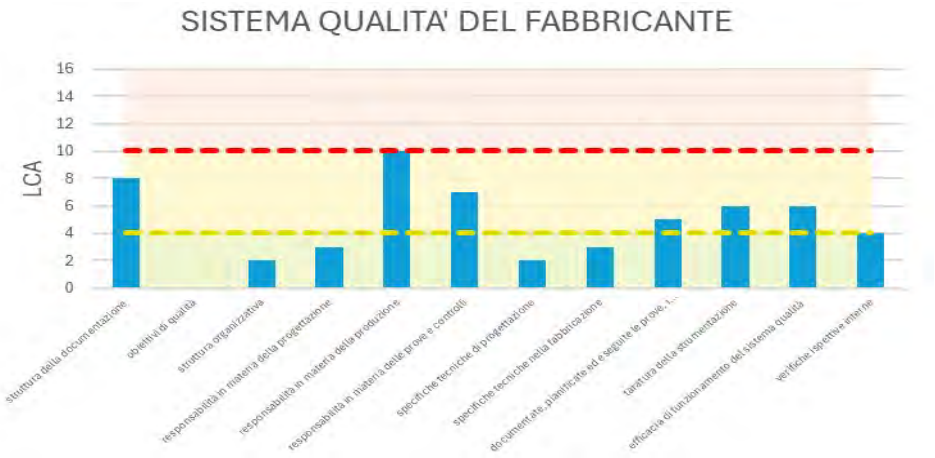


Figura 2. Rappresentazione statistica con indicazione frequenze di accadimento dei rilievi emersi in riferimento al sistema qualità del fabbricante

	SISTEMA QUALITA' DEL FABBRICANTE j argomento	NC w_1	rilievo OSS w_2	RAC w_3	LCA livello criticità assoluto	%	LCP livello criticità pesato
A	1 struttura della documentazione	0	4	4	8	14,3	12
B	2 obiettivi di qualità	0	0	0	0	0,0	0
B	3 struttura organizzativa	0	0	2	2	3,6	2
C	4 responsabilità in materia della progettazione	0	3	0	3	5,4	6
D	5 responsabilità in materia della produzione	0	7	3	10	17,9	17
E	6 responsabilità in materia delle prove e controlli	0	5	2	7	12,5	12
C	7 specifiche tecniche di progettazione	0	1	1	2	3,6	3
D	8 specifiche tecniche nella fabbricazione	0	3	0	3	5,4	6
E	9 documentate, pianificate ed eseguite le prove, i controlli e le verifiche	0	2	3	5	8,9	7
E	10 taratura della strumentazione	0	4	2	6	10,7	10
F	11 efficacia di funzionamento del sistema qualità	0	4	2	6	10,7	10
F	12 verifiche ispettive interne	0	2	2	4	7,1	6
		0	35	21	56		
		0,0%	62,5%	37,5%			

Figura 3. Resoconto dei rilievi secondo la loro classificazione ed indicazione dei parametri LCA e LCP in riferimento al sistema qualità del fabbricante

L'indice LCP, rispetto all'indice LCA, permette di individuare in forma più mirata i diversi argomenti che presentano lacune da strutturare (es. la responsabilità in materia delle prove e controlli, struttura della documentazione).

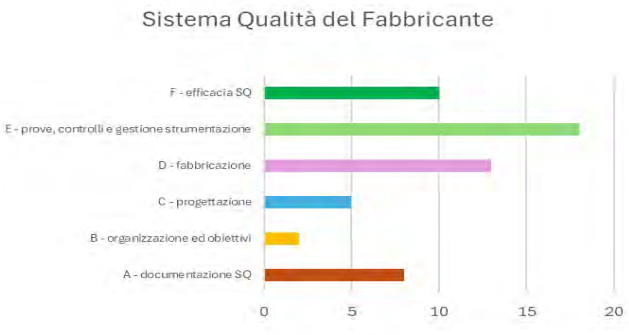


Figura 4. Istogramma per macrocontesti – Sistema Qualità del fabbricante

Ai fini di organizzare gli argomenti (j) per macrocontesti, è stata effettuata una sintesi che permette di focalizzare l'attenzione su sole 6 voci (documentazione SQ; organizzazione ed obiettivi; progettazione; fabbricazione; prove, controlli e gestione strumentazione; efficacia SQ) rispetto ai 12 iniziali argomenti di cui ai commenti già espressi. In queste nuove condizioni di analisi si evidenziano punti forza in merito agli obiettivi, alla struttura organizzativa e alle specifiche tecniche di progettazione.

Macrocontesti che manifestano debolezza a livello sistemico risultano essere collegate all'operatività delle fasi di costruzione (vedi figura 4).

Argomenti inerenti i processi di progettazione e costruzione

Si evidenzia, anche in questo caso, che gli auditor non hanno rilevato condizioni critiche tali da emettere rilievi classificati con la più alta gravità (Non Conformità). Si osserva un sostanziale costante andamento quasi sempre circoscritto nella fascia di color verde, ovvero di frequenza di accadimento bassa. Ciò indica che non si riscontrano specifiche fasi dei processi di progettazione e costruzione che manifestano carenze. I rilievi classificati come osservazioni si attestano intorno al 67% mentre le raccomandazioni sono dell'ordine del 33%. La frequenza di accadimento maggiore, quasi il 13% dei casi, si registra in merito all'argomento "registrazione dei controlli, verifiche e prove finali".



Figura 5. Rappresentazione statistica con indicazione frequenze di accadimento dei rilievi emersi in riferimento ai processi di progettazione e costruzione

	j	PROCESSI DI PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE argomento	NC w_1	rilievo OSS w_2	RAC w_3	LCA livello criticità assoluto	%	LCP livello criticità pesato
G	13	Descrizione generale dell'attrezzatura	0	0	2	2	3,6	2
G	14	Analisi dei rischi, dei pericoli e dei RES	0	2	1	3	5,5	5
G	15	Disegni costruttivi e gli schemi dei componenti	0	3	2	5	9,1	8
G	16	Calcoli di progettazione	0	2	2	4	7,3	6
G	17	Norme utilizzate	0	1	1	2	3,6	3
H	18	Qualifica delle giunzioni permanenti	0	1	1	2	3,6	3
H	19	Qualifica del personale addetto alle giunzioni permanenti	0	2	3	5	9,1	7
I	20	Qualifica del personale addetto ai Controlli Non Distruttivi	0	2	1	3	5,5	5
G	21	Materiali usati e/o Approvazione Particolare di Materiale (PMA)	0	4	0	4	7,3	8
G	22	Materiali base e dei materiali d'apporto utilizzati;	0	2	0	2	3,6	4
I	23	Registrazioni sui controlli, verifiche e prove finali	0	5	2	7	12,7	12
L	24	Procedure di rintracciabilità dei componenti, dei semilavorati, dei materiali	0	1	0	1	1,8	2
L	25	Procedure di formatura	0	0	0	0	0,0	0
L	26	Procedure e diagrammi dei trattamenti termici	0	0	0	0	0,0	0
I	27	Rapporti dei Controlli Non Distruttivi	0	2	0	2	3,6	4
I	28	Rapporti di eventuali controlli distruttivi effettuati	0	1	0	1	1,8	2
L	29	Rapporti di non conformità emessi in produzione e relative risoluzioni;	0	2	0	2	3,6	4
M	30	Manuale d'uso ed istruzioni operative	0	3	1	4	7,3	7
M	31	Targa identificativa dell'Attrezzatura	0	1	0	1	1,8	2
M	32	Dichiarazione di Conformità del fabbricante	0	0	1	1	1,8	1
			0	34	17	51		
			0,0%	66,7%	33,3%			

Figura 6. Resoconto dei rilievi secondo la loro classificazione ed indicazione dei parametri LCA e LCP in riferimento ai processi di progettazione e costruzione

In questo caso l'indice LCP, rispetto all'indice LCA, non introduce particolari nuove considerazioni tranne il fatto di evidenziare un numero maggiori di argomenti (j) che hanno una criticità media (vedi figure 5 e 6).
Organizzando gli argomenti (j) per macrocontesti, è stata effettuata una sintesi che permette di focalizzare l'attenzione su sole 5 voci (fascicolo progettuale, giunzioni permanenti, prove e controlli, lavorazioni e rintracciabilità, documentazione a corredo) rispetto ai 20 iniziali argomenti di cui ai commenti già espressi. In queste nuove condizioni di analisi si evidenziano punti forza in merito alle lavorazioni e rintracciabilità. Macrocontesti che manifestano poca robustezza risultano essere collegati al fascicolo progettuale alle attività di prove e controlli (vedi figura 7).

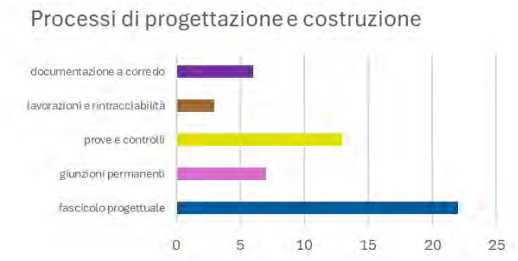


Figura 7 – Istogramma per macrocontesti – Processi di progettazione e costruzione

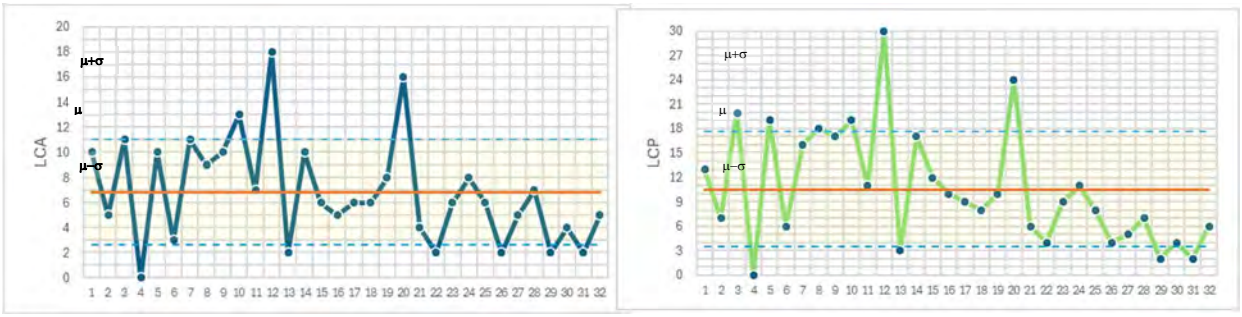
4. Analisi dei dati per singolo fabbricante



Figura 8. Andamenti LCP_a dei rilievi registrati per singolo fabbricante nel periodo 2024÷2025

Come rappresentato in figura 8 gli andamenti dell'indice LCP_a nel biennio 2024-2025 per i 9 fabbricanti non sono risultati sostanzialmente uniformi. Questa variabilità, rappresentata e caratterizzata attraverso la retta di regressione lineare (tratto a punti), evidenzia la dinamicità tipica dell'approccio sistemico che è molto sensibile ai cambiamenti. Nei casi di un andamento decrescente (i casi fabbricante 1 e 7 presentano il gradiente maggiore) si riscontra un progressivo e costante miglioramento del livello di implementazione indicando conseguentemente un alto livello di maturità. Nei casi di un andamento crescente (i casi fabbricante 3 e 5 presentano il gradiente maggiore), che potrebbero indurre a credere in un peggioramento qualitativo (attraverso una lettura statistica), si riscontra comunque un effetto positivo (a livello gestionale sistemico) determinato dal miglioramento ottenuto dal fabbricante a seguito dell'attuazione delle azioni correttive preposte alla eliminazione delle cause che hanno determinato i rilievi. Entrambi gli andamenti si giudicano dunque come indici positivi del livello di applicazione e controllo dei

requisiti sistemici e di prodotto in quanto generale espressione di una maturità diretta (tendenza decrescente) e stimolata (tendenza crescente).
Ulteriori interessanti analisi vengono elaborate studiando la dispersione dei dati. Pertanto, per gli indici LCA_a e LCP_a è stata calcolata la media (μ) e la deviazione standard (σ). La rappresentazione grafica dei valori LCA e LCP con i rispettivi valori di media e deviazione standard (vedi figura 9) permetterà di commentare le oscillazioni normali del sistema e verificare se la variabilità dei dati rientra in un comportamento regolare e fisiologico.



singolo fabbricante nel periodo 2024-2025

5. Conclusioni

L'analisi statistica condotta sugli esiti degli audit relativi ai moduli qualità H e H1 nel biennio 2024÷2025 ha consentito di introdurre un modello quantitativo di valutazione della criticità, registrate nel corso degli audit di rinnovo e sorveglianza presso i fabbricanti che hanno adottato il modulo qualità, basato su due indicatori sintetici: il Livello di Criticità Assoluto (LCA) e il Livello di Criticità Pesato (LCP).
L'approccio adottato integra l'analisi qualitativa tipica dell'attività di audit con strumenti matematico-statistici, permettendo l'individuazione di argomenti ricorrenti, l'osservazione delle dinamiche evolutive nel tempo ed il confronto tra fabbricanti. I risultati evidenziano un generale livello di conformità dei sistemi qualità analizzati, non riscontrando la presenza di Non Conformità formali, ma con aree ricorrenti di debolezza nei macrocontesti relativi alle prove, controlli e gestione strumentazione nell'ambito del SQ e al fascicolo progettuale nell'ambito della progettazione e costruzione.
L'indice LCP si è dimostrato maggiormente efficace rispetto all'indice LCA nel discriminare gli argomenti ed i macrocontesti a maggiore impatto, conferendo una ponderazione correlata e coerente con la gravità del rilievo. L'analisi delle tendenze temporali suggerisce che la variabilità osservata nei singoli fabbricanti rappresenta un valido indicatore della dinamicità dei sistemi qualità e della loro capacità di recepire le azioni correttive.
Il modello proposto costituisce uno strumento replicabile per supportare un approccio di sorveglianza basato sul rischio, in coerenza con i principi di miglioramento continuo, attraverso una maggiore frequenza di sorveglianza in caso

di riscontro di LCP elevato. Ciò è in coerenza con quanto indicato nella direttiva PED che oltre alle ordinarie verifiche di sorveglianza prevede gli audit senza preavviso che risultano essere un ulteriore strumento per monitorare l'efficacia del SQ del fabbricante secondo un approccio risk based. In questa ottica indicazioni sul livello di rischio provengono oltre che dai dati caratteristici dell'attrezzatura (es. fluido, categoria, complessità costruttiva, ecc), dall'organizzazione del fabbricante (es. subappalti critici, trattamenti termici esternalizzati, CND complessi, nuove tecnologie, materiali innovativi, ecc) e dalla stabilità e robustezza del sistema qualità (es. storico delle non conformità, storico degli audit, turnover del personale chiave, modifiche strutturali, reclami e segnalazioni, ecc).

Bibliografia

[1] Zeman J.L., "The role of quality systems in the Pressure Equipment Directive, Technology", Law and Insurance, 3:3, 183-189, DOI: 10.1080/135993798349370, 1998

[2] Montgomery, Douglas C., "Introduction to statistical quality control", John wiley & sons, 2020

[3] E. Bemporad, F. Giacobbe, E.M. Carducci, F. Buti, L. Pugliese, "Raccolta dei dati ed analisi statistica dei rilievi emersi nell'ambito della valutazione di conformità di attrezzature e insiemi a pressione", atti safap 2023

Il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza a protezione di un reattore soggetto a scarico bifasico. Un'analisi comparata API 520: 2023 e UNI EN ISO 4126-10: 2024

M. Rigamonti[1]
A. Andolina[2]

[1]Ingegnere Chimico – Analista di Rischio ingegneria di processo
[2]Inail – UOT di Milano

Sommario
La regola di costruzione dei dispositivi di sicurezza è ormai consolidata in Europa con la UNI EN ISO 4126 che detta le condizioni di fabbricazione armonizzate alla direttiva di prodotto.
Con la pubblicazione della parte 10 della 4126 a maggio 2024 si completa l'analisi di dimensionamento che la norma armonizzata aveva trascurato, considerando tutti quei casi che prevedono il rilascio di miscele bifasiche in formazione immediatamente a monte del dispositivo di sicurezza o nel dispositivo stesso.
Gli autori propongono lo studio del dimensionamento del dispositivo di sicurezza a protezione di un recipiente, già eseguita utilizzando il metodo Omega della API 520 Parte I, ricalcolato con la nuova norma e facendo una lettura comparativa per le varie sostanze/miscele alle diverse condizioni termodinamiche di scarico.
L'elaborazione e la rappresentazione dei dati è effettuata tramite Mathcad®
Nell'evidenza che l'analisi di dettaglio dei fenomeni instazionari propri dello scarico bifasico sono fortemente dipendenti dalla geometria dei componenti del dispositivo di sicurezza, dalle condizioni di scarico e dal fluido, i risultati conseguiti evidenziano come una realistica modellazione della condizione di intervento sia fondamentale per l'analisi di rischio preliminare alla scelta del sistema di sicurezza idoneo per una famiglia molto ampia di reazioni di utilizzo comune nella chimica di processo.

1. Introduzione

Le ipotesi alla base del dimensionamento dei dispositivi di sicurezza installati a protezione delle attrezzature a pressione hanno fatto uso, negli anni, di diversi modelli dedicati a meglio rappresentare le condizioni di rilascio attraverso il dispositivo nelle condizioni effettive in cui questo avviene.
L'esperienza prova che solo una parte degli scenari di rilascio evolvono secondo la rappresentazione tradizionale liquido o vapore/gas, mentre lo scarico di più fasi contemporanee risulta spesso la regola generale.
Inoltre, ove sia realistica l'ipotesi di riscaldamento della carica del reattore possono verificarsi diverse condizioni dipendenti dal fluido, dalla velocità di reazione e dai gradienti termici: la conseguenza naturale è che i test sui reattori pilota non sempre sono indicativi dello sviluppo realistico dello scenario.

A titolo esemplificativo sono definite le condizioni di rilascio secondo i seguenti modelli:
— Temperato (tempered): i sistemi temperati sono quelli in cui lo sviluppo dello scenario prevede che la vaporizzazione della fase liquida rallenti l'aumento di temperatura: tipicamente, i sistemi temperati sono reazioni in fase liquida in cui un reagente (o solvente) costituisce una parte importante del contenuto del reattore.
— Gassoso (gassy): i sistemi gassosi sono quelli in cui la reazione indesiderata produce prodotti non condensabili e la velocità di aumento della temperatura non è temperata dall'ebollizione del liquido.
— Ibrido (hybrid): i sistemi ibridi sono quelli in cui la velocità di aumento della temperatura dovuta a una reazione indesiderata può essere temperata dall'ebollizione del liquido alla pressione del sistema, ma può anche dare origine alla generazione di gas non condensabile.
Dopo la caratterizzazione del sistema, è possibile selezionare l'equazione di dimensionamento appropriata [1].
Storicamente i modelli sono stati sviluppati supponendo condizioni diverse del fluido bifasico.
I modelli di "prima generazione" prevedono condizioni di:

- equilibrio (HEM): le due fasi mantengono invariate durante l'efflusso le proprie caratteristiche:
- termiche: non c'è scambio energetico tra le due fasi-comportamento adiabatico
- meccaniche: la fase liquida e la fase gas mantengono la stessa velocità relativa durante lo scarico (slip factor nullo)
- trasporto di materia nullo tra le fasi: la fase gas e la fase liquida sono disperse uniformemente durante lo scarico

L'API 520 Parte I descrive nel dettaglio l'applicazione del metodo [2].
I modelli di "seconda generazione" superano i modelli di prima generazione prevedendo ancora flussi omogenei complicati però dall' interazione tra due fasi: dinamica dell'ebollizione, formazione di bolle/coalescenza, trasferimento di massa tra le fasi, evidenziando l'aspetto di evaporazione e condensazione durante lo scarico. I modelli di seconda generazione richiedono lo sviluppo di equazioni diverse per le due fasi e quindi l'adozione di metodi di calcolo specifici per i sistemi non in equilibrio (HNE) [3].
Questi modelli sono applicati in campi dove è cruciale la descrizione realistica del comportamento delle singole fasi e delle loro interazioni durante il rilascio, in particolare diventa argomento dell'ingegneria di processo dove la progettazione di scambiatori di calore, reattori e colonne di distillazione richiede l'analisi puntuale delle condizioni di scarico del fluido per i diversi scenari prevedibili.
In sintesi, i modelli di analisi di flusso bifase di seconda generazione offrono una capacità di simulazione molto più dettagliata e predittiva rispetto ai modelli di prima generazione, diventando essenziali per la comprensione e l'ottimizzazione di sistemi bifase complessi.

2. Lo scarico dei sistemi bifase:

Il calcolo di dischi di rottura e valvole di sicurezza per sistemi bifase richiede l'analisi del comportamento del fluido bifase durante l'intervento del dispositivo per garantire - con un corretto dimensionamento - un rilascio sufficiente.

La premessa per la conduzione di un'analisi del rischio accurata prevede la determinazione delle portate di scarico richieste al dispositivo: solo con una precisa conoscenza del comportamento del fluido in termini di cinetica della reazione nelle condizioni ordinarie di lavoro e in quelle eccezionali prevedibili, e possibile operare la corretta scelta del tipo di dispositivo di protezione (disco di rottura, valvola di sicurezza a molla, valvola pilotata).

In linea del tutto generale la relazione di dimensionamento lega la superficie di scarico del dispositivo A_0 con la portata massica calcolata per lo scenario considerato $Q_{scenario}$ (in Kg/s) riferita alla portata specifica $\dot{m}_{dispositivo}$ – in kg/(m^{2}s) - che il dispositivo è in grado di garantire:

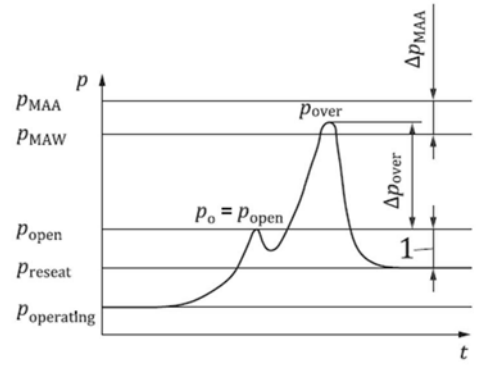
$$A_0 = \frac{Q_{scenario}}{\dot{m}_{dispositivo}} \qquad (1)$$

Nelle condizioni di scarico bifasico aumenta la portata massica da scaricare, di conseguenza viene richiesta una maggiore superficie di scarico del dispositivo. Inoltre, anche il termine $\dot{m}$ ne risente, soprattutto per le valvole di sicurezza, dove la progressione dello scarico fino all'alzata massima prevista potrebbe provocare la ricondensazione del fluido conseguente alla riduzione di pressione nel condotto di scarico.

Di fatto tutte le volte che viene previsto un comportamento di scarico monofasico e si verifica uno scenario di scarico liquido/gas o liquido/vapore, il dispositivo non è in grado di proteggere l'attrezzatura a pressione perché il calcolo del monofasico non è conservativo.

Inoltre, la progressione del rilascio gestita in termini di portata/pressione dal dispositivo di sicurezza, deve invece essere in grado di depressurizzazione in maniera adeguata e in tempi ragionevoli l'attrezzatura che protegge.

Per un sistema temperato si cerca di ottenere con il corretto dimensionamento del dispositivo di protezione il diagramma di figura 1[4]:



P_{MAA}=pressione massima accumulata
P_{MAW}= pressione massima ammissibile
P_{open}= pressione di apertura/taratura
P_{reseat}=pressione di richiusura (blowdown)
$P_{operating}$=pressione di esercizio dell'attrezzatura
Δp_{over}=sovrapressione del dispositivo
Δp_{MAA}=massima sovrapressione ammissibile

Figura 1. Scarico della pressione in un recipiente adeguatamente protetto (UNI EN ISO 4126-10 [4])

La via definita dalla norma permette di calcolare la portata massica specifica del dispositivo in funzione delle sue caratteristiche geometriche e delle tubazioni di ingresso e scarico, nelle condizioni di fluido vaporizzante e non vaporizzante, flusso critico o subcritico.

3. L'approccio UNI EN ISO 4126-10 e la definizione degli scenari di rilascio

3.1 Considerazioni generali e limiti di applicabilità del metodo

Le limitazioni del metodo influenzano sia il calcolo della portata da scaricare $Q_{scenario}$ che la scelta del dispositivo nei termini di $\dot{m}_{dispositivo}$. In particolare, valgono le seguenti condizioni preliminari:

- i sistemi vaporizzanti devono garantire che all'apertura del dispositivo la temperatura massima T_{over} e la pressione massima P_{over} si mantengano lontano dal punto critico del fluido in termini di T_c e P_c secondo le relazioni:

$$\frac{T_{over}}{T_c} < 0{,}9 \qquad \frac{P_{over}}{P_c} < 0{,}5 \qquad (2)$$

  Infatti, condizioni di pressione e temperatura vicine al punto critico portano a sovrastimare la portata da scaricare;
- fluidi sottoraffreddati o con condizioni di scarico vicino alle condizioni di saturazione devono tener conto del contributo entalpico della condensazione e la trasformazione deve essere descritta dall'equazione di stato dei gas reali;
- se il fluido da scaricare è un composto è necessario verificare che le temperature di saturazione dei componenti $i_{\text{-esimo}}$ e $j_{\text{-esimo}}$ in miscela siano ricompresi tutti in un intervallo di 100°C: $Tsat_i$-$Tsat_j$ < 100°C;
- i gas disciolti nel fluido devono essere in quantità trascurabile: la depressurizzazione dovuta all'intervento del dispositivo di sicurezza potrebbe portare alla liberazione dei gas con una variazione significativa e non calcolabile della fase gas da scaricare; in ogni caso lo scarico calcolato per una miscela bifasica in questo caso assumerebbe una configurazione "gassy" e quindi conservativa per il nostro calcolo.
- in caso di reazione runaway deve essere possibile assimilarla a quella di un sistema temperato e quindi garantire che il gradiente massimo di temperatura non superi i 2°C/secondo:

$$\left|\frac{dT}{dt}\right| over < 2\ \frac{^\circ C}{s} \qquad (3)$$

- In caso di reazione runaway si deve anche garantire che il gradiente massimo di pressione della reazione sia inferiore alla velocità di completa apertura del dispositivo di sicurezza:

$$\left|\frac{dP}{dt}\right| over < 20\,\frac{kPa}{s} \qquad (4)$$

  Se questa condizione non è verificata è necessario utilizzare dischi di rottura al posto di valvole di sicurezza che garantiscono tempi di apertura più rapidi.

Il metodo di calcolo non è applicabile a fluidi immiscibili.

3.2 L' Analisi di Rischio per il calcolo della portata massica da scaricare $Q_{scenario}$

L'identificazione della portata da scaricare richiede l'analisi di rischio che può essere sviluppata attraverso i dispositivi consolidati:
HaZop, LOPA, what if analysis, fault-tree analysis dove, in funzione della magnitudo dell'evento previsto e della frequenza calcolata dello stesso, è possibile prevedere non solo il tipo da dispositivo di scarico ma anche la predisposizione di una eventuale ridondanza.
La norma UNI EN ISO 4126-10 - Annex A, identifica alcuni scenari di riferimento che possono essere riassunti in tabella:

scenario /causa	Conseguenze-pressurizzazione dell'attrezzatura
Aumento incontrollato della portata massica dovuto a: • Malfunzionamento valvola regolatrice • Pompa o compressore fuori punto di funzionamento • Rottura tubo scambiatore con pressurizzazione dell'altra camera • Intercetto di tubazione di processo • Sovrariempimento	L'attrezzatura è sollecitata oltre la pressione di esercizio fino all'intervento del dispositivo di protezione- **sovrapressione**
Apporto termico eccessivo incontrollato dovuto a: • radiazione solare • fuoco • eccesso di riscaldamento da fluido di servizio	• Separazione di componenti bassobollenti se la temperatura di riscaldamento lo consente- **sovrapressione** • Dilatazione di liquido caldo imbottigliato- **sovrapressione**
Mancata dissipazione del calore di reazione dovuto a: • Mancanza di raffreddamento • Reazione runway per contaminanti • Eccesso di catalizzatore • Decomposizione inaspettata con liberazione di gas	Evoluzione verso uno scenario "gassy" o "hybrid" - **sovrapressione**

Tabella 1 - scenari e possibili conseguenze di sovrapressione

In ogni caso un elenco puntuale degli scenari prevedibili sono riportati nella norma UNI EN ISO 4126-10 (rif. Table 3), dove - per ognuna delle ipotesi previste - viene espressa la formula di calcolo da utilizzare.
È anche da tener presente che le norma armonizzate dedicate all'esercizio delle attrezzature a pressione possono prevedere la possibilità di un scenario simultaneo (es.: incendio esterno e perdita di isolamento), in tal caso sarà necessario un calcolo di $Q_{scenario}$ che preveda il contributo di tutti gli eventi considerati:

$$Q_{scenario} = \sum_1^n Q_i \qquad (5)$$

3.3 Le condizioni in ingresso al dispositivo di scarico

Lo scenario appena identificato al punto precedente può prevedere lo scarico bifasico ma la reazione della carica contenuta nell'attrezzatura a pressione può essere molto differente a seconda delle caratteristiche del fluido stesso:

- fluidi sottoraffreddati all'apertura del dispositivo dopo un primo scarico gassoso possono richiamare liquido dall'attrezzatura soprattutto per livelli di riempimento elevati;
- fluidi viscosi e sensibili alla formazione di foaming possono presentare la stessa evoluzione anche per livelli di riempimento molto più bassi.

Ambedue i fenomeni sono legati alla velocità di liberazione delle bolle di formazione dovute al riscaldamento che non riescono a raggiungere la fase gas residuale dell'apparecchio in tempo per sostituire il gas che è già stato scaricato dal dispositivo.
In questi casi il sistema evolve verso un modello non omogeneo ma ancora calcolabile, almeno per lo scenario incendio, e risulta sviluppato e valutato nella norma.

3.4. $Q_{scenario}$: *il caso di eccesso di riscaldamento per incendio esterno*

La norma citata [4] suggerisce alcune formule per quantificare la portata da scaricare per gli scenari previsti nella tabella 1 sopra riportata, concentrandosi sui casi:

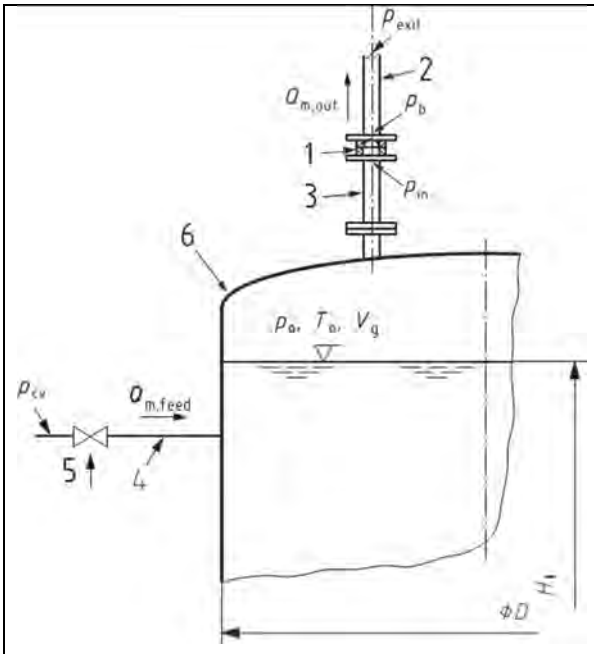
1. eccesso di portata - sovrariempimento
2. eccesso di riscaldamento dovuto al fuoco o alla mancanza di raffreddamento
3. eccesso di riscaldamento dovuto a una reazione fuggitiva

la portata massica calcolata deve poi essere corretta a seconda di come evolve la modalità di scarico (tempered, hybrid, gassy).
La valutazione degli autori prevede l'evoluzione dello scarico dovuto a incendio esterno di una carica dove la velocita di riscaldamento è "temperata" dal cambiamento di fase
Le equazioni di riferimento sono sintetizzate nella norma ISO 4126-10 (rif.: Table 3).

4. Calcolo della portata specifica scaricabile dal dispositivo $\dot{m}_{dispositivo}$: un esempio

4.1 Condizioni di prova

Il sistema di riferimento utilizzato è uguale a quello utilizzato nell' Annex C della norma per consentire il riscontro dei risultati numerici ottenuti con il programma di calcolo come si vede nella figura seguente:



1	dispositivo di sicurezza
2	linea di uscita
3	Linea di ingresso
4	linea di alimentazione
5	valvola di controllo
6	sistema pressurizzato

P_o = pressione di taratura del dispositivo
P_b = 1,013 bar contropressione(atmosferica)
T_o = temperatura del fluido alla pressione di taratura
P_{in} = pressione in ingresso al dispositivo
V_g = volume gas in equilibrio con la fase liquida
Vl,0 = volume occupato dalla fase liquida
V_{tot} = volume totale dell'attrezzatura a pressione= 10 m^3

Si ipotizza che i valori di P_0 T_0 e V_g siano di equilibrio (saturazione)

Figura 2. Dispositivo di sicurezza installato in un recipiente a pressione (UNI EN ISO 4126-10 [4])

Il modello adoperato è HNE-CSE [3]: la UNI EN ISO 4126-10 [4] mostra nell'Annex C esempi di calcolo di portate di sfogo a seconda del tipo di fluido, in particolare per il caso bifase dove ci sono degli elementi aggiuntivi rispetto al metodo Omega Leung Diers di origine API 521. Nello specifico si fa riferimento al metodo omega HNE-CSE [3] – Homogeneous Non-Equilibrium Consistent set of Sizing Equation - per superare alcune debolezze dei metodi Omega classici, vale a dire:

- eseguire risultati coerenti con la norma UNI ISO 4126-7 per il flusso di gas e liquidi;
- tenere conto della velocità di ingresso del fluido nei condotti e nel dispositivo di sicurezza;
- descrivere con buona approssimazione le condizioni di scarico di liquidi sottoraffreddati oppure in condizioni subcritiche con bassa portata massica;
- includere un modello per il rapporto di pressione critico che tiene conto del ritardo di ebollizione.

4.2 Scelta del tipo di dispositivo di protezione

La scelta del dispositivo di protezione dipende dalle ipotesi di sviluppo dello scenario. La norma illustra esempi di dimensionamento sia per le valvole di sicurezza che per i dischi di rottura. Tuttavia, il design della valvola di sicurezza con le sue geometrie interne rende il metodo più suscettibile di errore se non sufficientemente supportato da prove sperimentali.

Gli autori hanno concordato sul dimensionamento di un dispositivo a disco di rottura che sembra realisticamente meglio rappresentare l'applicazione del metodo.

Inoltre, le valvole di sicurezza convenzionali, bilanciate o pilotate, con e senza soffietto, reagiscono allo stesso scenario con diverse curve di scarico facendo pensare che anche l'evoluzione del bifasico potrebbe essere oggetto di incertezza in termini di dimensionamento. In ogni caso le geometrie complesse delle valvole di sicurezza richiedono l'utilizzo di software di calcolo specifico per l'integrazione delle equazioni e di una verifica sperimentale ad ampio spettro che supporti i risultati ottenuti: di fatto la norma propone una semplificazione dei calcoli pur rigorosa nell'approccio metodologico.

In ogni caso è sempre necessario verificare che il dispositivo di protezione utilizzato - qualunque esso sia-, debba rispettare nelle condizioni di scarico previste le specifiche di fabbricazione, così come devono essere correttamente dimensionati tutti gli elementi a contorno, la linea di ingresso/scarico e l'eventuale serbatoio di quench.

4.3 Il procedimento di calcolo

Il calcolo dei requisiti dei dispositivi di sicurezza per un fluido bifase richiede l'utilizzo del metodo Leung "Omega" basate su DIERS, modelli HEM (Homogeneous Equilibrium Model) e HNE (Homogeneous Non-Equilibrium). Questi metodi determinano l'area dell'orifizio di scarico necessaria prevedendo il flusso di massa teorico applicando un fattore di correzione sperimentale di scarico bifase ($K_{dr,2ph}$).

La norma UNI EN ISO 4126-10, nella necessità di scorporare il procedimento di calcolo da qualunque prova sperimentale fissa, prevede per i dischi di rottura, un $K_{dr,l}$ = 0,62 e $K_{dr,g}$ = 0,80 e ipotizza un coefficiente di afflusso del bifasico come una media del comportamento delle due fasi, media che risente:

- della frazione di vuoto ε_0 dell'attrezzatura a pressione: $\varepsilon_0 = 1 - \frac{Vl,0}{V_{tot}}$ (6)
- di un coefficiente K_v legato alla viscosità dinamica della fase liquida

Il fattore geometrico ε_0 diventa la frazione di vuoto nel condotto di collegamento tra l'attrezzatura e il disco (rif. 3- linea di ingresso) in una formulazione che coinvolge il fattore di compressibilità ω proprio del metodo e il volume specifico del liquido e della carica bifase al momento del rilascio, secondo l'equazione: $\varepsilon_{seat} = 1 - \frac{v_{l,0}}{v_0\left[\omega\left(\frac{1}{\eta}-1\right)+1\right]}$ (7)

E quindi il coefficiente di efflusso bifasico:

$$K_{dr,2ph} = K_{dr,g} \times \varepsilon_{seat} + (1 - \varepsilon_{seat}) \times K_{dr,l} \times K_v \quad (8)$$

È proprio il calcolo del fattore di compressibilità ω che consente di identificare se la nostra condizione di rilascio coinvolga sia la fase liquida che la fase gas. In argomento la Tabella C1 della norma identifica valori di soglia del fattore di compressibilità ω per scegliere le equazioni – UNI EN ISO 4126-10 (rif. Table 4) che meglio caratterizzano la nostra condizione di scarico:

Condizione fisica del fluido allo scarico	**Tipo di scarico**	**ω**	**nota**
Solo liquido non vaporizzante	monofase	0	
Solo gas o vapore	monofase	1	
Liquido in equilibrio con la fase vapore che vaporizza allo scarico	bifasico	1<ω<100	al rilascio la caduta di pressione vaporizza parte della fase liquida
Liquido non vaporizzante con gas incondensabile "Gassy"	bifasico	0<ω<1	
Liquido e gas in cambiamento di fase durante lo scarico "Hybrid"	bifasico	1<ω<100	
Liquido sottoraffreddato	bifasico	0<ω<10	

Tabella 2. Tipici valori del coefficiente di compressibilità (UNI EN ISO 4126-10 [4])

La modalità operativa per effettuare il dimensionamento del dispositivo è descritta per step in figura:

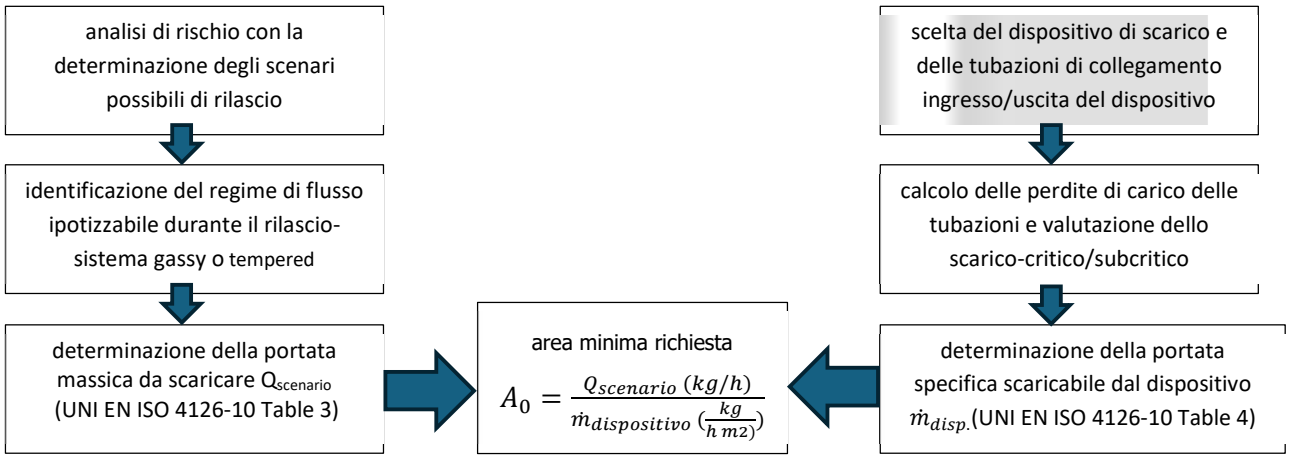


Figura 3. Dimensionamento dell'area di scarico del dispositivo di sicurezza

5. I casi esaminati

Sono stati elaborati tre casi significativi rispettando sempre la pressione di taratura del dispositivo di sicurezza – disco di rottura- e la capacità del reattore inteso verticale e riempito all' 80% di prodotto.

Caso 1: scarico di metanolo di reazione alle condizioni di equilibrio P=1,4 bar, T=346 K (scarico subcritico);

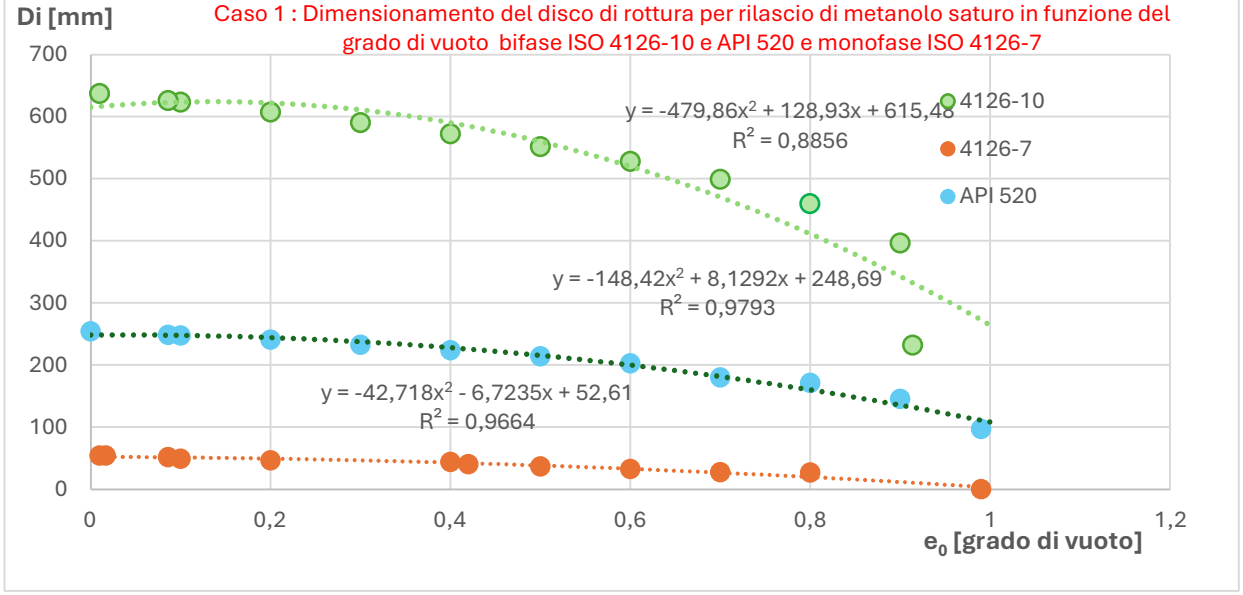
Caso 2: scarico di vapore d'acqua in condizione di saturazione P=10 bar, T=453 K (scarico critico);

Caso 3: scarico di vapore d'acqua in condizione di surriscaldato P=15 bar, T=573 K (scarico critico).

il calcolo secondo la norma UNI EN ISO 4126-10 è stato messo a confronto per diversi valori del grado di vuoto, con:

1. il fluido monofasico gas/vapore utilizzando le formule della UNI EN ISO 4126-7 [5]
2. il fluido bifasico calcolato con la API 520 [2].

I grafici seguenti illustrano il comportamento del fluido rilasciato nelle diverse condizioni descritte:



dati per la verifica del metodo Uni EN ISO 4126-10	altri dati termodinamici (fonte: NIST [6] Chemistry WebBook)
$T_0 := 346.26\ K \quad P_0 := 1.41\ bar = 0.141\ MPa \quad P_b := 1 \cdot bar = 0.1\ MPa$ $P_c := 8.1035 \cdot MPa \quad T_c := 512.6 \cdot K$ $P_{over} := P_0 \quad T_{over} := T_0$ $T_{red} := \frac{T_{over}}{T_c} = 0.6755 < 0,9 \quad P_{red} := \frac{P_{over}}{P_c} = 0.0174 < 0.5$	$v_{l.0} = 0.00135\ \frac{m^3}{kg} \quad v_{g.0} = 0.59897\ \frac{m^3}{kg} \quad PM := 32$ $\Delta H_{v.0} := 35.21 \cdot 1000 \cdot \frac{J}{mol \cdot PM_{ch3oh}} = (1.10031 \cdot 10^6)\ \frac{J}{kg}$ $c_{p.l.0} := 92.983 \cdot \frac{J}{mol \cdot K \cdot PM_{ch3oh}} = (2.90572 \cdot 10^3)\ \frac{J}{kg \cdot K}$ $c_{v.g.0} := 113.67 \cdot \frac{J}{mol \cdot K} \quad c_{p.g.0} := 147.19 \cdot \frac{J}{mol \cdot K} \quad k := \frac{c_{p.g.0}}{c_{v.g.0}} = 1.29489$

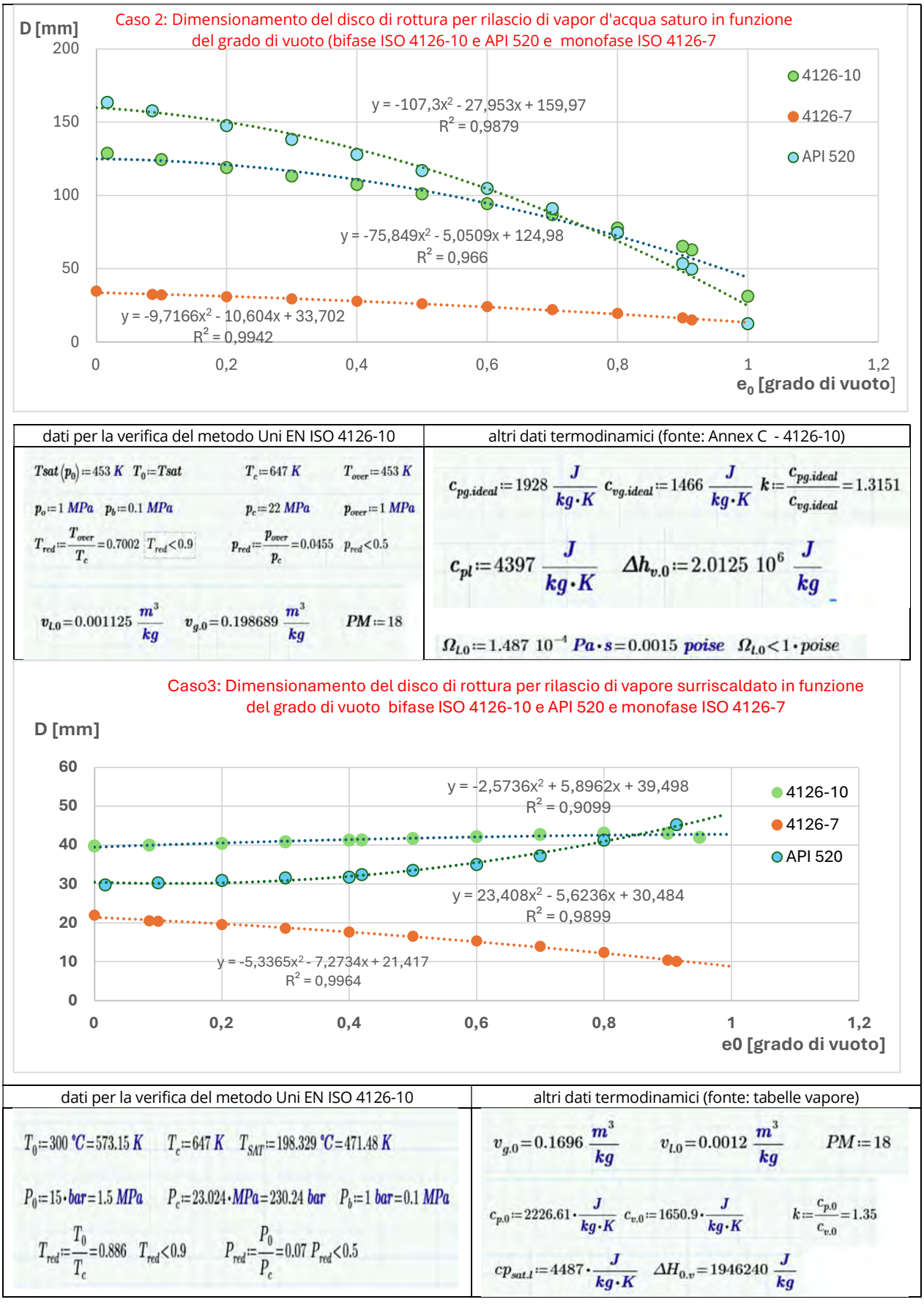


Figura 4. Dimensionamento del dispositivo di sicurezza in funzione del grado di vuoto

6. Conclusioni

L'analisi dei tre casi significativi ha evidenziato che:

- ✓ il calcolo del dispositivo secondo la norma UNI EN ISO 4126-10 è conservativo rispetto al calcolo eseguito con API 520 (metodo Omega-Leung) tranne il caso di recipienti con basso grado di vuoto e scarico di vapore d'acqua saturo;
- ✓ il modello di scarico è ancora applicabile per le valvole di sicurezza ma richiede la conoscenza delle geometrie alle diverse sezioni del dispositivo per la possibilità di ricondensazioni della miscela in fase di rilascio;
- ✓ il fattore di riempimento del reattore influenza molto il dimensionamento del dispositivo, così come il ritardo di ebollizione della fase gas liberata nel recipiente prima del rilascio;
- ✓ il modello di fluido bifasico non omogeneo (NHEM) sviluppato dalla norma non consente il dimensionamento per le miscele con gas disperso e quelle con viscosità elevata (>100 Cp).

Gli autori ritengono che la conoscenza dei coefficienti di efflusso $K_{dr,g}$ e $K_{dr,l}$ verificati sperimentalmente, così come prove dedicate all'acquisizione direttamente del fattore $K_{dr,2ph}$ darebbero giusto riscontro al calcolo analitico sviluppato secondo la norma di riferimento.

Bibliografia

[1] Api Standard 521 Seventh Edition: Pressure-relieving and Depressuring Systems

[2] Api Standard 520 Tenth Edition Part I—Sizing and Selection: Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices

[3] Schmidt, Claramunt : Sizing of rupture disks for two-phase gas/liquid flow according to HNE-CSE-model

[4] UNI EN ISO 4126-10 dimensionamento delle valvole di sicurezza e dei dischi di rottura per il flusso bifase gas/liquido

[5] UNI EN ISO 4126-7 dati comuni

[6] Nist chemistry WebBook - https://webbook.nist.gov/chemistry/ (rilievo in data: 28 12 25)

La mandrinatura di forza nella costruzione di fasci tubieri: stato dell'arte, riferimenti normativi e analisi di un caso studio (fascio tubiero in acciaio inossidabile austeno-ferritico UNS S32750 "SUPERDUPLEX")

M. Berruto[1], D. Calcagno[2], C. Casu[3], S. Priani[4], P. Infortuna[5], S. Spinoso[5], A. Urso[6], G. Gorrino[7]

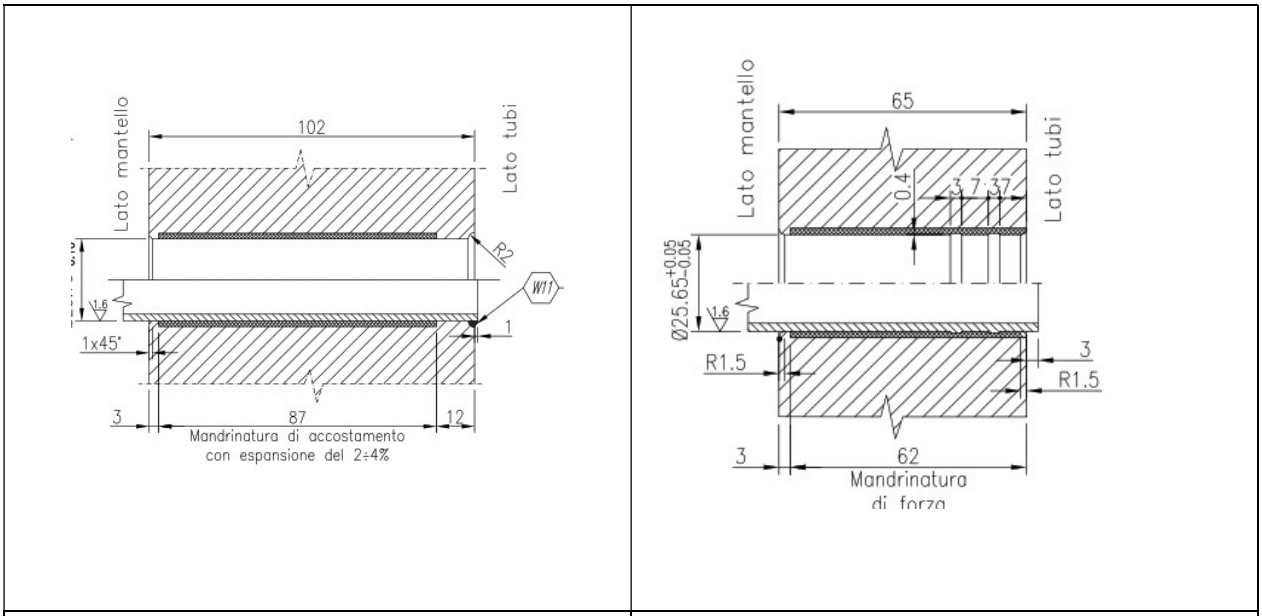
[1]CASTIM 2000
[2]IIS SERVICE (Gruppo Istituto Italiano della Saldatura)
[3]IIS ENTE MORALE (Gruppo Istituto Italiano della Saldatura)
[4]SARLUX Refining & Power
[5]Inail – Uot di Torino
[6]Inail – Uot di Alessandria
[7]Inail – Uot di Roma

Sommario
La memoria intende trattare il processo di mandrinatura di forza atta a realizzare una giunzione permanente tra tubi e piastre tubiere nella costruzione di fasci tubieri.
Inizialmente saranno trattati alcuni aspetti circa lo stato dell'arte, i relativi riferimenti normativi ed i requisiti richiesti in ambito "PED", soffermandosi, in particolare, sull'analisi di alcuni aspetti esecutivi che evidenziano delle criticità.
Nella stessa memoria, inoltre, sarà analizzato un caso studio in cui il processo di mandrinatura è stato applicato su un fascio tubiero in acciaio inossidabile austeno-ferritico UNS S32750 "Superduplex" per un servizio critico: si vuole così porre l'attenzione su alcuni aspetti rilevanti, approfonditi in fase di qualifica del procedimento di mandrinatura, che evidenziano delle criticità nella lavorazione del suddetto materiale.

1. Introduzione

La mandrinatura dei tubi scambiatori è un processo di deformazione meccanica a freddo che permette di ottenere la tenuta tra i tubi e una o due piastre tubiere nell'ambito della realizzazione di fasci tubieri, componenti chiave degli scambiatori di calore, attrezzature utilizzate nell'industria per riscaldare, raffreddare o condensare fluidi, permettendo lo scambio termico tra due correnti fluide separate.
Il processo di mandrinatura si ottiene per espansione forzata del tubo in corrispondenza del suo foro di alloggiamento sulla piastra tubiera, grazie all'utilizzo di un utensile chiamato mandrino allargatubi. L'effetto immediato dell'espansione forzata del tubo è un incremento del diametro interno del tubo ed una riduzione dello spessore di parete in corrispondenza della superficie del foro della piastra tubiera.

In pratica il materiale del tubo viene deformato a freddo fino a superare il carico di snervamento entrando nel campo della deformazione plastica mentre il materiale della piastra tubiera rimane nel campo della deformazione elastica.
Per questo motivo, nell'ambito della fabbricazione di scambiatori di calore, è generalmente raccomandato l'uso di un materiale con carico di snervamento maggiore per la piastra tubiera rispetto a quello del tubo.
Il processo di mandrinatura è pertanto finalizzato a rendere la giunzione tra tubo del fascio tubiero e piastra tubiera permanente durante il servizio affinché sia garantita la tenuta tra le due camere dello scambiatore (lato "mantello e lato "tubi") e pertanto non vi siano trafilamenti di fluido tra di esse.
Nella costruzione di scambiatori di calore, la tenuta tra tubi del fascio e piastre tubiere può essere ottenuta mediante mandrinatura, saldatura o da un connubio di entrambe.
Generalmente la scelta di tipologia di giunzione permanente tra tubo e piastra tubiera dipende da alcuni parametri di design ed esercizio, quale ad esempio la pressione in gioco e, quando selezionata, la mandrinatura può essere applicata in modalità "leggera" (modalità spesso adottata in connubio con la saldatura) oppure "di forza" in funzione del fattore di espansione che si intende applicare.
In figura 1 sono riportate, a titolo di esempio, due configurazioni tipiche in cui la mandrinatura è utilizzata in una giunzione tubo-piastra: il caso a) in cui la giunzione tra il tubo e piastra tubiera è garantita attraverso una saldatura "di forza" in combinazione con una mandrinatura "leggera" ed un caso b) in cui la giunzione tra il tubo e la piastra tubiera è garantita attraverso una sola mandrinatura di "forza".



a) Saldatura di forza e mandrinatura leggera

b) Mandrinatura di forza

Figura 1. Configurazioni tipiche giunto tubo-piastra tubiera di un fascio tubiero

Come già accennato, nell'ambito della mandrinatura, il parametro "chiave" che ne quantifica l'effetto è il fattore di espansione *k*, fattore che incrementa quanto più la mandrinatura diventa "forte" ed è calcolabile in funzione dei diametri del foro della piastra e del tubo, prima e dopo l'espansione.
In Figura 2 si riporta la formula proposta dalla normativa EN 13445-4 per il calcolo del fattore *K* in funzione della geometria "reale" del giunto tubo-piastra. Come si osserverà al paragrafo 3, diversi standard di riferimento propongono dei range di ammissibilità di questo parametro, in funzione del materiale del tubo coinvolto.

K%= 100 x [(T-d1)-(D-d)]/(d-d1)

dove

T= tube inside diameter after expansion
d1= tube inside diameter before expansion
D= tube hole diameter (Tubesheet)
d= tube outside diameter

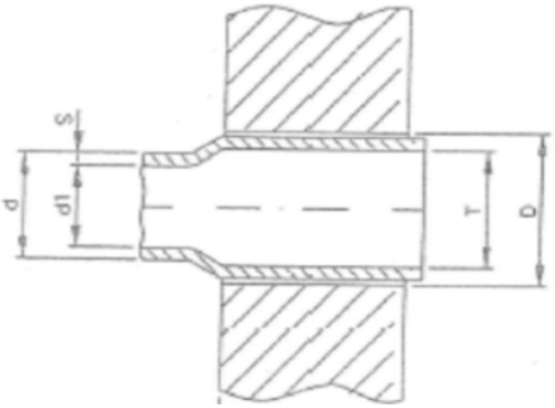


Figura 2. Formula per il calcolo del fattore di espansione k

2. Il processo di lavorazione

Il processo di mandrinatura, ottenibile industrialmente in modalità sia manuale sia automatica, avviene tramite l'uso del mandrino allargatubi, un utensile con caratteristiche di resistenza all'usura e alla fatica composto da gabbia (corpo principale), spina (albero conico rotante), rulli (cilindri conici) e testa (distanziale).
Il mandrino con la spina completamente arretrata viene introdotto dall'operatore o automaticamente dalla macchina nel tubo fino a portare la testa a contatto con la piastra tubiera (a).
La spina, posta in rotazione e spinta in avanti, si accosta ai rulli.
I rulli per attrito si pongono a loro volta in rotazione e, venendo a contatto con il tubo, imprimono un movimento rotatorio alla gabbia determinando l'avanzamento della spina (c).
I rulli espansi dall'avanzamento della spina comprimono il tubo fino a farlo aderire al foro della piastra e per un processo di laminazioni successive si arriva allo schiacciamento dello spessore del tubo contro le pareti del foro della piastra (d).
Raggiunto il valore di espansione desiderato, l'inversione di rotazione della spina sblocca il mandrino dal tubo (e).

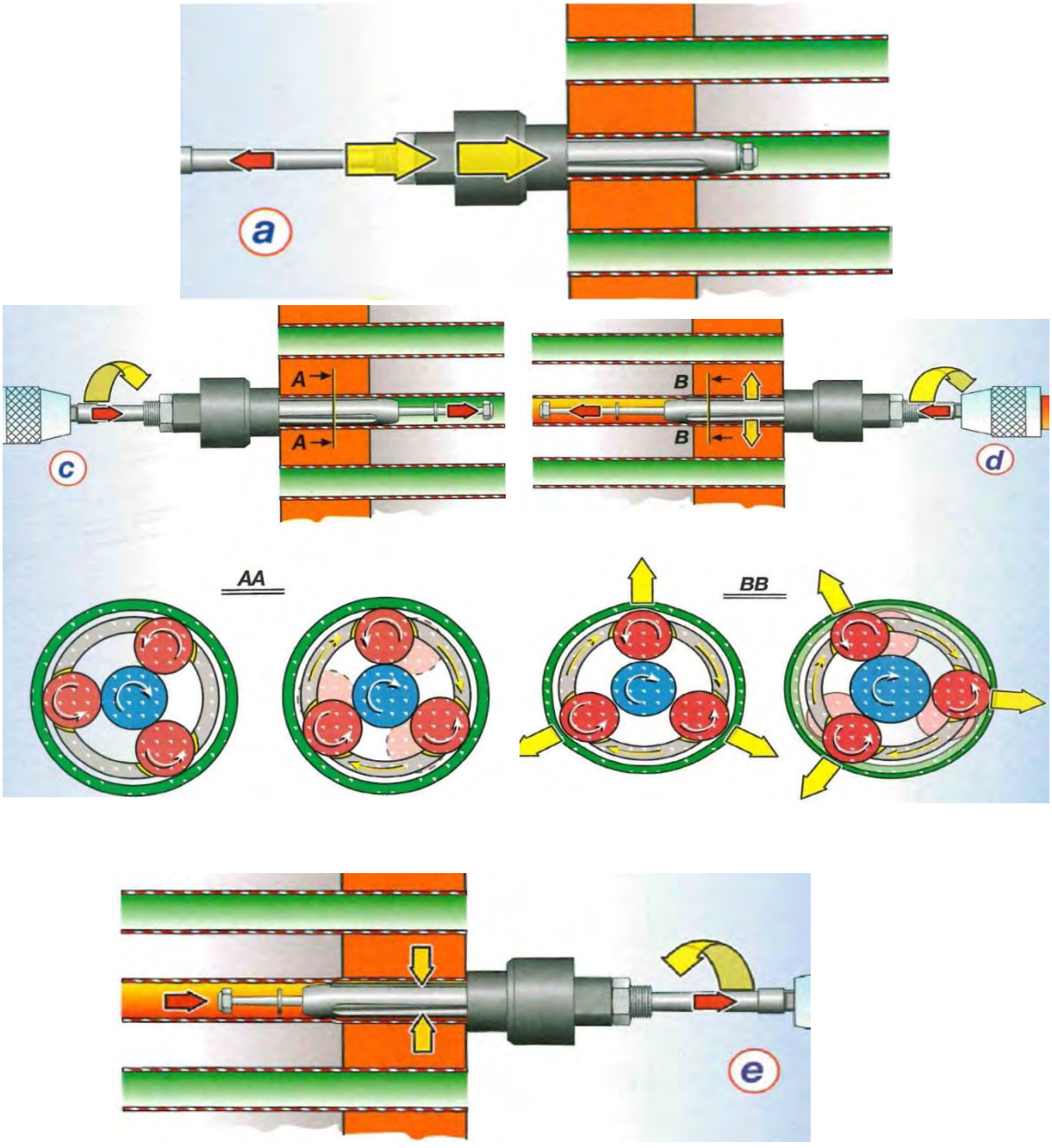


Figura 3. Fasi esecutive

3. Normative di riferimento

I riferimenti al processo di mandrinatura nel ricco panorama normativo disponibile nel campo delle costruzioni di apparecchiature a pressione e degli scambiatori di calore sono molteplici, sia a livello internazionale, sia a livello europeo.

Nell'ambito specifico della progettazione e costruzione di scambiatori di calore del tipo "Shell and Tube" sono internazionalmente riconosciuti e ampiamente utilizzati gli standard *TEMA (Standards of the Tubular Exchanger Manufacturer Association) e lo standard API 660 (Shell-and-Tube Heat Exchanger)* da cui si possono estrapolare nozioni di dettaglio specifiche sulla mandrinatura.

Lo standard *TEMA* ad esempio riporta diverse informazioni utili sui requisiti dei fori della piastra tubiera che alloggeranno i tubi, tra cui si annovera il requisito delle cave ("anular ring") ottenute mediante lavorazione di macchina e necessarie per le configurazioni di giunto tubo-piastra ottenute mediante sola mandrinatura di forza per migliorare la resistenza ai carichi longitudinali.
Tale requisito, non necessario in caso di configurazione di giunto tubo-piastra con saldatura "di forza", definisce il numero minimo delle cave necessarie in funzione dello spessore della piastra (una cava se lo spessore della piastra è inferiore o uguale a 25.4 mm, due cave se lo spessore è superiore a 25.4 mm) e le loro dimensioni (larghezza 3.2 mm e profondità 0.4 mm) e l'obbligatorietà di loro posizionamento in pieno materiale base in caso di piastra tubiera con "clad" o riporto mediante saldatura ("Weld Overlay").
Lo standard *TEMA* inoltre definisce i requisiti di lunghezza minima di mandrinatura del tubo nella piastra tubiera che risulterà essere il valore minimo tra 50,8 mm e lo spessore della piastra tubiera diminuito di 3,2 mm, specificando che, quando definito contrattualmente, può corrispondere all'intero spessore della piastra.
In nessun caso, secondo lo standard, sarà mandrinata la porzione di tubo uscente dalla piastra verso il lato mantello.
Sarà in generale garantita uniformità di espansione all'interno della zona mandrinata.
In Tabella 1 sono infine riportati alcune % di espansione suggerite da *TEMA,* in funzione del tipo di materiale del tubo coinvolto.

Tubing Material	Target Percent Wall Reduction
Carbon steel and low alloy steel	5 to 8
Stainless steel	5 to 8
Duplex stainless steel	4 to 6
Titanium and work hardening non-ferrous	4 to 6
Admiralty and non-work hardening non-ferrous	6 to 9
Copper and copper alloys	7 to 10

Tabella 1. Percentuali % target di espansione suggerite dallo standard *TEMA*

TEMA definisce i valori % di espansione proposti basati su standard industriali e comunque soggetti ad eventuali variazioni concordate tra Cliente e Fabbricante.
Lo standard infine definisce alcuni parametri che possono condizionare la percentuale di espansione ottimale, tra cui la finitura superficiale del foro, la presenza di cave, il diametro del foro e del tubo e la loro tolleranza, lo spessore del tubo, **la durezza del tubo e la sua suscettibilità all'incrudimento**, il tipo di mandrino utilizzato e il sistema di controllo adottato, la lunghezza espansa e la compatibilità tra il materiale del tubo e della piastra.
Lo standard *API 660* riprende del tutto i requisiti già messi in evidenza da *TEMA* definendo una % massima di espansione equiparabile ai valori target proposti da *TEMA,* come si evidenzia in Tabella 2.

Material	Maximum Tube Wall Thickness Reduction %
Carbon steel and low-alloy (max. 9 % chromium) steel	8[a]
Stainless and high alloy steel	6[a]
Duplex stainless steels	b
Titanium and work hardening nonferrous	5[a]
Nonferrous non-work hardening (e.g. admiralty brass)	8[a]

[a] These can be increased by a further 2 %, if approved by the purchaser.

[b] To be agreed between purchaser and vendor. Tube expansion may increase hardness significantly. For more information, see API TR 938-C.

Tabella 2. Percentuali % massime di espansione suggerite dallo standard *API 660*

Si evidenzia come per il solo acciaio inossidabile di tipo "Duplex" non si definisca un valore vero e proprio ma si rimanda ad un eventuale accordo tra le Parti, non tralasciando l'avviso che tale materiale possa incrementare notevolmente il suo valore di durezza per l'effetto dell'incrudimento indotto dalla mandrinatura. *API 660*, infine rimanda allo standard *API 938-C (Use of duplex stainless steel in the Oil Refining Industry)* per informazioni di maggiore dettaglio.
API 938-C è uno standard tendenzialmente focalizzato sulle caratteristiche principali del duplex, i suoi utilizzi, le caratteristiche di saldabilità e i meccanismi di danno tipici per il suo utilizzo nella raffinazione del petrolio.
Nell'ambito della mandrinatura del duplex, le argomentazioni proposte da *API 938-C* sono estremamente interessanti, in quanto lo standard sottolinea la possibile criticità che tale materiale può presentare durante la mandrinatura, con incrementi di durezza notevoli che possono risultare rischiosi, soprattutto in servizi critici come il servizio H_2S umido, servizio che può portare a tensocorrosione dei materiali e che pertanto è spesso tenuto in considerazione nelle nuove fabbricazioni, attraverso la definizione di requisiti specifici definiti da standard internazionali (ad esempio *ANSI/ NACE MR0103/ ISO 17495*) o specifiche di dettaglio.
Pertanto, *API 938-C,* per quanto in maniera generica, evidenzia la possibile problematica e definisce dei valori di durezza massimi limite per il Duplex (**320 HV10**) e per il Super Duplex (**350 HV10**) accettabili sia per un giunto saldato che per un giunto mandrinato, da verificare in fase di qualifica di procedimento (sia di saldatura che di mandrinatura).
API 938-C infine riporta la possibile scelta di design giunto tubo-piastra per uno scambiatore in servizio H_2S umido definibile caso per caso ma generalmente indirizzata verso l'assetto di "saldatura di forza e leggera mandrinatura (fattore di espansione inferiore a 2%) oppure verso una mandrinatura di forza ove siano riscontrati, in fase di qualifica, valori di durezza inferiori ai limiti sopra definiti.
Lo standard *ANSI/ NACE MR0103/ ISO 17945" Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Metallic materials resistant to sulfide stress cracking in corrosive petroleum refining environments",* per quanto tratti nello specifico la famiglia di materiali "Duplex" a livello di requisiti specifici in materiali allo stato di fornitura (ad esempio valore di

durezza massimo pari a 28 HRC per i Duplex e 32 HRC per i Superduplex) e a livello di saldatura (valori medi non superiori a 310 HV e singoli non superiori a 320 HV), non dà indicazioni di dettaglio in caso di mandrinatura, o più in generale, in caso di formatura a freddo.
Sempre in ambito internazionale e per applicazioni "Oil and Gas" alcune indicazioni al processo di mandrinatura si possono trovare anche nel codice *ASME Sezione VIII Div.1 e Div.2*, focalizzate per lo più a definire i requisiti di design, le efficienze delle diverse configurazioni giunto tubo-piastra in cui la mandrinatura è coinvolta, nonché le variabili essenziali e non essenziali e per la messa a punto della specifica di mandrinatura (TEPS), la qualifica di mandrinatura (TEPQR) emessa a supporto, e la qualifica dell'operatore (TEPQ). Tali riferimenti si possono trovare al *Paragrafo UW20 e Non Mandatory Appendix HH per ASME Sezione VIII Div.1 e Paragrafo 4.21 e Annex 4-E per ASME VIII Div.2.*
In ambito europeo la *Direttiva PED 2014/68/UE,* pur non facendo direttamente riferimento al processo di mandrinatura, definisce dei requisiti ben precisi, al suo paragrafo 3.1.2, per tutte quelle che definisce **giunzioni permanenti** (e quindi anche il giunto permanente mandrinato) nelle Categoria II, III e IV, tra cui **l'obbligo** di qualifica di operatore e procedimento attraverso gli esami e le prove previsti dalle norme armonizzate la cui approvazione venga affidata ad una terza parte competente, come un Organismo Notificato o un'Entità Terza riconosciuta da uno Stato Membro come previsto dall'Articolo 20.
Tra le norme armonizzate alla *Direttiva PED 2014/68/UE* e pertinenti alla costruzione delle attrezzature a pressione, lo standard *EN 13445* (Recipienti a pressione non esposti a fiamma) affronta la tematica sia nell'ambito del calcolo dei massimi carichi applicabili sul giunto nella sua Parte 3 sia nell'ambito delle prove di qualifica del procedimento e dell'operatore nella sua Parte 4, richieste solo nel caso in cui la resistenza meccanica del giunto sia esclusivamente affidata al solo processo di mandrinatura.
In particolare, l'Annesso C della *EN 13445-4* da tutte le indicazioni rientranti nell'ambito della specifica di mandrinatura (EPS) qualifica di mandrinatura (EPQR) e dell'operatore (EPQ) richieste: definizione delle variabili essenziali, test, requisiti per la qualifica e range di validità.
È interessante osservare come tra i test richiesti in fase di qualifica di mandrinatura (generalmente sono richiesti esame visivo, dimensionale e "shear" test) sia in ambito *EN* che *ASME* non vi sia, in alcun caso, la richiesta di effettuazione di una campagna di durezze mirata alla verifica della suscettibilità del materiale all'incrudimento e alla verifica di eventuale superamento di valori limite prescritti.
Tale richiesta rimane limitata pertanto al contesto del progetto e alla discrezione della Committente che può inserire tra i requisiti tecnici delle proprie specifiche interne di approvvigionamento, la richiesta della verifica delle durezze sul tubo nella qualifica di mandrinatura.

In merito, inoltre, al caso specifico della costruzione di scambiatori in un eventuale servizio critico H_2S umido ove sia prevista la mandrinatura di tubi in Duplex e Superduplex, per quanto qualche accenno alle possibili criticità sia riportato da *API 938-C,* c'è ancora incertezza in merito alla loro piena affidabilità durante l'esercizio.

4. Caso studio

Nei mesi scorsi è stato realizzato un fascio tubiero di ricambio interamente in Super duplex, composto da 2 piastre tubiere forgiate in ASME SA182 F53 spesse 65 mm, tubi scambiatori in ASME SA789 S32750 diam. esterno 25,4 e sp. 2,77 mm nell'ambito di una pratica di riparazione secondo *D.M. 329* e di un progetto originario realizzato in accordo al codice *VSR (Raccolte ISPESL).*

Per realizzare la giunzione mandrinata manuale tra i tubi e la piastra tubiera in accordo alla normativa di riferimento, è stata imbastita la qualifica del procedimento di mandrinatura in accordo ai requisiti previsti da EN 13445-4 Annesso C, realizzando un test coupon conforme alle caratteristiche geometriche della giunzione reale.

Nella piena consapevolezza delle criticità intrinseche del materiale descritte anche nel Paragrafo 3, si è proceduto preliminarmente mandrinando alcuni tubi appartenenti ad un'unica colata A (555814) con 4 casistiche differenti per verificare le durezze ottenute in seguito alla mandrinatura realizzata con coppie, velocità e passate diverse, a determinare schiacciamenti dei tubi con lievi differenze.

Le 4 casistiche esaminate sono di seguito riassunte:

1) Espansione dei tubi massima in un range 8-10% ottenuta con 3 passate
2) Espansione dei tubi massima in un range 8-10%, ottenuta con 2 passate
3) Espansione dei tubi minima in un range 6-8%, ottenuta con 2 passate
4) Espansione dei tubi minima in un range 6-8%, ottenuta con 3 passate

Per la realizzazione della qualifica ufficiale, è stato deciso di scegliere la casistica che evidenziasse i valori di durezza più bassi, imponendo il limite massimo di 350 HV10 proposto da *API 938-C*.

La colata A dei tubi utilizzata per i test era caratterizzata da valori di durezza variabili tra 28 e 30 HRC, in piena conformità anche dei requisiti *ANSI/ NACE MR0103/ ISO 17495.*

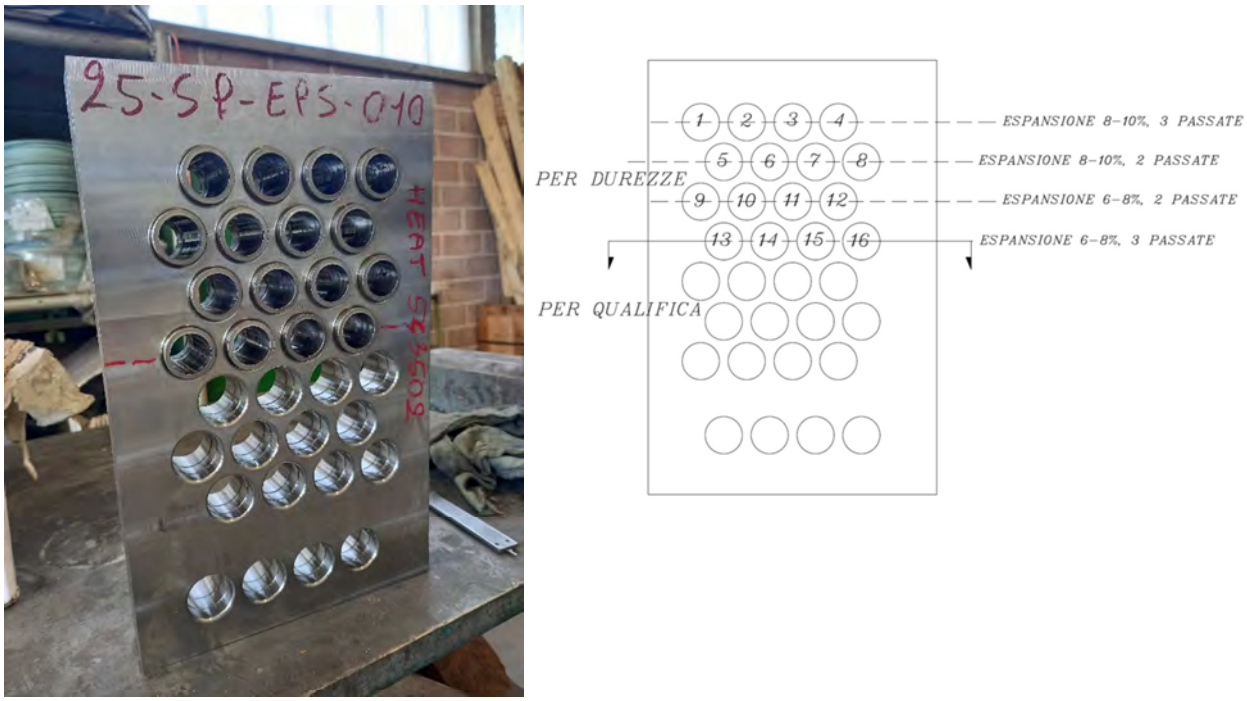


Figura 4. Tallone di mandrinatura in Superduplex e casi testati

Si precisa che i valori di durezza sono stati rilevati in varie posizioni, tra cui la posizione in corrispondenza della posizione ritenuta di massimo incrudimento, in prossimità delle cave anulari sulla piastra.

In Tabella 3 sono riassunti tutti i valori ottenuti nei 4 casi analizzati per la colata A.

Tubo No. *Tube No.*	**Impronta 1** *Indentation 1* [HV 10]	**Impronta 2** *Indentation 2* [HV 10]	**Impronta 3** *Indentation 3* [HV 10]	**Impronta 4** *Indentation 4* [HV 10]
Tubo 1	355	353	370	362
Tubo 2	450	410	470	382
Tubo 13b	424	427	408	394
Tubo 4	385	367	361	370
Tubo 5	405	408	442	440
Tubo 6	440	397	435	431
Tubo 7	373	394	426	415
Tubo 8	383	410	422	404
Tubo 9	437	470	435	475
Tubo 10	404	362	402	440
Tubo 11	446	382	417	394
Tubo 12	397	419	372	457
Tubo 14	385	356	338	344
Tubo 15	355	360	376	383
Tubo 16	369	357	357	342

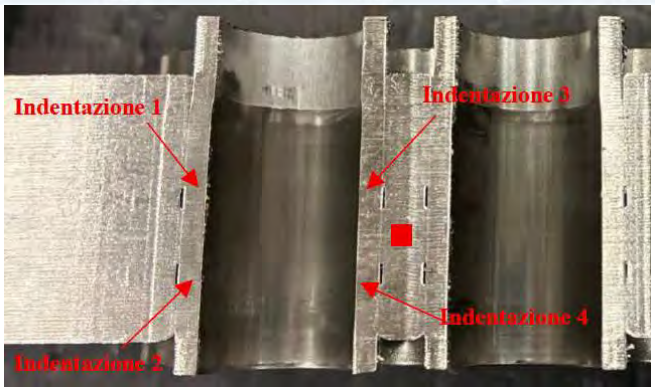


Tabella 3.
Valori di durezza su tallone di mandrinatura nei 4 casi analizzati tubi colata A

Come si evidenzia in Tabella 3, i valori ottenuti sono, in alcuni casi, molto alti ma le durezze più alte si osservano proprio nei casi in cui la percentuale di espansione è maggiore (8-10%) e il numero di passate effettuate per ottenerla è minore (2 passate). Per la qualifica di mandrinatura è stato pertanto deciso di adottare la casistica 4 (Espansione dei tubi minima in un range 6-8%, ottenuta con 3 passate) per quanto alcuni valori di durezza superassero lievemente il valore di 350 HV proposto da *API 938-C*.
In un secondo momento, sono sopraggiunti altri tubi in Superduplex e con designazione e caratteristiche geometriche analoghe ai tubi già testati ma appartenenti ad una colata diversa B (CH-22147) caratterizzata da valori di durezza compresi tra 22 e 24 HRC, ben inferiore ai valori di durezza di base della colata A.
In questo caso, sulla base di quanto rilevato per la colata A, ci si è limitati ad analizzare la casistica da cui erano emersi i valori di durezza relativamente inferiori, ovvero con espansione dei tubi minima in un range 6-8%, ottenuta con 3 passate.

In Tabella 4 sono riassunti tutti i valori ottenuti nei 4 casi analizzati per la colata B.

Tubo No. *Tube No.*	Impronta 3 *Indentation 3* [HV 10]	Impronta 4 *Indentation 4* [HV 10]	Impronta 5 *Indentation 5* [HV 10]	Impronta 6 *Indentation 6* [HV 10]
Tubo 7	334	305	325	340
Tubo 8	313	301	341	335
Tubo 9	312	323	340	324
Tubo 10	333	331	318	327



Tabella 4. Valori di durezza su tallone di mandrinatura nei 4 casi analizzati tubi colata B

Per comprendere meglio l'eventuale influenza dell'incrudimento indotto dalla mandrinatura sui tubi in Duplex in un eventuale servizio critico H_2S umido, è stato successivamente deciso di effettuare delle prove di tensocorrosione SSC (Sulphide Stress Cracking) di confronto in accordo alla norma ANSI NACE TM0177 Metodo C (C-ring).
Sono stati scelti i due casi estremi ottenuti durante l'intera campagna di prove al fine di effettuare il confronto con le prove SSC ovvero un campione caratterizzato dalle durezze più alte del tubo della colata A in cui l'espansione al 8-10% è stata ottenuta con 2 passate ed un campione caratterizzato dalle durezze più basse del tubo della colata B in cui l'espansione al 6-8% è stata ottenuta con 3 passate.
Le prove SSC, della durata di 720 ore, si sono concluse con esito soddisfacente in entrambi i casi testati, non evidenziando, al termine della prova, cricche o fessurazioni da corrosione intergranulare. Anche le micrografie condotte successivamente sui provini testati non hanno rilevato difetti microscopici degni di nota.
Su entrambi i provini si osserva solo una leggera corrosione selettiva dell'austenite, di spessore omogeneo di circa 10 – 20 µm presente su tutta la superficie si entrambi i provini.

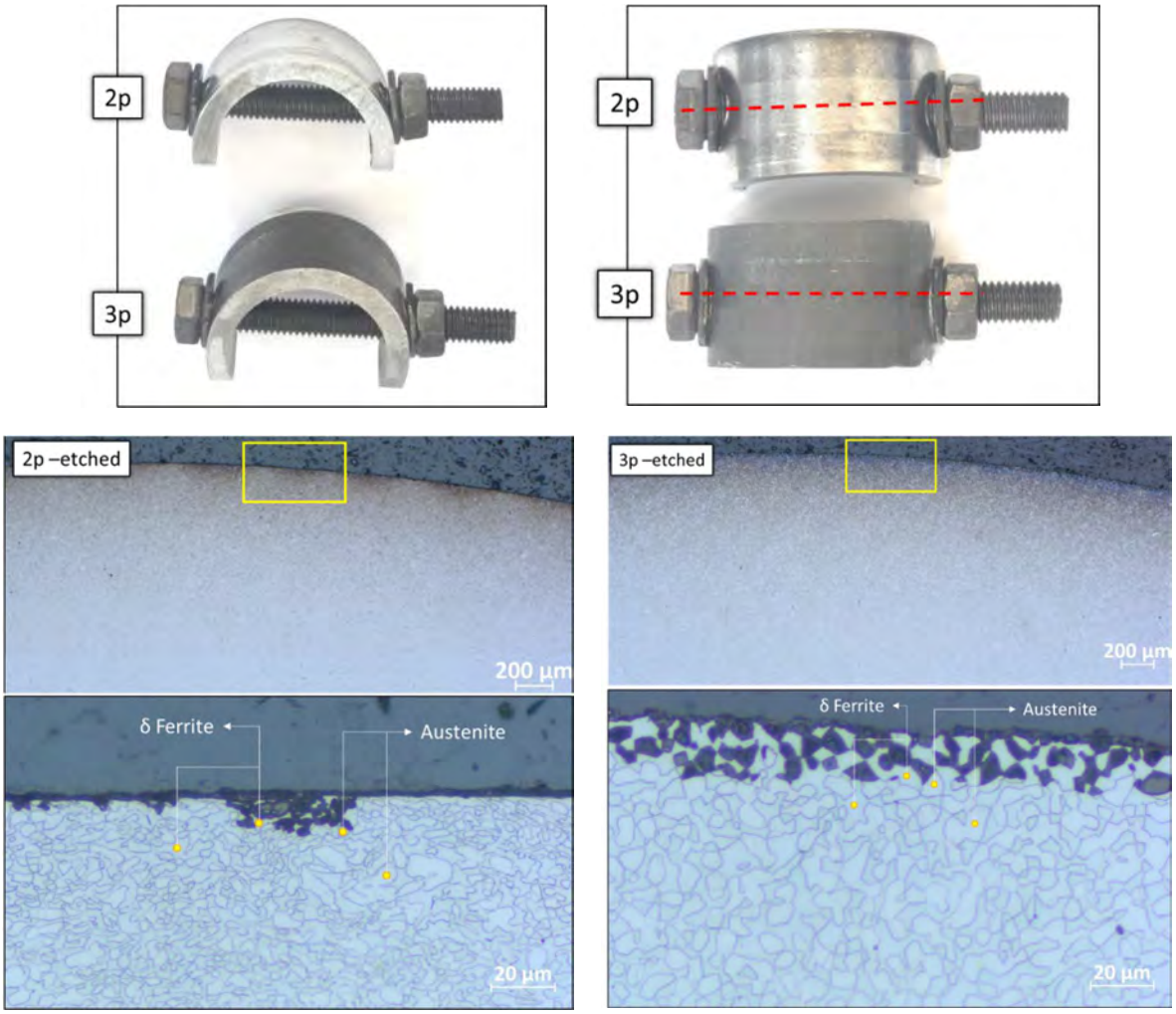


Figura 5. Provini per le prove SSC (in alto) ANSI NACE TM0177 Metodo C (C-ring) e dettaglio micrografico della zona a maggiore stress (in basso)

5. Conclusioni

Lo studio nasce dall'esigenza di esaminare un processo produttivo ormai consolidato nella fabbricazione dei fasci tubieri, componenti necessari nell'industria dell'oil & gas, e per comprendere meglio le criticità che tale attività comporta su materiali specifici necessari a servizi critici come il servizio H_2S umido.

Dopo una panoramica generale del processo di mandrinatura in cui viene descritto l'ambito di utilizzo nella costruzione di scambiatori di calore del tipo S&T ed il processo di lavorazione, è stata approfondita la panoramica normativa europea ed internazionale in cui il processo di mandrinatura è referenziato e da cui è già possibile evidenziare alcune criticità offerte da alcuni materiali, tra cui il duplex, particolarmente suscettibili all'incrudimento indotto dalla mandrinatura stessa.

Dal punto di vista operativo si è svolta una campagna di prove di durezza sui talloni di mandrinatura realizzati per l'occasione con fattori di espansione minima (in un range 6-8%) e massima (in un range 8-10%) ottenuti con 2 e 3 passate di mandrinatura su tubi in superduplex caratterizzate da durezze di partenza differenti.

Dalle due casistiche in cui sono stati rilevati i valori di durezza massimi e minimi, si è deciso di condurre delle prove di tenso-corrosione SSC, in accordo alla norma ANSI NACE TM0177 Metodo C, con il fine di dedurre l'influenza della durezza di partenza del tubo e dell'effetto di incrudimento della mandrinatura sull'affidabilità del materiale in un servizio critico H_2S umido.
I risultati ottenuti, in particolar modo dalla campagna di durezze effettuate, dimostrano una effettiva sensibilità all'incrudimento del Superduplex che ha raggiunto valori di durezza massimi pari a 470 HV, rilevati sulla colata di tubi che registrava la durezza di partenza più elevata in un range tra 28 e 30 HRC.
Per quanto i test di tensocorrosione condotti nelle due casistiche abbiano rilevato risultati soddisfacenti, senza particolari differenze apprezzate anche dalle micrografie sui campioni dopo il test, siamo convinti che ulteriori campagne di test di tensocorrosione, eventualmente anche "in situ" debbano essere effettuati, per avere maggiori informazioni da analizzare. In attesa di queste, qualora debbano essere affrontate casistiche di giunzioni tubo-piastra con tubi in duplex o superduplex che prevedano una mandrinatura di forza per un servizio critico, si suggerisce di monitorare con attenzione le durezze di partenza dei tubi del fascio e le durezze derivanti dal processo di mandrinatura previsto, con l'obiettivo di rispettare i requisiti di durezza massimi previsti dallo standard API 938-C od in alternativa prevedere una giunzione ottenuta con saldatura di forza e mandrinatura leggera.

Bibliografia

[1] American Petroleum Institute (API). API 660 - Shell and tube heat exchangers; 2015.
[2] TEMA R. Standards of the Tubular Exchanger Manufacturer Association)
[3] American Petroleum Institute (API). API 938-C – Use of duplex stainless steel in the oil refining industry; 2015.
[4] ASME VIII Div.1 e 2. Rules for Construction of Pressure Vessels; 2025
[5] EN UNI EN 13445-4:2023 - Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 4: Costruzione

Impatto da ondate di calore negli stabilimenti industriali con pericolo di incidenti rilevanti

V. Nastasi [1], G. Grillone[1], G. Argento[1], D. Di Fonzo[1], A. Muratore[2]

[1]Inail - UOT di Palermo
[2]Inail - UOT di Como

Sommario
Il cambiamento climatico e il riscaldamento globale stanno intensificando la frequenza e la magnitudo degli eventi naturali legati al clima, aumentando ulteriormente il rischio di sequenze a cascata innescate da disastri naturali. Finora nella letteratura scientifica è stata dedicata scarsa attenzione agli effetti diretti delle ondate di calore e delle temperature ambientali estremamente elevate sulle installazioni industriali. In particolare, negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, le ondate di calore possono portare a dei disastri tecnologici (natech). Questi eventi possono comportare incendi, esplosioni o rilasci di sostanze pericolose, con conseguenze gravi per la sicurezza, la salute e per l'ambiente.
Scopo del presente articolo è quello di proporre un metodo ad indice per la valutazione preliminare del rischio natech indotto da ondate di calore "IR_{hW}" al fine di individuare i sistemi tecnici critici di uno stabilimento a rischio di incidente rilevante finalizzata all'individuazione dei livelli di approfondimento.

1. Ondate di calore

Gli eventi naturali di forte intensità (sismi, alluvioni costiere e fluviali, fulmini, temperature estreme che portano ad ondate di calore, ecc.) rappresentano un enorme problema per gli effetti diretti su persone e strutture civili ed industriali.
Se l'impatto di detti eventi naturali riguarda strutture industriali con presenza di sostanze pericolose, la possibile fuoruscita di dette sostanze può creare incendi, esplosioni e rilasci tossici sia all'interno che all'esterno dello stabilimento industriale.
In questo lavoro si analizzerà l'impatto delle ondate di calore che ad oggi è poco attenzionato dai gestori degli impianti industriali che rientrano nella Direttiva Europea Seveso (2012/18/UE) [1]. Il costante aumento della temperatura terrestre a causa dell'emissione in atmosfera di anidride carbonica e altri gas ad "effetto serra" sta portando ad un cambiamento del clima che implica un aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore. Secondo l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM), il 2023 è stato l'anno più caldo mai registrato, con una temperatura media globale superiore di circa 1,45 °C rispetto ai livelli preindustriali. Il Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico delle Nazioni Unite (IPCC) conferma che dal 1980 ad oggi le ondate di calore sono aumentate in frequenza, intensità e durata, colpendo in particolare Europa, Asia e America settentrionale (https://www.ipcc.ch/, [2]). In Italia, i dati ISPRA indicano che negli ultimi 50 anni la temperatura media è

aumentata di circa 2 °C, con una crescente incidenza di fenomeni estremi come incendi, siccità e stress termico urbano. Si evidenzia altresì che i centri abitati sono zone più vulnerabili rispetto alle aree rurali (dove si raggiungono fino a 3° in più di temperatura) per quanto riguarda le ondate di calore; quest'ultimo fenomeno prende il nome di "effetto isola di calore". Si riporta di seguito la Figura 1 in cui si evidenzia: a) che il fenomeno delle ondate di calore interessa tutto il globo terrestre Ricci e al. 2020, [3]); b) l'andamento crescente della temperatura media sia a livello di globo terrestre che di Italia, rispetto ai valori climatologici normali 1991-2020 (REPORT AMBIENTALI SNPA | 44 2025, [4]):

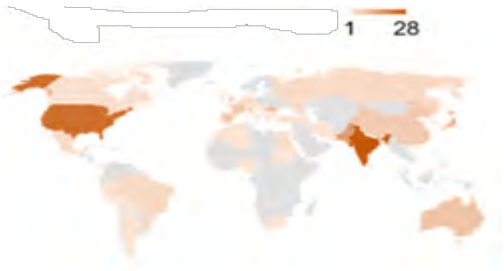


Figura 1 a): Eventi naturali da ondate da calore

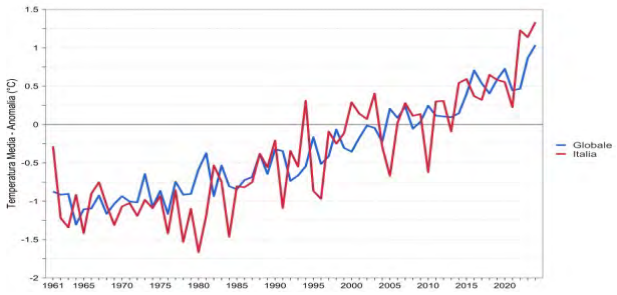


Figura 1 b): Temperatura media terraferma

Per quanto riguarda le previsioni, le stesse non fanno ben sperare. Entro il 2100 si prevede che l'Europa sperimenterà un significativo aumento delle temperature medie, con estati più lunghe e ondate di calore più intense e frequenti, portando l'Italia a essere "un paese sempre più tropicale". L'Agenzia europea dell'ambiente ha pubblicato un report nel 2024 "European Climate Risk Assessment" in cui tra i tanti aspetti evidenziati si riportano le previsioni dell'aumento della temperatura al 2100 rispetto all'era preindustriale (EEA Report 01/2024, [5]). Nel presente articolo per descrivere le ondate di calore per una determinata area geografica, si utilizza l'indice Warm Spell Duration Index (WSDI) è un indice climatico estremo che rappresenta il numero annuale di giorni che fanno parte di un'ondata di calore. Un'ondata di calore è definita come almeno sei giorni consecutivi in cui la temperatura massima giornaliera supera il 90° percentile della temperatura massima giornaliera per un dato periodo di riferimento climatologico (tipicamente 1961-1990 o 1991-2020). Questo indice è considerato tra i migliori per descrivere le ondate di calore perché combina durata ed intensità del fenomeno.

2. Azioni delle ondate di calore sugli impianti industriali

Le ondate di calore influiscono negativamente anche sugli impianti industriali in generale inducendo una serie di rischi. Nel caso di impianti con pericolo di incidenti rilevanti tali rischi possono comportare incendi, esplosioni o rilasci di sostanze pericolose, con conseguenze gravi per la Sicurezza, la Salute e l'Ambiente. Inoltre, le ondate di calore di solito colpiscono aree estese, influenzando quindi un alto numero

di installazioni limitrofe con possibili effetti domino. Inoltre le ondate di calore possono influire: a) sulla deformazione di serbatoi, tubazioni ed altre apparecchiature compromettendo la loro integrità strutturale e aumentando il rischio di rotture che possono comportare delle perdite di contenuto; b) su un aumento incontrollato della pressione interna delle attrezzature, superando i limiti di progettazione e portando le stesse a un guasto; c) sulla stabilità di alcune sostanze chimiche, aumentando il rischio di reazioni incontrollate, incendi o esplosioni; d) sull'autoaccensione di materiali e sostanze presenti; e) sugli impianti di raffreddamento riducendone l'efficacia e aumentando il rischio di surriscaldamento di macchinari e apparecchiature; f) sul normale funzionamento della strumentazione e dei sistemi di sicurezza; g) sulla capacità di accelerare i processi di corrosione nei metalli; h) sulle capacità operative del personale, aumentando il rischio di errori umani e incidenti; ecc.

3. Valutazione del rischio natech da ondate di calore

Secondo il recente approccio dell'IPCC, il concetto di rischio associato al cambiamento climatico si basa su tre componenti fondamentali: pericolosità, esposizione e vulnerabilità. Si parla quindi di rischio se in un certo luogo ed in un certo momento un recettore vulnerabile, che può subire cioè le conseguenze innescate dal pericolo, viene esposto ad una fonte di pericolo [6].
Il rischio natech da ondate di calore "R_{hW}" rappresentato dalla seguente funzione:

$$R_{hW} = f\,(H_{hw}, V_{hw}, E_{hw}) \qquad (1)$$

dipende da:
-H_{hw}, pericolosità da ondate di calore: legata alle anomalie medie annuali dell'indice WSDI, che si manifestano in una determinata area geografica;
-V_{hw}, vulnerabilità, intesa come propensione delle apparecchiature, tubazioni contenenti sostanze pericolose a subire danneggiamenti a seguito di ondate di calore;
-E_{hw}, esposizione, intesa come estensione e gravità per i recettori
Poiché determinare la funzione " f " è abbastanza complesso in termini di tempo e risorse, gli autori dell'articolo alla luce della loro esperienza propongono il seguente metodo ad indice semplificato:

$$IR_{hW} = IH_{hw} \times IV_{hw} \times IE_{hw} \qquad (2)$$

Per determinare il livello di rischio natech da ondate da calore IR_{hW} occorre determinare i valori di IH_{hw} (indice di pericolosità da ondate di calore), IV_{hw} (indice di vulnerabilità da ondate di calore) e IE_{hw} (indice di esposizione da ondate di calore). Ai tre indici verrà dato un valore crescente da 1 a 4.

3.1 IH_{hw}, indice di pericolosità da ondate di calore

In questo lavoro gli autori propongono di mettere in relazione l'indice di pericolosità da ondate di calore IH_{hw} con le anomalie medie annuali dell'indice WSDI, che si manifestano in una determinata area. L'indice WSDI identifica proprio gli episodi di caldo intenso e prolungato in una determinata area geografica. Di seguito in Figura 3 è riportata la Serie delle anomalie medie annuali dell'indice WSDI in Italia, rispetto al valore normale del trentennio 1991-2020 (REPORT AMBIENTALI SNPA | 44 2025, [4]).

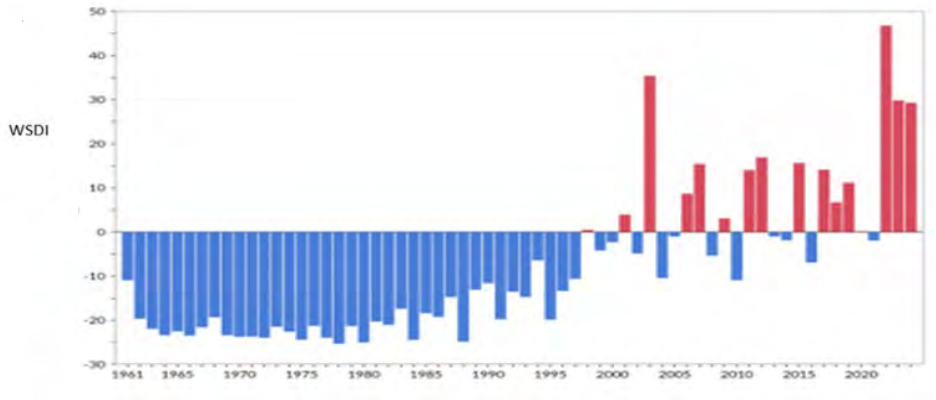


Figura 3. Serie delle anomalie medie annuali dell'indice WSDI

L'indicatore "WSDI" descrive la tendenza dei fenomeni di caldo intenso e conta il numero dei giorni caratterizzati da un'onda di calore in un anno. Nel 2024 è stato osservato un aumento di 29,3 giorni di onde di calore rispetto al valore medio calcolato nel trentennio di riferimento (1991-2020). Si evidenzia che per qualunque area geografica si può costruire una specifica serie di anomalie annuali dell'indice WSDI, simile alla Figura 3. In riferimento a ciò, gli autori propongono tramite, i valori riportati in Tabella 1, di mettere in relazione l'Indice WSDI (massimo valore degli ultimi cinque anni nell'area geografica interessata) con l'indice di pericolosità da ondate di calore "IH_{hw}".

WSDI	IH_{hw}
< 5	1
da 5 a < 20	2
da 20 a < 35	3
>35	4

Tabella 1. relazione tra indice WSDI e Indice pericolosità ondate di calore "IH_{hw}"

3.2 Indice di vulnerabilità da ondate di calore, IV_{hw}

Al fine di individuare l'indice di vulnerabilità dei sistemi tecnici "IV_{hw}", gli autori propongono un percorso che tenga conto sia della letteratura scientifica ad oggi presente sia della esperienza istituzionale fatta dagli stessi in merito alle verifiche eseguite in campo sugli stabilimenti rientranti nella Direttiva 2012/18/EU.

Dalla ricerca di Ricci F. e al., 2023 [8], si evidenzia che sono stati individuati n 204 registrazioni inerenti natech da ondate di calore da diverse banche dati: eMARS (n 1), MHIDAS (n 4), TAD IchemE (n 3), ARIA (n 141), NRC (n 55).
Da tale ricerca gli scenari incidentali emersi sono: a) incendio in n 102 record (50%); b) rilascio senza ulteriori conseguenze in n 40 record (19,6%); c) contaminazione ambientale n 31 record (15,2% del totale); d) scenari multipli n 6 (2,9%).
Le industrie chimiche, petrolchimiche e quelle con bioprocessi sono le più vulnerabili alle ondate di calore, essendo coinvolte in circa il 65% degli eventi registrati. Altri settori industriali vulnerabili sono quelli legati alla produzione (26 record, 12,7%), stoccaggio e magazzinaggio (15 record, 7,4%), trasporto su rotaia e su strada (14 record, 6,9%) di sostanze pericolose. All'interno dei bioprocessi la maggior parte degli incidenti si è verificata negli impianti di trattamento dei rifiuti solidi e nelle discariche.
Per quanto riguarda le attrezzature coinvolte negli incidenti natech durante le ondate di calore la ricerca ha evidenziato: a) attrezzature di stoccaggio (n 61 con il 29,9%); b) smaltimento dei rifiuti (n 52 con 25,5%); c) serbatoi (n 18 con 8,8%); d) macchine (n 13 con 6,4%); e) magazzini (n 12 con 5,9%); f) tubazioni (n 10 con 4,9%); g) valvole e strumenti (n 8 con 3,9 %), f) attrezzature di processo (n 5 con 2,5 %); g) cause sconosciute (n 25 con 12,3%). Le cause dirette degli scenari di incidente innescati dalle ondate di calore raccolte nello studio che hanno innescato lo scenario tecnologico responsabile della conseguenza finale dell'incidente natech, sono: 1) incremento di pressione, in oltre il 40% (82 registrazioni) degli incidenti natech raccolti dalla ricerca; la perdita di contenimento è stata causata da un aumento incontrollato della pressione interna, superando i limiti di progettazione e portando a un guasto dell'attrezzatura. Di solito, l'aumento della pressione interna è generato dall'alta temperatura ambiente che porta a un aumento della pressione di vapore e/o del tasso di vaporizzazione della fase liquida all'interno dell'attrezzatura coinvolta; 2) autoignizione, la seconda più importante causa diretta degli scenari tecnologici identificati in questa categoria di incidenti è l'autoaccensione di materiali e sostanze (n 23, 11.3% del totale), che causa direttamente uno scenario di incendio; 3) degrado delle sostanze chimiche e/o materiali a causa di alte temperature è stato motivo di preoccupazione, causando un numero rilevante di incidenti registrati (n 14, 6.9%). In tali scenari, l'esposizione continua al calore delle radiazioni solari era solitamente l'innesco della decomposizione esotermica, della polimerizzazione e di altre reazioni indesiderate, che portavano all'autoaccensione della sostanza/materiale; 4) effetto lente, tale effetto è stato identificato come causa dell'incidente (n 11, 5.4%). L'effetto lente si verifica quando un materiale vetroso converge i raggi solari in un'area ristretta, riscaldando e infine accendendo i materiali circostanti; 5) interruzione energia, le interruzioni di energia elettrica, che portano a condizioni di processo anomale, sono state registrate come causa diretta di n 8 incidenti (3.9%).

Per la determinazione della vulnerabilità (fisica) nell'articolo si prendono in considerazione, anche le categorie di sostanze sensibili al calore, come classificate dal sistema "Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals" (GHS) che vengono riportate nella seguente Tabella 2 [9]:

Classe di pericolo	Codice	Descrizione fisica del Pericolo
Gas Infiammabili	H 230	Può reagire in modo esplosivo in assenza di aria;
Gas Infiammabili	H 231	Può reagire in modo esplosivo in assenza di aria ad elevate pressioni e/o temperature.
Sostanze e miscele auto reattive e perossidi organici	H 240	Il riscaldamento può causare esplosione
Sostanze e miscele auto reattive e perossidi organici	H 241	Il riscaldamento può causare incendio e esplosione
Sostanze e miscele auto reattive e perossidi organici	H 242	Il riscaldamento può causare incendio
Sostanze e miscele autoriscaldanti	H 251	Il riscaldamento autonomo può portare all'incendio
Sostanze e miscele autoriscaldanti	H 252	Il riscaldamento autonomo in grandi quantità può portare all'incendio

Tabella 2. Relazione tra Classi di pericolo, codice GHS e relativa descrizione fisica del pericolo

In ultimo accanto alla vulnerabilità "fisica" riconducibile e riferibile alle caratteristiche fisiche e/o tecnologiche degli impianti, attrezzature nonché al contenuto delle sostanze pericolose presenti (concetto legato alla resistenza), gli autori, alla luce dell'esperienza maturata durante le verifiche istituzionali svolte, propongono una vulnerabilità "organizzativa" riconducibile al livello di resilienza organizzativa di un determinato stabilimento e che tenga in considerazione le capacità operative del personale in presenza di ondate di calore. Per questo occorre prevedere per i lavoratori apposita ed ulteriore formazione che ha come finalità quella di creare un'organizzazione resiliente capace di rispondere agli eventi, di monitorare quello che accade, di saper prevedere rischi e, infine, di imparare dall'esperienza passata. Sempre da far rientrare nella vulnerabilità organizzativa vi è l'importanza di adeguare i piani di emergenza che tengono conto delle temperature estreme (basse ed elevate), in modo da tener conto dei sistemi di allerta preventivi eventualmente presenti nello stabilimento o nell'area dove esso è localizzato ed assicurarsi che in detta documentazione siano state individuate ed indicate chiaramente le azioni da attuare in risposta agli "early warning" lanciati da tali sistemi. In relazione a quanto evidenziato sopra si propone di dare ai rispettivi sistemi tecnici, i valori di "IV_{hw}" sommando un valore inerente alla vulnerabilità fisica e un valore inerente alla vulnerabilità organizzativa dello stabilimento, come riportato nella Tabella 3.

Attrezzature	Indice Vulnerabilita' Fisica (1)	Indice Vulnerabilita' Organizzativa (2)
Macchine (Pompe e Compressori)	1-2	0-1
Tubazioni	1-2	0-1
Attrezzature di processo (Colonne, reattori, scambiatori, ecc.)	2-3	0-1
Attrezzature di stoccaggio in pressione e atmosferiche	2-3	0-1
Serbatoi su strada e ferroviari	2-3	0-1
Valvole e strumenti	1-2	0-1
Magazzini	1-2	0-1
Impianti di trattamento rifiuti	2-3	0-1

(1) I valori maggiori a parità di attrezzature vengono dati in presenza di sostanze sensibili al calore (v. tab. 2)
(2) I valori maggiori vengono dati alla insufficiente formazione e/o piani di emergenza inadeguati.

Tabella 3. Indice di vulnerabilità fisica ed organizzativa delle diverse attrezzature

3.3 Indice di esposizione da ondate di calore, "IE_{hw}"

Ai fini della determinazione dell'indice di esposizione da ondate di calore "IE_{hw}", si tiene conto delle vite umane, dei danni ambientali, dei danni economici, ecc.. Per determinare l'esposizione che coinvolge i sistemi tecnici critici, bisogna partire dal tipo e dalla quantità di sostanze pericolose presenti, dal loro stato fisico, dal tipo di lavorazione (processo, stoccaggio, ecc.), dal tipo di evento atteso (esplosione, rilascio tossico, incendio, dispersione di fumi tossici a seguito di un incendio). Per la stima dell'esposizione in questo articolo, viene proposta una metodologia qualitativa basata sul giudizio esperto, attribuendo un peso crescente da 1 a 4 in base all'importanza della classe di uso del suolo circostante lo stabilimento industriale. Maggiori valori sono stati assegnati alle classi residenziali che comportano una presenza antropica costante e pesi decrescenti a diversi tipi di attività produttive, privilegiando le attività più concentrate (attività industriali), rispetto alle attività estensive (attività agricole) i valori proposti sono riportati in Tabella 4:

IE_{hw}	Classe di uso del suolo circostante
1	Scenari credibili a seguito di eventi inerenti di ondate di calore sui sistemi tecnici, che hanno ripercussioni solo all'interno dello stabilimento industriale.
2	Scenari credibili a seguito di eventi inerenti di ondate di calore sui sistemi tecnici, che hanno ripercussioni sia all'interno che all'esterno dello stabilimento industriale che confina con ampie aree agricole.
3	Scenari credibili a seguito di eventi inerenti di ondate di calore sui sistemi tecnici, che hanno ripercussioni sia all'interno che all'esterno dello stabilimento industriale che confina con aree destinate a zona industriale.
4	Scenari credibili a seguito di eventi inerenti di ondate di calore sui

	sistemi tecnici, che hanno ripercussioni sia all'interno che all'esterno dello stabilimento industriale che confina con aree destinate a edifici civili, attività produttive e commerciali che coinvolgono una presenza di persone costante.

Tabella 4. Relazione tra la classe di uso del suolo circostante lo stabilimento e l'indice "IE_{hw}"

4. Livello di rischio natech da ondate di calore IR_{hW}. Azioni correttive

Applicando quanto indicato nei paragrafi precedenti, è possibile ottenere i valori numerici (da 1 a 4) per IH_{hw}, IV_{hw}, IE_{hw}. Pertanto, utilizzando l'equazione (2), possiamo ottenere un valore numerico per l'Indice di rischio natech da ondate di calore IR_{hW}. Utilizzando la metodologia proposta da Muratore A. e al., 2024 [7], si ha:

a) per $IR_{hW} > 32$, il livello di rischio è non accettabile; occorre prevedere immediate azioni correttive di prevenzione, protezione e mitigazione;

b) per $12 \leq IR_{hW} \leq 32$, il livello di rischio comporta azioni correttive di prevenzione, protezione e mitigazione da programmare in tempi certi da parte del gestore;

c) per $IR_{hW} < 12$, il livello di rischio si ritiene accettabile, occorre monitorare i sistemi tecnici critici, nonché ripetere appositi interventi formativi sul personale dipendente sugli effetti delle ondate di calore.

Di seguito si riportano alcune esempi di azioni correttive di prevenzione, protezione e mitigazione delle ondate di calore al fine di ridurre il livello di rischio natech da ondate di calore, IR_{hW} : a) la prima azione di prevenzione è la valutazione dei rischi da ondate di calore al fine di individuare i sistemi tecnici critici assieme al continuo monitoraggio delle condizioni meteo; b) per quanto riguarda le attrezzature a pressione (serbatoi, colonne, scambiatori, reattori), quelli con bassi rapporti tra pressione di progettazione e pressione di esercizio sono i più critici; in questo caso se possibile durante i periodi più caldi occorre far lavorare dette attrezzature ad una pressione di esercizio più bassa; aumentando così il rapporto tra pressione di progettazione e pressione di esercizio; c) per quanto riguarda i serbatoi atmosferici che immagazzinano sostanze liquide con un basso punto di ebollizione è opportuno proteggerli da eccessivi aumenti della temperatura interna, evitando la loro esposizione alla radiazione solare diretta e/o installando/attivando sistemi di raffreddamento permanenti o temporanei (ad es., sistemi di spruzzatura d'acqua); d) verificare le dimensioni appropriate dei sistemi di sfiato, in particolare nel caso dei serbatoi con tetto a cono atmosferico; in quanto detti serbatoi sono particolarmente vulnerabili a questi fenomeni; e) i piccoli serbatoi di stoccaggio atmosferico hanno un rapporto superficie-volume più elevato, pertanto risultando così più vulnerabili alle conseguenze della radiazione solare e dell'aumento della temperatura esterna. A tal proposito occorre sistemare detti serbatoi in zone ombreggiate; f) verificare la posizione degli sfiati delle attrezzature atmosferiche che stoccano o elaborano liquidi combustibili a bassa infiammabilità. La possibilità di rilascio di vapori infiammabili dagli sfiati dovrebbe essere considerata anche nel caso di liquidi combustibili ad alto punto di ebollizione. Infatti, nel caso di temperature estremamente elevate, anche i

liquidi ad alto punto di ebollizione stoccati o lavorati in attrezzature atmosferiche possono superare il punto di infiammabilità, generando vapori infiammabili che possono accendersi durante il rilascio; g) considerare l'installazione di protezioni specifiche contro gli incendi da tenuta dei bordi nel caso di serbatoi con tetto galleggiante. Temperature elevate possono aumentare la generazione di vapori infiammabili nei serbatoi con tetto galleggiante, che possono fuoriuscire attraverso le fessure tra il tetto galleggiante e il guscio del serbatoio, aumentando il rischio di accensione e incendi da tenuta dei bordi; h) verificare l'appropriatezza dei sistemi di stoccaggio e delle attrezzature di processo utilizzate per sostanze sensibili al calore. L'accensione diretta di tali materiali, che può provocare un incendio, è stata identificata come causa di incidenti scatenati da ondate di calore. I sistemi di stoccaggio e le attrezzature di processo devono essere progettate per gestire le temperature ambientali estreme che possono verificarsi durante le ondate di calore senza causare la decomposizione spontanea delle sostanze. Si dovrebbe considerare un'adeguata ridondanza del sistema di raffreddamento; i) verificare l'appropriatezza dei sistemi di rilevazione incendi e di estinzione degli incendi nella conservazione e nel trattamento dei rifiuti. Il settore del trattamento dei rifiuti è stato quindi particolarmente vulnerabile agli incendi durante le ondate di calore; l) verificare l'adeguatezza del controllo della composizione dei rifiuti. In particolare, a seconda del tipo di rifiuto, sono di particolare importanza test specifici riguardanti la stabilità, l'auto decomposizione e/o l'auto accensione durante le ondate di calore. La presenza di materiali vetrosi esposti alla radiazione solare nelle pile di rifiuti solidi dovrebbe essere evitata poiché è responsabile di incidenti a causa dell'effetto lente. È utile considerare anche la possibile diminuzione del contenuto di acqua/umidità dei rifiuti durante le ondate di calore, poiché favorisce le condizioni che portano all'autoaccensione dei materiali; m) prevedere una adeguata eliminazione di vegetazione secca e sterpaglie all’interno e all’esterno (nelle vicinanze) dello stabilimento industriale; n) per quanto riguarda il personale prevedere e ripetere nel tempo la formazione dei lavoratori sui rischi associate alle ondate di calore. o) fornire adeguato abbigliamento protettivo come cappelli, occhiali da sole e guanti; p) fornire ventilazione adeguata agli ambienti di lavoro; q) adeguare i piani di emergenza per quanto riguarda le ondate di calore.

5. Conclusioni

Le ondate di calore, oltre a causare gravi rischi per la salute alle persone e ai lavoratori, possono innescare eventi natech, specialmente negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante connessi con sostanze pericolose, come incendi, esplosioni e rilasci tossici nell’ambiente. Ad oggi le ondate di calore sono considerate eventi naturali di minore intensità rispetto ai terremoti, alle alluvioni, ecc.

Alla luce dell’esperienza sul campo degli autori, che fanno parte di commissioni di ispezione per valutare i Sistemi di Gestione della Sicurezza (SGS-PIR) e/o di Gruppi di

lavoro (GdL) per valutare i Rapporti di Sicurezza, quasi sempre, i gestori trascurano gli effetti delle ondate di calore nella valutazione del rischio degli incidenti natech. Questo spesso per scarsa consapevolezza degli stessi gestori.
L'articolo partendo dai report ambientali sull'aumento delle temperature globali, propone un metodo ad indice preliminare, al fine di determinare il livello del rischio natech da ondate di calore per l'identificazione dei singoli sistemi tecnici critici negli stabilimenti industriali con pericolo di incidente rilevante, finalizzato all'individuazione dei successivi livelli di approfondimento. Tale metodo ad indice può essere applicato ad ogni area geografica dove può ricadere uno stabilimento industriale.
Il presente studio oltre a sensibilizzare i gestori di detti stabilimenti sugli effetti delle ondate di calore, propone una serie di interventi (non esaustivi) al fine di ridurre il livello del rischio natech associato alle ondate di calore.

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] https://www.ipcc.ch/, Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico delle Nazioni Unite (IPCC).

[3] Ricci, F.; Casson Moreno, V.; Cozzani, V.; Analysis of Natech Accidents Triggered by Extreme Temperatures in the Chemical and Process Industry. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS (2020), ISBN 978-88-95608-80-8; ISSN 2283-9216, DOI: 10.3303/CET2082014

[4] REPORT AMBIENTALI SNPA | 44 2025 IL CLIMA IN ITALIA NEL 2024 Delibera del Consiglio SNPA n. 287/25 del 2.07.2025, ISBN 978-88-448-1265-2 | Roma, luglio 2025

[5] European Enviroment Agency, EEA Report 01/2024.

[6] https://climadat.isprambiente.it/conoscere-i-cambiamenti-climatici/impatti-vulnerabilita-adattamenti/

[7] 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.

[8] Ricci, F.; Casson Moreno, V.; Cozzani, V. NaTech Accidents Triggered by Heat Waves.. Safety 2023, 9(2), 33; https://doi.org/10.3390/safety9020033

[9] United Nations. Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS), 9th ed.; United Nations: New York, NY, USA; Geneva, Switzerland, 2021.

Gestione del Rischio Natech indotto da fulmini

G. Grillone[1], A. Muratore[2], M. Bellissimo[1], E. Genco[3], R. Sunseri[1], V. Nastasi[1]

[1]Inail - UOT Palermo, Inail, Via Del Fante 58 D, 90146 Palermo.
[2]Inail - UOT Como, Via Petrarca 4, 22100 Como.
[3]Università degli Studi di Palermo, Dipartimento della Promozione della Salute, Materno-Infantile, di Medicina Interna e Specialistica di Eccellenza "G. D'Alessandro" (PROMISE).

Sommario
I principali database internazionali evidenziano che i fulmini rappresentano gli eventi che innescano più frequentemente gli incidenti NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) negli stabilimenti industriali a rischio di incidente rilevante. Ciò è dovuto al fatto che i fulmini possono interagire con le apparecchiature industriali sia direttamente sia indirettamente, ad esempio attraverso i sistemi di controllo e i circuiti elettrici.
Un incidente è più probabile quando i materiali rilasciati a seguito dell'evento di fulminazione sono infiammabili, con l'incendio che rappresenta la conseguenza più comune. I meccanismi di danno più gravi sono riconducibili all'azione diretta del fulmine, che riscalda le aree colpite, provoca rotture e/o perforazioni di serbatoi e/o delle tubazioni di collegamento e, ad esempio, può innescare i vapori presenti sui tetti galleggianti dei serbatoi atmosferici contenenti combustibili liquidi, determinando generalmente l'incendio dell'intero serbatoio.
L'articolo si propone di introdurre un metodo semplificato, ad indice, che fornisce una valutazione preliminare del rischio NaTech da fulmine, $R_{Natech,F}$, per ciascuna apparecchiatura in grado di causare un incidente rilevante, basandosi su tre fattori principali:
N_g = densità di fulmini al suolo;
V = vulnerabilità dell'apparecchiatura;
E = esposizione, intesa come estensione e gravità dei danni ai recettori potenzialmente interessati dalle conseguenze degli incidenti innescati dal fulmine (lavoratori, popolazione, ambiente, beni, infrastrutture).
Dopo la valutazione dell'$R_{Natech,F}$ per tutte le apparecchiature installate nello stabilimento industriale analizzato, vengono descritte idonee misure di prevenzione e mitigazione del rischio. Come esempio applicativo viene illustrato il caso di un serbatoio atmosferico di stoccaggio di combustibili con tetto galleggiante.
Infine, gli autori descrivono i principali effetti sulla salute dei lavoratori e dei cittadini residenti in prossimità degli impianti industriali, causati da incidenti indotti da fulmini che possono determinare incendi, esplosioni e rilascio di sostanze tossiche.
Parole chiave: NaTech, fulmini, sicurezza e salute dei lavoratori, salute della popolazione

1. Introduzione: incidenti NaTech indotti da fenomeni di fulminazione

L'innesco più comune degli incidenti NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) è il fulmine (Necci et al., 2018; [1]). Il fulmine può interagire con le apparecchiature industriali tramite contatto diretto o indiretto (esempio: sistemi di controllo e circuiti elettrici). Le tipologie degli incidenti Natech sono catalogati nei database (Necci et al., 2018; [1]):

MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service – Regno Unito): fulmini, 56%; temperatura, 17%; alluvioni, 13%; vento, 7%; terremoti, 5%;

ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents – Francia): fulmini, 20%; temperatura, 11%; alluvioni, 17%; vento/tempeste, 7%; terremoti, 3%; piogge intense, 29%;

EMARS (Commissione Europea): fulmini, 21%; temperatura, 9%; alluvioni, 12%; vento/tempeste, 24%; piogge intense, 3%; gelo, 28%;

TAD (prodotto dell'Institution of the Chemical Engineers, IChemE): fulmini, 38%; temperatura, 6%; alluvioni, 2%; vento/tempeste, 9%; terremoti, 5%; piogge intense, 4%.

Le strutture colpite dai fulmini negli incidenti NaTech sono (Necci et al., 2018; [1]): a) serbatoi di stoccaggio, 74%; b) apparecchiature di processo, 8%; c) apparecchiature elettriche, 5%; d) edifici o strutture, 2%; ecc.

Infine, gli incidenti NaTech causati dai fulmini determinano: incendi, 58%; esplosione e incendio, 19%; esplosione, 6%; danni alle apparecchiature, 6%; rilascio di gas/vapori, 2%; ecc. (Necci et al., 2018; [1]).

Considerando i cambiamenti climatici in corso, diversi studi e ricerche condotti nel corso degli anni indicano un aumento atteso della frequenza dei fulmini compreso tra il 5–6% (Price e Rind, 1994; [2]) e il 10–20% (Pinto et al., 2013; [3]) per ogni grado di incremento della temperatura superficiale terrestre.

Sebbene il pericolo dei fulmini sia ben noto, dalle esperienze passate si è appreso ancora relativamente poco per migliorare le procedure di gestione del rischio. In questo articolo gli autori, sulla base della loro esperienza istituzionale in attività di verifica e ispezione, introducono un metodo basato su indici per determinare il livello di rischio NaTech (per ciascun tipo di apparecchiatura critica) indotto dai fulmini ($R_{Natech,F}$). Successivamente vengono individuate le principali misure di prevenzione e/o protezione.

2. Fattori che influenzano i rischi Natech da fulmini

Per valutare i rischi NaTech da fulmini bisogna tener conto di tre fattori principali: 1) probabilità associata al verificarsi di un evento naturale di determinate intensità in un arco di tempo; nel caso dei fulmini si considera il parametro "N_g" che rappresenta la densità dei fulmini al suolo (numero medio di fulmini per Km^2 per anno; valore rilevabile dalle reti di localizzazione dei fulmini dislocate sul territorio); 2) Vulnerabilità delle attrezzature critiche "V" (es. serbatoi atmosferici di carburanti a

tetto galleggiante o fisso, serbatoi in pressione contenti sostanze infiammabili, come il GPL, tubazioni di collegamento, etc.); 3) Esposizione "E", intesa come estensione e gravità dei danni per i recettori potenzialmente coinvolti dagli effetti degli eventi incidentali originati dai fulmini (lavoratori, popolazione, ambiente, beni, infrastrutture). Pertanto, il valore del rischio NaTech indotto da fulmini "$R_{Natech,F}$ " è funzione dei tre fattori: N_g, V, E:

$$R_{Natech,F} = f(N_g, V, E) \qquad (1)$$

L'espressione (1) non è facile da calcolare, perché le sue tre variabili dipendono da molte altre variabili. Pertanto, gli autori propongono un metodo ad indice semplificato basato sull'espressione (2), applicandolo ai singoli sistemi critici di contenimento primario presenti all'interno dello stabilimento industriale:

$$IR_{Natech,F} = IN_g * IV * IE \qquad (2)$$

dove $IR_{Natech,F}$, IN_g, IV ed IE sono rispettivamente l'indice di rischio NaTech da fulmini, l'indice di densità dei fulmini al suolo, l'indice di vulnerabilità della attrezzatura considerata e l'indice di esposizione per gli eventi incidentali originati dai fulmini. Ai tre indici IN_g, IV e IE si attribuiscono valori numerici crescenti al crescere del rischio (valori interi compresi tra 1 e 4), in modo da determinare l'indice di rischio Natech da Fulmini ($IR_{Natech,F}$) per tutte le attrezzature critiche presenti nello stabilimento industriale; da tale valutazione dipenderà la scelta delle misure da adottare per la prevenzione e/o protezione dal rischio.

3. Acquisizione delle informazioni sui pericoli di fulminazioni nell'area dello stabilimento. Densità dei fulmini al suolo, N_g. Indice di densità dei fulmini al suolo, IN_g.

La Figura 1 riporta le fulminazioni nel mondo nell'anno 2021 (2021 U.S. Lightning Report, 2022, website: www.vaisala.com; [4]). Tra i Paesi del Mondo a ricevere più fulmini in assoluto nel 2021 si annoverano Brasile e Stati Uniti, mentre, in Europa, l'Italia è il paese più colpito (2,7 milioni di fulmini, in media quasi 12 fulmini per chilometro quadrato, secondo il 2021 U.S. Lightning Report, 2022; [4]). Nei Balcani la media è superiore, con un massimo di 14,4 fulmini per chilometro quadrato nel Montenegro (2021 U.S. Lightning Report, 2022; [4]).

I gestori/datori di lavoro di stabilimenti industriali possono fare riferimento ai dati sulla densità di fulminazione disponibili sul sito web "vaisala" (www.vaisala.com) per una valutazione preliminare del rischio, dove vengono pubblicati i report relativi a tali registrazioni. In Italia è possibile determinare il punto di impatto di un fulmine con un'accuratezza di circa 500 metri, grazie al sistema SIRF (Sistema Italiano di Rilevamento dei Fulmini) del CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano).

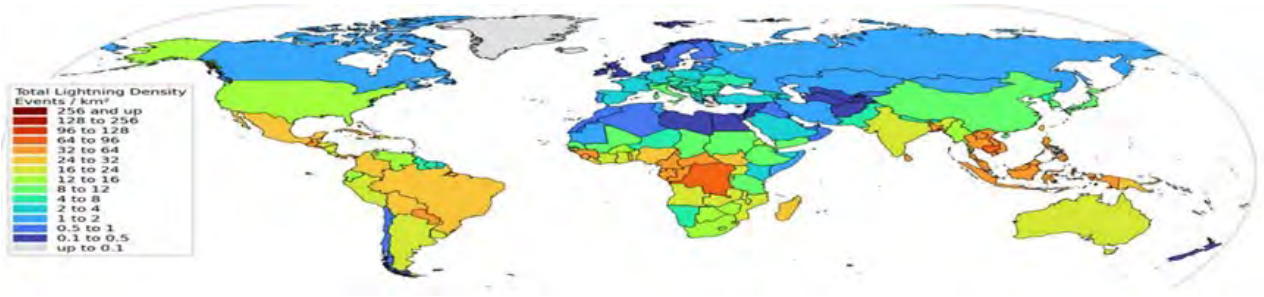


Figura 1. Densità di fulminazione globale 2021 (2021 U.S. Lightning Report, 2022; [4])

Per l'analisi della cronologia degli eventi ceraunici si può fare riferimento all'applicazione online CEI ProDis^{TM} (https://prodis.ceinorme.it/home.html; [5]) del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano), basata sui dati acquisiti dalla rete di monitoraggio SIRF, che fornisce un valore di N_g basato sui dati di fulminazione rilevati in oltre dieci anni di osservazioni sull'intero territorio italiano.
Utilizzando pertanto l'applicazione CEI ProDis^{TM}, il gestore di uno stabilimento industriale italiano può determinare il valore di N_g per il proprio sito. Valori più elevati di Ng corrispondono a una maggiore probabilità che i fulmini colpiscano il sito industriale oggetto di valutazione. Sulla base dell'esperienza in campo degli autori, N_g può essere messo in relazione con l'indice introdotto nel paragrafo precedente, IN_g (indice di densità dei fulmini al suolo, adimensionale), che assume valori interi compresi tra 1 e 4 (tabella 1).

N_g	IN_g
Valore fino a 1,00	1
Valore da 1,00 a 2,99	2
Valore da 3,00 a 4,99	3
Valori pari o superiore a 5,00	4

Tabella 1. Relazione tra N_g (densità di fulmini al suolo, misurata come numero medio di fulminazioni per km² per anno) e IN_g (indice di densità di fulmini al suolo, adimensionale).

4. Indice di vulnerabilità da fulmini delle attrezzature, IV

Negli stabilimenti industriali è importante individuare la vulnerabilità delle attrezzature critiche che sono alla base di innesco di eventi NaTech da fulmini.
Il presente lavoro si concentra sulle apparecchiature più critiche contenenti sostanze pericolose, tipicamente presenti nei settori della trasformazione e dello stoccaggio: apparecchiature in pressione (sfere, colonne, reattori, scambiatori, serbatoi, forni), serbatoi di stoccaggio atmosferici (a tetto fisso o galleggiante) e sistemi di tubazioni contenenti o convoglianti sostanze pericolose (sia in pressione che non in pressione).
La tabella 2 riporta, alla luce dell'esperienza in campo degli autori, la relazione tra la tipologia di attrezzatura, contenente sostanze pericolose, e l'indice di vulnerabilità

"IV" (adimensionale, valori interi compresi tra 1 e 4), in condizioni di buona manutenzione.

Tipologia attrezzatura	Grado di riempimento	Caratteristiche costruttive	Indice di Vulnerabilità IV
Serbatoi tetto galleggiante	>50% / < 50%		4/3
Serbatoi a tetto fisso	>50 % /< 50%		3/2
Serbatoi in pressione (sfere, colonne, reattori, forni, ecc.)		Costruite ante direttiva PED / Costruite secondo direttiva PED (1997, [6])	3/2
Tubazioni in pressione		Costruite ante direttiva PED / Costruite secondo direttiva PED (1997, [6])	2/1
Tubazioni non in pressione		Costruite ante direttiva PED / secondo direttiva PED (1997, [6])	1

Tabella 2. Valori dell'indice di vulnerabilità da fulmini (IV, adimensionale) in funzione di una specifica attrezzatura.

Nella tabella 2 il valore di IV di un serbatoio viene valutato in funzione del proprio grado di riempimento, poiché se il serbatoio atmosferico è pieno o quasi pieno (ossia il tetto galleggiante è in posizione alta), la corrente di fulminazione si scarica direttamente sugli shunts (conduttori che consentono il deflusso della corrente verso terra) in corrispondenza del punto in cui è caduto il fulmine, mentre, se il tetto galleggiante è in posizione bassa (grado di riempimento < 50%), la corrente di fulminazione, per effetto della sua distribuzione sulla parete del serbatoio, giungerà sugli shunts con intensità di gran lunga inferiore (Figura 2, Lanzoni, 2009; [7]).

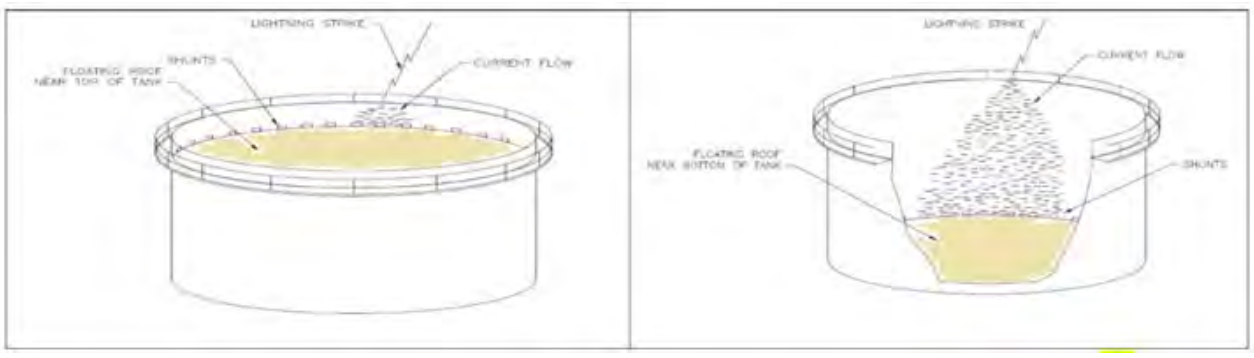


Figura 2. Concentrazione della corrente di fulminazione con tetto galleggiante in posizione Alta-Bassa (Lanzoni, 2009; [7]).

5. Indice di Esposizione IE

Per "Esposizione" si intende l'estensione e la gravità del danno per i recettori potenzialmente coinvolti dagli effetti degli eventi incidentali originati dai fulmini (lavoratori, popolazione, ambiente, beni, infrastrutture).

Per quanto riguarda gli stabilimenti industriali (intese come edifici, parti di impianto, apparecchiature, condotte, ecc. o linee elettriche di connessione degli impianti industriali), l'analisi degli incidenti NaTech innescati dalle fulminazioni evidenzia due differenti meccanismi di impatto: 1) impatti diretti, che provocano danni agli operatori all'interno o in prossimità della struttura ed alle strutture o l'innesco di sostanze esplosive o di vapori infiammabili da parte della scarica (per esempio nel caso dei serbatoi a tetto galleggiante); 2) impatti indiretti, che possono provocare perdita di contenimento, con possibilità di incendio e/o esplosione, qualora contengano sostanze combustibili, infiammabili o esplosive; a causa di alterazioni dei processi dovute all'interruzione di energia elettrica e cali di tensione e di impatti sui sistemi elettrici ed elettronici di controllo e sicurezza, nonché su apparecchiature e dispositivi.

Le conseguenze dei danni e dei guasti possono estendersi e aree circostanti l'impianto, interessando altre parti dello stabilimento ed in determinati casi interessando anche l'ambiente circostante (effetto domino). In relazione a quanto evidenziato sopra gli autori propongono di assegnare all'indice di esposizione "IE" da fulmini (adimensionale) i valori interi compresi tra 1 e 4, così come riportato nella tabella 3.

Tipo di esposizione da fulmini	IE (indice di esposizione)
Solo possibili impatti indiretti	1
Possibili impatti diretti ed indiretti in prossimità dell'unità colpita. Non vi è possibilità di effetto domino (per esempio serbatoio limitrofo ad altri serbatoi)	2
Possibili impatti diretti ed indiretti che può coinvolgere l'intero stabilimento. Vi è la possibilità di effetto domino (per esempio serbatoio limitrofo ad altri serbatoi)	3
Possibili impatti diretti ed indiretti che può coinvolgere l'esterno dello stabilimento con possibilità di effetto domino	4

Tabella 3. Indice di Esposizione IE in funzione dell'esposizione da fulmini (adimensionale).

6. Livello di accettabilità del rischio NaTech da fulmini

Una volta individuati i tre fattori che influenzano il rischio NaTech da fulmini, tramite gli indici IN_g, IV e IE, si determina l'indice di rischio NaTech da fulmini ($IR_{Natech,F}$) utilizzando la relazione (2).

Dal punto di vista grafico si fa riferimento ad una matrice di rischio (4x4x4). Fino a valori di pari a 4, il rischio NaTech è accettabile. Per valori di $IR_{Natech,F}$ compresi tra 4 ed 8, il rischio è accettabile ma richiede la pianificazione nel tempo di opportune

azioni di prevenzione e mitigazione. Per valori di $IR_{Natech,F}$ compresi tra 8 e 32 devono essere attuati interventi urgenti di prevenzione e protezione al fine di rendere accettabile il rischio NaTech da fulminazione (i.e., minore di 8). Per valori di $IR_{Natech,F}$ superiori a 32, il rischio natech da fulmini è non accettabile.

7. Stabilimenti Nuovi ed Esistenti. Interventi per ridurre la vulnerabilità del rischio NaTech da fulmini

Nel caso di stabilimenti industriali di nuova costruzione è importante individuare un sito di installazione idoneo, in modo da gestire i tre fattori di rischio da fulmini: "N_g", "E" ed "V", riducendoli ai valori più bassi possibili.

Per gli stabilimenti esistenti, ai fini della minimizzazione del rischio NaTech da fulmini, è possibile intervenire solo sulla vulnerabilità "V", mentre poco si può fare sugli altri due fattori "E" ed "N_g", che dipendono dall'ubicazione del sito industriale e dall'urbanizzazione limitrofa.

Di seguito vengono riportati alcuni esempi (non esaustivi) di misure possibili per ridurre la vulnerabilità degli impianti industriali critici:

A) Interventi di natura tecnica: Per ridurre la vulnerabilità "V" delle attrezzature critiche occorre prevedere l'installazione di dispositivi atti a garantire la continuità elettrica o a limitare le sovratensioni, adottando misure di protezione atte ad assicurare che: a) il percorso delle fulminazioni sia tenuto lontano da sostanze infiammabili ed esplosive, attraverso vie preferenziali a bassa impedenza, sfruttando la caratteristica dei metalli di essere buoni conduttori; b) sia evitato il surriscaldamento dei conduttori; c) sia evitato l'incremento di potenziale dei dispersori degli impianti di messa a terra; d) sia incrementata la resistività superficiale del suolo nella fascia di 3 metri intorno alla struttura da proteggere; e) sia incrementata la resistività superficiale dei pavimenti interni della struttura; f) sia garantita la schermatura della struttura; g) sia garantita la schermatura dei circuiti interni alla struttura; h) sia assicurata un'idonea distribuzione del cablaggio dei circuiti interni alla struttura; i) sia prevista la schermatura delle linee elettriche entranti; ecc..

B) Interventi di manutenzione, controllo e verifica: Si devono prevedere, opportune manutenzioni ed ispezione dei sistemi di protezione dai rischi di fulminazione, che preveda l'effettuazione di test e di misure di continuità elettrica. Infatti gli impianti contro le scariche atmosferiche tendono a perdere nel tempo la loro efficacia a causa della corrosione e dei danneggiamenti dovuti a condizioni ambientali, urti meccanici e caduta di fulmini.

C) Interventi di natura organizzativa: In aggiunta a quanto sopra, si possono prevedere interventi di natura organizzativa (per es. abbassando il grado di riempimento dei serbatoi di stoccaggio atmosferici in attesa di programmare gli interventi di manutenzione, prevenzione).

8. Esempio applicativo: serbatoio atmosferico di stoccaggio di combustibili con tetto galleggiante

Consideriamo il caso studio di un serbatoio atmosferico di stoccaggio benzina a tetto galleggiate, che fa parte di un parco serbatoi di un deposito di carburanti (possibilità di effetto domino in caso di evento NaTech da fulmine).

I dati relativi al caso studio sono:

- grado di riempimento del serbatoio = 75%.
- coordinate geografiche del serbatoio all'interno dello stabilimento: Latitudine= 38,092423° N, Longitudine=13,402614° E.

Dalle coordinate geografiche (CEI ProDisTM, [5]) si ottiene N_g = 1,41 fulmini / (anno km^2) ed utilizzando la tabella 1, si ricava un IN_g= 2 (tabella1). Utilizzando le tabelle 2 e 3, si ottiene IV = 4 (vedi tabella 2, "serbatoi a tetto galleggiante" con "grado di riempimento > 50%) e IE = 4 (vedi tabella 3, "possibili impatti diretti ed indiretti che può coinvolgere l'esterno dello stabilimento con possibilità di effetto domino").

Pertanto, l'indice di rischio da fulminazione è valutato mediante la relazione (2):

$$IR_{Natech,F} = IN_g \times IV \times IE = 2 \times 4 \times 4 = 32 \qquad (3)$$

e, quindi, il rischio risulta NON accettabile (vedi par. 6).

Un possibile intervento organizzativo immediato consiste nel mantenere il livello di riempimento del serbatoio di carburante a un massimo del 45% della capacità, ottenendo così un valore inferiore di $IR_{Natech,F}$ = 2 × 3 × 4 = 24. Per un valore di $IR_{Natech,F}$ = 24, è necessario pianificare misure urgenti di prevenzione, protezione e mitigazione al fine di renderlo accettabile (minore di 8). Tale risultato può essere raggiunto, per esempio, seguendo le indicazioni del paragrafo 7.

9. Lesioni da fulmini

I fulmini hanno un tasso di mortalità di circa il 10% (National Weather Service, [8]) e causano circa 30 decessi e diverse centinaia di feriti ogni anno negli USA (Centers for Disease Control and Prevention, 2022; [9]); l'arresto cardiopolmonare al momento dell'elettrocuzione è la causa più frequente di morte.

Il fulmine tende a colpire oggetti isolati, come una persona in un campo aperto, provocando solitamente, nella persona colpita, danni al sistema nervoso, danneggiando il cervello, il sistema nervoso autonomo e i nervi periferici; raramente provoca gravi ferite cutanee e di rado causa rabdomiolisi o gravi danni ai tessuti interni.

I problemi neurologici possono comprendere lo stato confusionale, deficit cognitivi e neuropatia periferica, potendo anche insorgere sequele neuropsicologiche (ad esempio, disturbi del sonno, deficit di attenzione e di memoria) (Runde, 2024; [10]). Le complicanze a lungo termine più frequenti sono i deficit cognitivi, le sindromi dolorose e i danni del sistema nervoso simpatico.

L’inquadramento clinico richiede un elettrocardiogramma se la lesione è grave e se si sospettano effetti cardiovascolari. Inoltre si esegue la titolazione degli enzimi cardiaci in pazienti che presentano i seguenti sintomi: a) dolore toracico; b) elettrocardiogramma anomalo; c) stato mentale alterato.
Per i pazienti con uno stato mentale inizialmente alterato o che va deteriorandosi o con deficit neurologici focali compatibili con una lesione del sistema nervoso centrale, si deve richiedere una TAC cerebrale e/o una risonanza magnetica cerebrale.
Il trattamento delle lesioni da fulmini consiste, se necessario in una tempestiva rianimazione cardiopolmonare (in caso di arresto cardiaco o respiratorio o di entrambi), e di norma una terapia di supporto, riducendo l'apporto di liquidi per minimizzare un potenziale edema cerebrale (Runde, 2024; [10]).
Le lesioni da fulmine possono essere prevenute informandosi opportunamente sulle condizioni meteorologiche e non uscendo all’aperto in caso di temporale, evitando piccole strutture aperte, come i gazebo, ed avere invece un piano di fuga che preveda l'evacuazione verso una zona sicura (preferibilmente un grande edificio abitabile).
Inoltre, quando si è in locali chiusi nel corso di una tempesta elettrica è opportuno: 1) evitare contatti con le linee idrauliche ed elettriche; 2) stare lontano da finestre e porte esterne; 3) non fare uso di telefoni, console per videogiochi o computer connessi alla rete elettrica, o di cuffie collegate da un cavo a un sistema audio.

10. Conclusioni

Lo scopo del presente lavoro, basato sull’esperienza degli autori, è di proporre un metodo ad indice per determinare il livello di rischio NaTech da fulmini per individuare le unità critiche di un determinato stabilimento industriale. Vengono inoltre forniti, in modo sintetico, gli interventi di natura tecnica, di manutenzione, controllo e verifica, nonché di natura organizzativa, finalizzati a ridurre il rischio NaTech da fulmini. È presentato un caso applicativo relativo ad un serbatoio di stoccaggio atmosferico a tetto galleggiante. Infine, vengono fornite indicazioni mediche per la prevenzione e la gestione delle lesioni da fulmine.

Bibliografia e sitografia

[1] Necci, A., Girgin, S., Krausmann, E.. Understanding Natech Risk Due to Storms – Analysis , Lessons Learned and Recommendations. EUR 29507 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-98274-3, doi: 10.2760/21366, JRC114176.
[2] Price, C., and D. Rind, 1994. Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. J. Geophys. Res., Anno 1994, 99: 10823-10831, doi:10.1029/94JD00019.

[3] Pinto Jr., O. , Pinto, I. and Neto, O.. Lightning Enhancement in the Amazon Region Due to Urban Activity. American Journal of Climate Change, Anno 2013; vol 2: 270-274, doi: 10.4236/ajcc.2013.24026.
[4] 2021 U.S. Lightning Report, 2022. Publisher: Vaisala. Disponibile all'indirizzo web: www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-2021-Annual-Lightning-Report-B212465EN-A.pdf (ultimo accesso al sito in data 29/12/2025).
[5] CEI ProDisTM. Applicazione on line che consente l'accesso ai dati densità ceraunica nel territorio italiano. Anno 2014. Disponibile all'indirizzo web: https://prodis.ceinorme.it/home.html (ultimo accesso al sito in data 29/12/2025).
[6] Comunità Europea. Direttiva 97/23/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 maggio 1997 per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri in materia di attrezzature a pressione. Anno 1997; Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea, L181, Vol. 40, p.1-55.
[7] Lanzoni J. A.. Improving Lightning Safety of Petroleum Storage Tanks. Anno 2009, disponibile all'indirizzo web: https://www.lightningprotection.com/wp-content/uploads/2017/04/improving_lightning_safety_of_petroleum _storage_tanks-oct_2009-lanzoni.pdf (ultimo accesso al sito in data 29/12/2025).
[8] National Weather Service. National Safety Program: How Dangerous is Lightning?. Disponibile all'indirizzo web: https://www.weather.gov (ultimo accesso al sito in data 29/12/2025).
[9] Centers for Disease Control and Prevention: National Center for Environmental Health: Lightning Strike Victim Data. Anno 2022, disponibile all'indirizzo web: https://www.cdc.gov/lightning/data-research/index.html (ultimo accesso al sito in data 29/12/2025).
[10] Runde D.P.. Lightning injuries. Anno 2024, disponibile all'indirizzo web: https://www.msdmanuals.com (ultimo accesso al sito in data 29/12/2025).

Analisi “NaTech” per impianti a rischio di incidente rilevante con il supporto di metodologie avanzate: esperienze operative e proposte di sviluppi futuri

P. Alfano[1], V. Bartolozzi[2], F. Caruso[3], S. Colombo[4], G. Romano[4]

[1] Sonatrach Raffineria Italia S.r.l., Raffineria di Augusta, Augusta (SR)
[2] Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente Sicilia, Palermo (PA)
[3] Direzione Regionale Vigili del Fuoco Sicilia, Palermo (PA)
[4] Tecnologia Ricerca Rischi S.r.l, Osio Sotto (BG)

Sommario

Nell’analisi di rischio di “incidente rilevante” [1] il Gestore prevede, all’interno del Rapporto di Sicurezza o in occasione di modifiche, un’analisi per la valutazione di potenziali scenari incidentali legati alle sostanze “pericolose”. Tra questi scenari gli eventi di tipo NaTech (Natural Hazards Triggering Technological Accidents) rappresentano una delle sfide emergenti per la sicurezza industriale, soprattutto negli impianti a rischio di incidente rilevante. La crescente frequenza e intensità di fenomeni naturali, dovuta anche ai cambiamenti climatici, rende necessario integrare l’analisi di vulnerabilità agli eventi naturali all’interno dei tradizionali modelli di valutazione del rischio. Il tessuto tecnico normativo è in costante sviluppo, come dimostra la pubblicazione della UNI/TS 11816-1:2021 [2] sul tema sismico, ma necessita di ulteriori passaggi che riguardano altre tipologie di eventi meteo estremi.

Il presente contributo descrive esperienze operative maturate nell’applicazione di metodologie avanzate per l’analisi NaTech in contesti industriali a rischio di “incidente rilevante”.

Le esperienze presentate evidenziano come l’impiego integrato di dati storici, modelli predittivi e tecniche di simulazione avanzate (analisi fluidodinamica e analisi numerico strutturale) possa consentire di superare i limiti degli approcci semplificati, fornendo un supporto più solido sia alla progettazione delle misure di prevenzione e protezione, sia al processo decisionale delle autorità competenti.

Infine, vengono proposte possibili linee di sviluppo futuro, come la creazione di una banca dati comune a livello nazionale specifica per il settore Seveso, l’armonizzazione dei criteri di analisi a livello normativo nonché l’integrazione dei modelli di cambiamento climatico nelle valutazioni di rischio.

1. Introduzione

L'analisi di rischio di "incidente rilevante" si colloca all'interno del più ampio processo di gestione del rischio definito nella Norma UNI ISO 31000:2018 [3] ed esemplificato nella seguente figura:

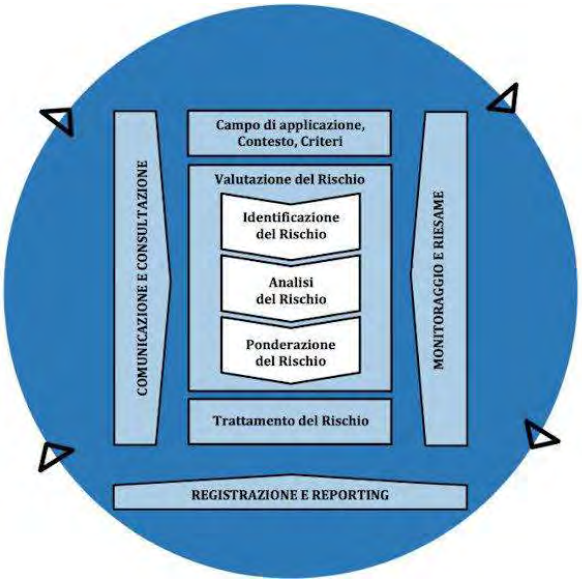


Figura 1. Processo Gestione del Rischio UNI 31000:2018

Per le tipologie di stabilimenti che ricadono all'interno della direttiva "Seveso" detta analisi di rischio è da tempo codificata e perlopiù uniformata a livello nazionale tanto da essere ormai nota e conosciuta dagli enti preposti quali CTR, ARPA, VVF, INAIL, prefetture, etc.

Nella seguente immagine si riporta uno schema semplificato della suddetta metodologia al fine di un successivo confronto con la metodologia integrante l'analisi da NaTech:

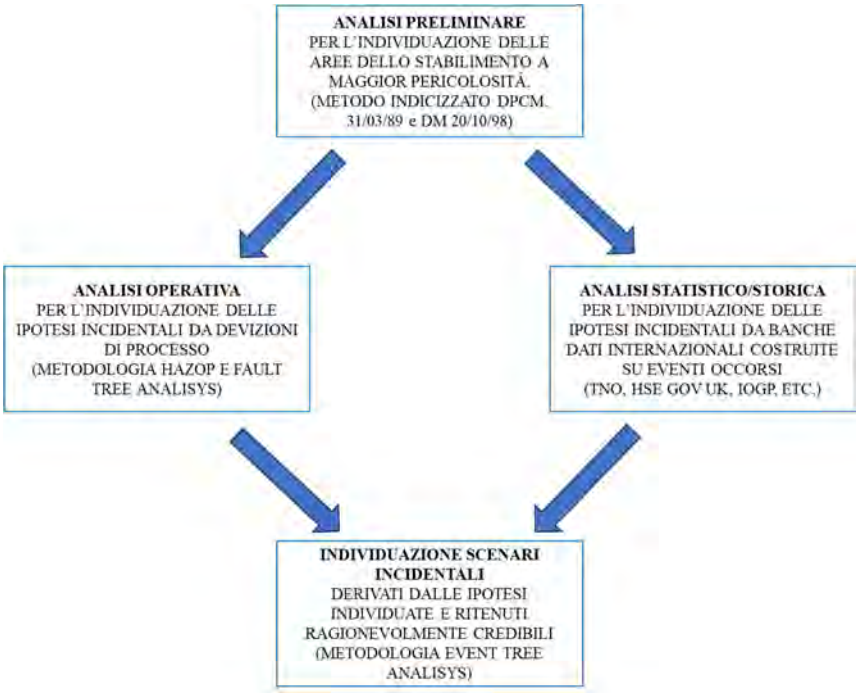


Figura 2. Metodologia Analisi di Rischio di Incidente Rilevante

Nel passato l'analisi da evento Natech era ricompresa nella più generale metodologia utilizzata per l'analisi statistico storica, in quanto nella costruzione delle banche dati si teneva conto anche di tali tipologie di eventi. Il legislatore nel corso del tempo, e sicuramente in maniera decisiva con l'introduzione dell'OPCM n. 3274 del 20 marzo 2003 - *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*, ha inteso introdurre elementi di analisi e di valutazione delle possibili criticità che possono emergere a seguito di eventi "naturali" intensi sulle installazioni industriali.
Con l'introduzione del D.Lgs. 105/15 [1] e della più recente e specifica normativa UNI/TS 11816-1:2021 [2] la suddetta analisi è stata integrata con nuove metodologie specifiche per l'individuazione di scenari di incidente rilevante derivanti da eventi di tipo NaTech.

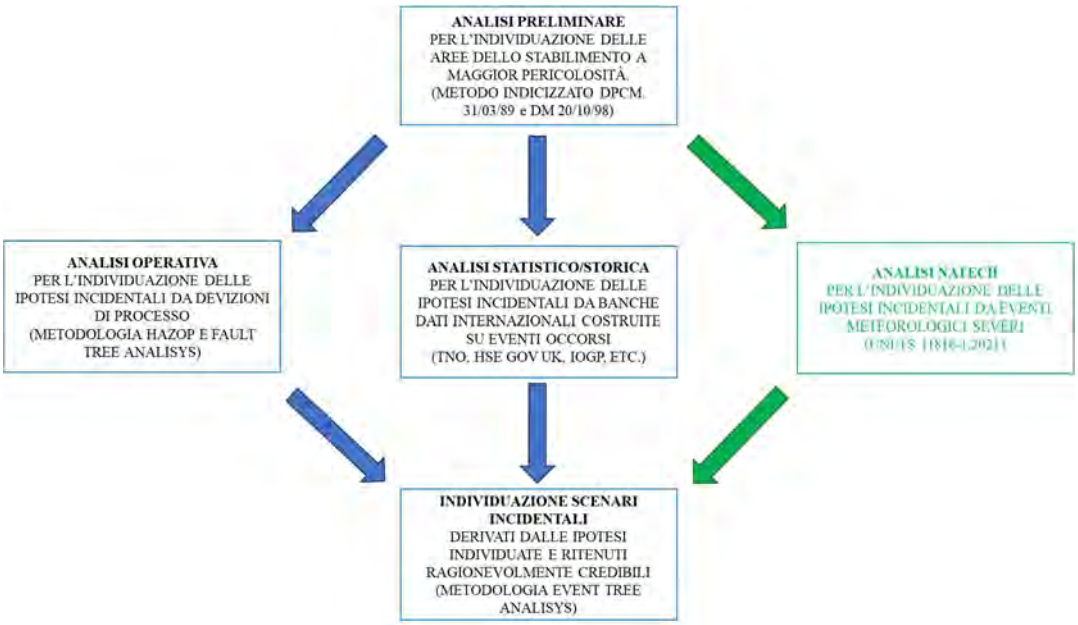


Figura 3. Metodologia Analisi di Rischio di Incidente Rilevante con NaTech

Questa integrazione comporta tuttavia l'introduzione di metodologie nuove, non ancora pienamente recepite dal normatore, né dagli operatori del settore né tantomeno dagli enti preposti, i quali si trovano a valutare metodologie differenti per i relativi siti industriali di competenza.
Il normatore, ad oggi, con la UNI/TS 11816-1:2021 [2] ha fornito una linea guida per lo sviluppo di una metodologia relativa~~mente~~ agli eventi incidentali derivanti da Sisma, mentre risultano in stato di emissione, le proposte normative relative a fulminazione e alluvione.
Allo stato attuale la principale criticità risiede nell'individuare una metodologia che permetta di correlare le frequenze di danno alle modalità/stati di danneggiamento.
Con la presente memoria si intende raccogliere alcune esperienze operative maturate nella trattazione delle suddette tematiche, anche mediante confronto tecnico con gli enti nazionali preposti alla valutazione, al fine di fornire spunti per la redazione delle analisi di rischio da parte degli esperti del settore e per fornire proposte per sviluppi futuri.

2. Natech Sisma

Tra le diverse tipologie di eventi NaTech, l'analisi di rischio da evento sismico risulta essere trattata in modo più uniforme nel panorama nazionale grazie all'introduzione della UNI/TS 11816-1:2021 [2].

L'approccio suggerito affronta la tematica in modo globale e ricomprende sia l'identificazione sia la gestione degli elementi impiantistici suscettibili a sisma nelle fasi pre e post evento e suggerisce inoltre possibili interventi preventivi e mitigativi.

La metodologia proposta per l'effettuazione della suddetta analisi all'interno di contesti industriali anche di grosse dimensioni dove, sia per numero che per complessità strutturale, risulta necessario intervenire sugli elementi effettivamente critici al sisma escludendo, come previsto anche dalla UNI/TS 11816-1:2021 [2], quelle che non risultino in grado di generare incidenti rilevati (nè diretti, nè per effetto domino) e/o che non costituiscano un sistema di prevenzione/mitigazione agli stessi.

La metodologia è composta dalle seguenti fasi:

- Analisi sismica del sito:
  In questa fase avviene la raccolta delle informazioni geologiche e geomorfologiche del sito e delle azioni sismiche locali.
- Analisi preliminare:
  In questa fase viene effettuato il censimento degli elementi critici mediante: la conoscenza dei processi industriali ove le "sostanze pericolose" risultano presenti, l'analisi storica degli elementi suscettibili a terremoto nello stabilimento, raccolta della documentazione di progetto e/o ricostruzione as-build degli stessi, ispezione visiva/strumentale dell'effettivo stato di realizzazione e conservazione, razionalizzazione e "tipicizzazione" degli elementi per caratteristiche costruttive e dimensionali, identificazione di un criterio qualitativo di priorità per le valutazioni successive (es. quantità di sostanza contenuta, capacità di generare effetti domino strutturali, posizionamento/caratteristiche dei supporti e/o delle strutture).
- Analisi della vulnerabilità sismica:
  In questa fase viene effettuata la valutazione della vulnerabilità sismica degli elementi individuati mediante l'individuazione di curve di fragilità che mettono in correlazione l'accelerazione sismica PGA (Peak Ground Accelleration) con la probabilità di danneggiamento P in relazione a differenti stati di danno DS (Damage State).
  Come accennato in precedenza questo aspetto risulta il più critico in quanto le banche dati internazionali risultano carenti nella copertura delle differenti tipologie di elementi impiantistici e nel dettaglio delle informazioni fornite.
  Si citano a titolo di esempio per i serbatoi le pubblicazioni HAZUS [4] le quali risultano le più complete nel fornire indicazioni circa la diretta correlazione tra probabilità di danno, i Damage State e i LOC (Loss Of Containment) e il diametro del foro di perdita (Hole Diameter).

Le altre banche dati spesso non permettono la correlazione tra lo stato di danno ipotizzato e la caratterizzazione del foro che ne consegue, il quale risulta fondamentale per caratterizzare gli scenari incidentali conseguenti.
Inoltre tale modalità di trattazione generalizza in tipologie gli elementi che presentano caratteristiche strutturali e comportamento al sisma completamente differenti andando spesso a sovrastimarne gli effetti.
Le possibili soluzioni alle criticità emerse possono essere quelle di ricostruire curve di fragilità ad hoc per i vari elementi mediante analisi elastiche lineari eseguite con modelli FEM per la quantificazione delle modalità di danno e con metodi quali il "Cloud Analysis" [5] per la costruzione della curva di fragilità.
Si riportano in figura un esempio di analisi FEM condotta su un Piperack all'interno di uno Stabilimento a rischio di incidente rilevante, già oggetto di precedente pubblicazione [15] da parte di alcuni degli autori della presente.

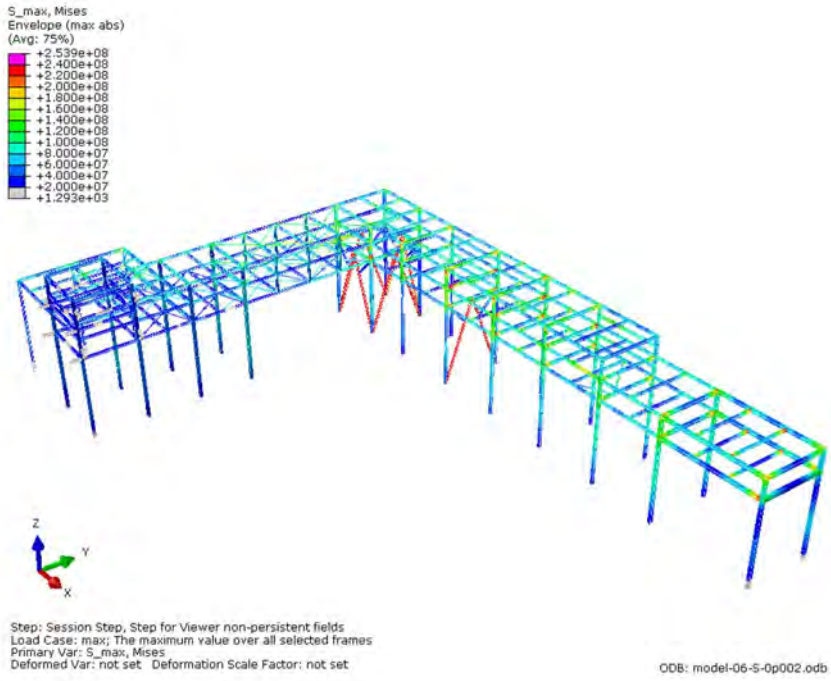


Figura 4. Analisi FEM condotta su piperack

- Quantificazione degli effetti conseguenti:
  Una volta definiti probabilità di accadimento, modalità di danno e dimensione dei fori di perdita con le metodologie descritte in precedenza, è possibile ricondurre l'analisi alla classica trattazione dell'evento mediante: l'applicazione dell'Event Tree Analisys al fine di identificare gli scenari conseguenti ed il dimensionamento degli effetti conseguenti mediante i software di modellazione d'uso comune nell'analisi di rischio di incidente rilevante (es. PHAST della DNV) o qualora ritenuto necessario modelli fluidodinamici tridimensionali più avanzati (es FLACS della Gexcon).
- Individuazione delle misure di prevenzione, mitigazione e gestione degli elementi:

Definiti gli effetti si può procedere alla trattazione degli ipotetici effetti domino conseguenti, all'individuazione delle misure di prevenzione e mitigazione specifiche e alla pianificazione e gestione dell'emergenza in caso di sisma.

3. Natech Maremoto

Strettamente legato alla trattazione dell'evento sismico descritta in precedenza vi è la trattazione degli eventi sismici marini, i quali, oltre all'effetto di scuotimento del terreno, possono generare la formazione di onde anomale Maremoti/Tsunami che per l'elevata velocità d'impatto possono causare ingenti danni agli elementi critici degli Stabilimenti a rischio di incidente rilevante situati lungo le coste italiane.
Per questa tipologia di eventi la metodologia proposta è la seguente:

- Analisi Preliminare:
  In questa fase risulta necessario condurre un'analisi storica per identificare gli eventi occorsi storicamente e gli effetti generati lungo il tratto costiero di interesse al fine di identificare preliminarmente le potenziali aree dello stabilimento che possono essere coinvolte. A tal proposito si citano i seguenti riferimenti online per l'estrazione di tali dati l'Archivio Storico Macrosismico Italiano (ASMI) [7] e i portali CAT-INGV [9] [10] e SIAM SIstema Allerta Maremoto [8].
  In questo caso le mappe di inondazione fornite da INGV potrebbero a volte risultare conservative in termini di estensione ai fini dell'individuazione degli elementi critici in caso di Maremoto.
  É possibile tuttavia condurre approfondimenti mediante l'impiego di appositi modelli di calcolo idrodinamici che tengono conto sia della batimetria dei fondali che dello sviluppo del maremoto a partire da mareogrammi temporali.
  Un esempio di tale analisi è stato condotto per lo Stabilimento Sonatrach Raffineria Italia S.r.l., Raffineria di Augusta, Augusta (SR) per la quale sono stati presi come input dataset batimetrici e topografici ricavati da fonti internazionali (portale Emodnet [12]) e mareogrammi sintetici calcolati dall'unità di ricerca ICTP Trieste [18] specifici di uno Tsunami prodotto da un determinato evento sismico definito a largo della costa.
- Analisi della vulnerabilità al maremoto:
  Tale analisi può essere condotta mediante l'individuazione della probabilità di accadimento di un maremoto con determinate altezze d'onda raggiunte a terra da banche dati quali TSUMAP-NEAM [11] moltiplicata per la probabilità di danneggiamento mediante studi di letteratura e/o curve di fragilità che mettono in relazione la probabilità di danno con l'altezza d'onda raggiunta.
  In questo caso è possibile trovare tali informazioni per strutture a mare (es. pontili, torce, etc.) e serbatoi in quanto solitamente disposti per necessità di approvvigionamento e di sicurezza lungo le coste.
  Nelle successive immagini si mettono a confronto le mappe di inondazione fornite dal portale Ispra e quelle calcolate con approccio avanzato condotto per la Raffineria Sonatrach di Augusta (SR).



Figura 5. Mappa di inondazione da maremoto ISPRA con livello di allerta rossa per la Raffineria di Augusta.



Figura 6. Mappa di inondazione dell'onda di maremoto all'interno della raffineria stimata con approccio avanzato.

4. Natech Alluvione

Come per il Maremoto l'effetto più impattante per gli elementi di uno stabilimento a rischio di incidente rilevante risulta essere la spinta dell'acqua in caso di alluvione.
Di secondaria importanza risultano invece gli effetti di un allagamento ai fini dell'accadimento di incidenti rilevanti in quanto risulta solitamente presente nelle aree critiche la rete di gestione e smaltimento reflui anche di emergenza progettata per lo stabilimento, per la quale ne va tuttavia verificato il dimensionamento in caso di accumulo.
Di notevole importanza rimane lo scenario di allagamento per i rischi legati alle aree di lavoro ove è presente personale operativo.
La metodologia proposta per tale analisi è pertanto la seguente:

- Analisi Preliminare:
  In questa fase avviene: l'individuazione dello scenario di piovosità e di convogliamento idrico nel reticolato fluviale di riferimento, l'individuazione di studi di dettaglio da parte delle autorità di bacino che di norma forniscono i dati per la redazione dei PAI (Piani di Assetto Idrogeologico), la valutazione morfologia del terreno e dei livelli ed eventuali studi geologici.
- Analisi della vulnerabilità all'alluvione:
  Per tale analisi è possibile individuare da analisi storica la frequenza di occorrenza di eventi di piovosità rilevanti occorsi in un lasso di tempo definito come rappresentativo da moltiplicare successivamente per la probabilità di danneggiamento degli elementi di interesse.
  Anche in questo caso sono pochi i riferimenti relativi a curve di fragilità da letteratura, inoltre per eventi alluvionali sono raramente disponibili modelli idrodinamici che forniscano informazioni relative alla velocità dell'acqua nei punti di interesse.
  Si riportano nel seguito le immagini relative ad una esperienza operativa condotta nell'area industriale di Brindisi dove, di particolare interesse, è stato l'impiego di modelli tridimensionali ricostruiti da dati LIDAR registrati e messi a disposizione dal MASE.



Figura 7. Ricostruzione 3D da campagna LIDAR del MASE

Tali dati sono serviti per calcolare geometricamente la sezione di deflusso, la pendenza del corso fluviale e stimare la velocità dell'acqua in alcuni punti di interesse, senza l'impiego di modelli di calcolo, ove risultavano presenti elementi sensibili ad un'ipotetica inondazione.

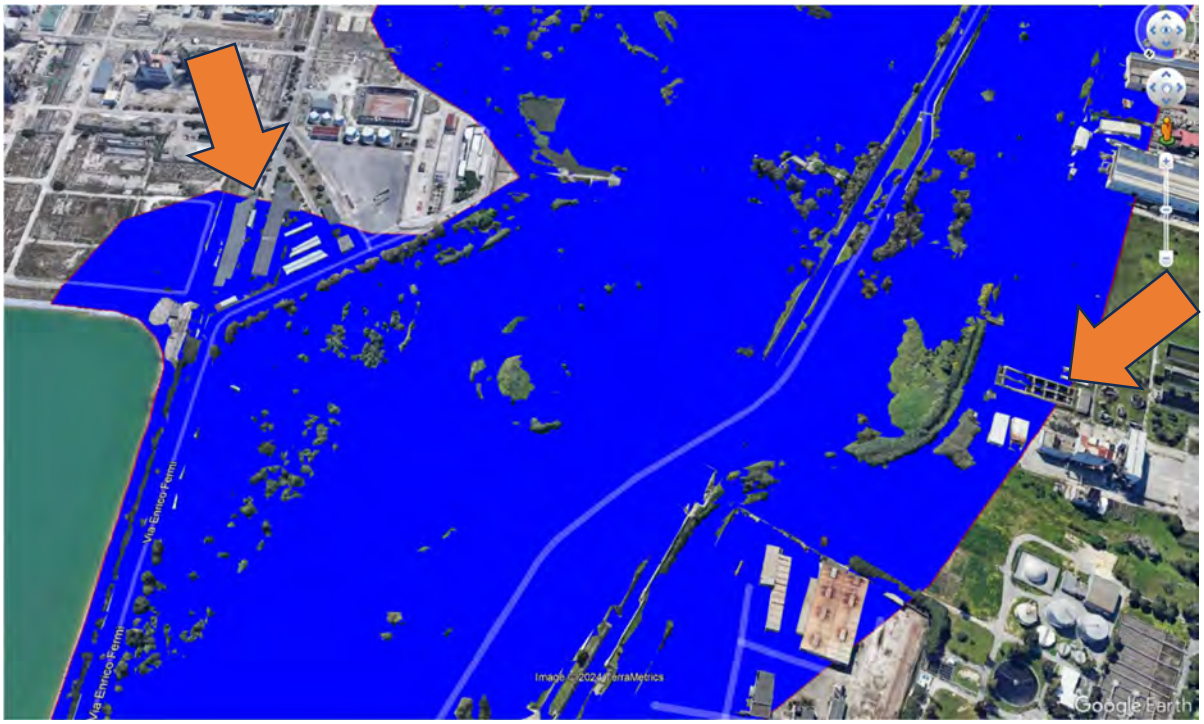


Figura 8. Limiti PAI considerati per il calcolo della sezione di deflusso

5. Conclusioni

Nella presente memoria sono stati mostrati alcuni recenti esempi di approcci metodologici utilizzati per sviluppare l'analisi di rischio Natech per differenti Stabilimenti a rischio di incidente rilevante, ed è stato mostrato come è possibile condurre l'analisi facendo uso sia ~~con~~ di dati provenienti dalla letteratura scientifica sia mediante l'introduzione e l'integrazione di analisi avanzate che hanno permesso di meglio descrivere gli effetti che tali eventi possono generare su specifici elementi critici presenti negli Stabilimenti Seveso.

Alla luce dei promettenti risultati ottenuti con l'applicazione della metodologia proposta, e al fine di rispondere alle richieste sempre più stringenti da parte del legislatore mirate alla prevenzione dei rischi, alla gestione delle emergenze e alla sostenibilità ambientale, la memoria stabilisce il traguardo della definizione e dell'armonizzazione a livello nazionale, delle principali fonti tecniche e delle diverse metodologie applicabili, al fine di fornire sia agli addetti al settore sia agli enti pubblici competenti responsabili delle istruttorie alle analisi di rischio, criteri di valutazione condivisi. Alla luce degli studi effettuati finora sugli stabilimenti Seveso, una proposta di semplice attuazione, potrebbe essere la creazione di una banca dati comune delle curve di fragilità, che vada ad ampliare la letteratura esistente e permetta di individuare gruppi di elementi (strutture, apparecchiature, attrezzature di impianto) con caratteristiche strutturali comparabili, l'armonizzazione dei criteri di analisi a livello normativo nonché l'integrazione e la condivisione dei modelli di cambiamento climatico nelle valutazioni di rischio e la diffusione delle informazioni circa le di misure preventive e/o mitigative efficaci già sperimentate negli Stabilimenti a rischio di incidente rilevante.

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] UNI/TS 11816-1:2021. Linee guida per la gestione di eventi NaTech nell'ambito degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Parte 1: Requisiti generali e sisma

[3] UNI ISO 31000:2018 Gestione del rischio - Linee guida

[4] FEMA (1997) HAZUS Earthquake loss estimation methodology – Technical Manual, U.S. Federal Emergency Management Agency, Washington.

[5] Jalayer F., Cornell A., (2003), A technical framework for probability-based demand and capacity factor design (DCFD) seismic formats. Pacific Earthquake Engineering Research Center Report, 08

[6] Lees F.P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth-Heinemann.

[7] Rovida A., Locati M., Antonucci A., Camassi R. (2017). Archivio Storico Macrosismico Italiano (ASMI) (Version 1.0). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/asmi.

[8] Portale online Tsunami Map Viewer SIAM - SIstema Allerta Maremoto indotto da Tsunami Map Viewer
[9] Maramai A., Graziani L., and Brizuela B. (2019). Italian Tsunami Effects Database (ITED). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/tsunami/ited.1.0
[10] Portale online Centro Allerta Tsunami, INGV, https://cat.ingv.it/it/
[11] Portale online TSUMAPS-NEAM Interactive Hazard Curve Tool (http://ai2lab.org/tsumapsneam/interactive-hazard-curve-tool/)
[12] Portale online European Marine Observation and Data Network (EMODnet) https://emodnet.ec.europa.eu/en
[13] S. Tinti, A. Armigliato, E. Bortolucci STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DI UN MAREMOTO NELL'AREA SIRACUSA-AUGUSTA
[14] Portale online Global Surface Water Explorer sviluppato dal JRC della Comunità Europea https://global-surface-water.appspot.com/map#v=40.63882,18.00359,12.755,latLng&t=0.91&l=wc
[15] G. Romano, S. Colombo, F. Chillè, D. Ardovino, Analisi NaTech Sisma per impianti a rischio di incidente rilevante: applicazioni operative con il supporto della tecnologia "Scan3D to FEM", SAFAP 2023

Rischio NaTech in stabilimenti industriali con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR): Studio della vulnerabilità sismica di connessioni Serbatoi-Tubazioni

C. Miglietta[1], D. Perrone[1], G. Gabbianelli[2], F. Micelli[1], M. Ciucci[3]

[1]Università del Salento
[2]Università di Pavia
[3]Inail - Dit

Sommario
In un contesto dove le calamità naturali risultano sempre più frequenti e intense, gli stabilimenti industriali soggetti a pericolo di incidente rilevante (PIR) richiedono un'attenta valutazione degli effetti di eventi estremi sulla sicurezza. Tra gli eventi NaTech, i terremoti possono causare danni strutturali e non strutturali ai componenti critici, con sequenze incidentali ed effetti domino che comportano rischi per lavoratori e cittadini, impatti ambientali e interruzioni produttive con rilevanti perdite economiche. La Direttiva Seveso III, recepita in Italia con il d.lgs. 105/2015, sottolinea la necessità di includere gli effetti delle azioni sismiche nell'analisi del rischio. Serbatoi, tubazioni e relative connessioni risultano tra gli elementi più vulnerabili, con particolare criticità per le connessioni serbatoio–tubazione. La loro rottura in punti privi di valvole di sicurezza può determinare lo svuotamento parziale o totale del serbatoio, con rischio di incendio, esplosione o rilascio di sostanze tossiche. Il presente lavoro presenta una campagna sperimentale per valutare la risposta sismica delle connessioni serbatoio–tubazione in diverse condizioni di carico. Sono stati realizzati prototipi rappresentativi degli attacchi tubazione–serbatoio e sono stati sottoposti a prove dinamiche e quasi-statiche, finalizzate ad analizzarne il comportamento isteretico, le modalità di danneggiamento ed i parametri fondamentali per la calibrazione di modelli numerici e lo sviluppo di analisi parametriche. I risultati contribuiranno ad ampliare le conoscenze sulle interazioni dinamiche serbatoi-tubazioni durante eventi sismici e a fornire dati sperimentali di riferimento per la valutazione della sicurezza degli impianti complessi, supportando migliori strategie di mitigazione del rischio NaTech da sisma.

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, l'aumento in frequenza e intensità delle calamità naturali ha accresciuto la vulnerabilità dei sistemi industriali, evidenziando la necessità di una valutazione più rigorosa delle interazioni tra eventi estremi e sicurezza degli impianti. In tale contesto, gli stabilimenti soggetti a pericolo di incidente rilevante (PIR) rivestono un ruolo centrale, poiché la presenza di sostanze pericolose amplifica le conseguenze di eventuali danneggiamenti. In risposta agli eventi NaTech (Natural Hazards Triggering Technological Accidents) [1], gli organismi di regolamentazione

hanno introdotto misure volte alla riduzione del rischio sismico in ambito industriale. La direttiva Seveso III dell'Unione Europea [2], recepita in Italia con il d. lgs. n. 105 [3], richiede la valutazione della vulnerabilità sismica dei componenti meccanici critici, sottolineando l'importanza di considerare anche gli elementi non strutturali essenziali per la sicurezza degli impianti [4]. Tra gli eventi NaTech, i terremoti rappresentano uno dei fattori più rilevanti per la loro capacità di generare danni diffusi e spesso non prevedibili, interessando sia componenti strutturali sia non strutturali. Le sollecitazioni sismiche possono compromettere l'integrità di apparecchiature, tubazioni e sistemi di processo, innescando scenari incidentali complessi ed effetti domino con potenziali impatti su lavoratori, popolazioni circostanti, ambiente e continuità produttiva. Durante un evento sismico, anche rotture localizzate possono causare il rilascio di sostanze pericolose, in particolare in corrispondenza di connessioni tra tubazioni e serbatoi, soprattutto in corrispondenza di punti sprovvisti di dispositivi di sicurezza in grado di limitare la perdita del contenuto.

Nonostante la rilevanza del problema, la letteratura scientifica evidenzia ancora una carenza di dati sperimentali specifici relativi al comportamento dinamico delle connessioni serbatoio–tubazione. Per questo motivo, è stata condotta una campagna sperimentale mirata a investigare la risposta sismica di tali connessioni mediante prove quasi-statiche e dinamiche su campioni in acciaio che simulano questo tipo di connessione. Le prove sperimentali hanno avuto l'obiettivo di caratterizzare il comportamento isteretico dei componenti, individuare eventuali modalità di danneggiamento e fornire parametri fondamentali per la calibrazione di modelli numerici avanzati.

I risultati derivanti dallo studio rappresentano un contributo significativo al miglioramento della comprensione delle interazioni dinamiche serbatoi–tubazioni durante eventi sismici e costituiscono inoltre un supporto essenziale per lo sviluppo di strategie più efficaci di mitigazione del rischio NaTech da sisma, con ricadute sulla progettazione, gestione e resilienza delle infrastrutture industriali.

2. Descrizione della campagna sperimentale

La campagna sperimentale comprende una serie di test in cui sono applicati protocolli di carico monotoni e ciclici su campioni in acciaio rappresentativi di connessioni serbatoio-tubazione. I protocolli di carico sono stati applicati considerando differenti condizioni di carico: assiale, trasversale e diagonale.

Le caratteristiche geometriche e fisiche dei campioni sono state stabilite sulla base di quanto riportato nella normativa europea EN 14015:2006 [5]. In particolare, ciascun campione è costituito da una piastra forata di spessore 5 mm che simula la parete del serbatoio ed un tubo di spessore 8,5 mm saldato all'interno del foro che simula la presenza di una tubazione uscente. Gli spessori sono stati scelti considerando il minimo valore riportato nella norma per serbatoi di diametro fino a 15 m. I materiali

utilizzati sono riportati in Tabella 1 mentre in Figura 1 si riportano le caratteristiche geometriche di ciascun campione.

	Tipo di acciaio	Tensione di snervamento (N/mm^2)
Piastra	S235 J0	235
Tubazione	P355N	355

Tabella 1: Proprietà meccaniche dei campioni

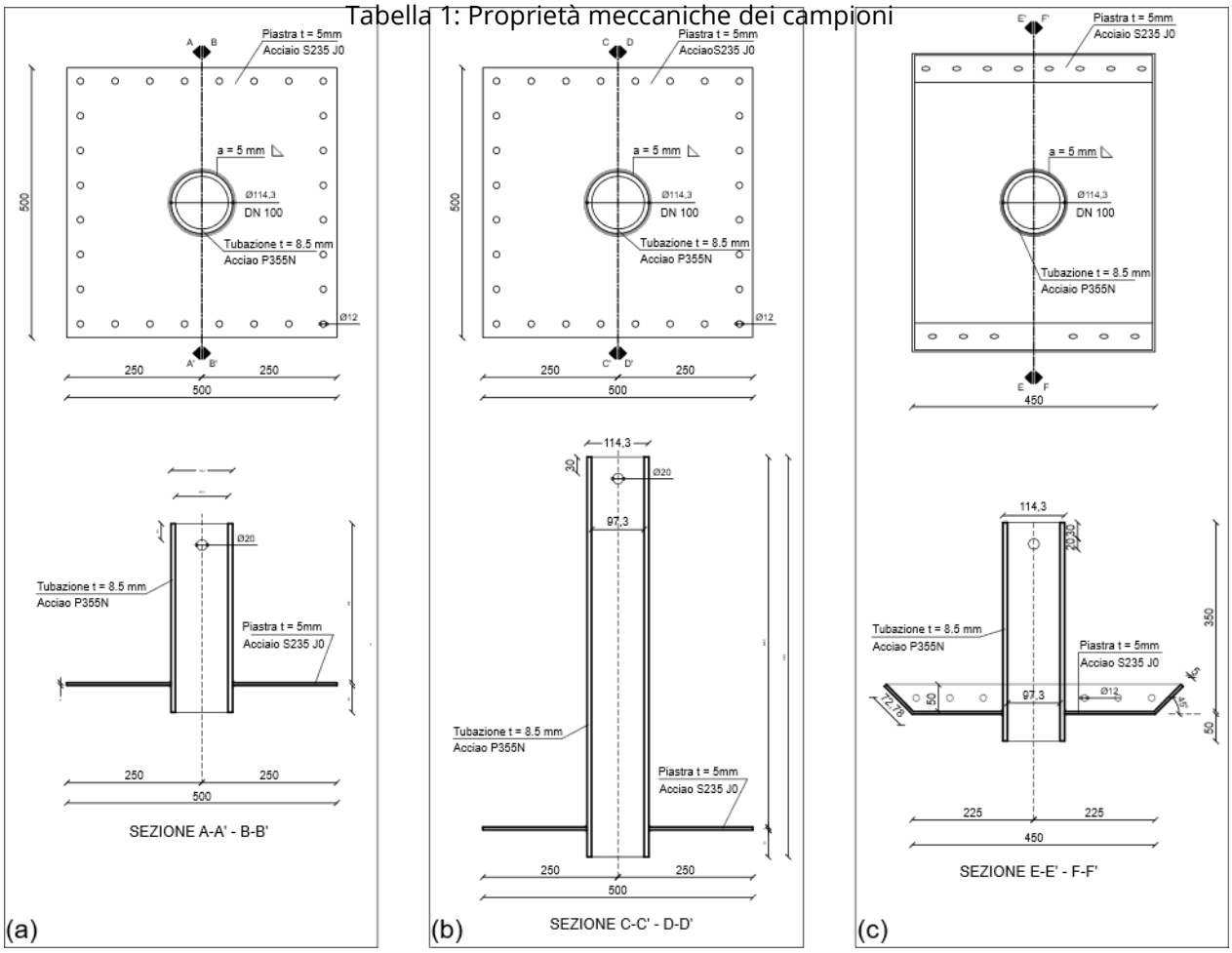


Figura 1. Caratteristiche geometriche del campione S1 (a), S2 (b) e S3 (c)

Per l'esecuzione dei test è stata utilizzata una macchina di prova universale che ha richiesto la realizzazione di specifici setup sperimentali per la corretta applicazione delle condizioni di vincolo e di carico. In Figura 2 sono riportati i tre setup di prova completi, da cui si evince che la macchina di prova presenta due ganasce per l'afferraggio superiore ed inferiore. Per questo motivo, è stato necessario progettare anche degli afferraggi superiori per agganciare il tubo alla ganascia superiore e dei supporti rigidi, su cui sono stati bullonati i campioni, dotati di afferraggi per la ganascia inferiore.

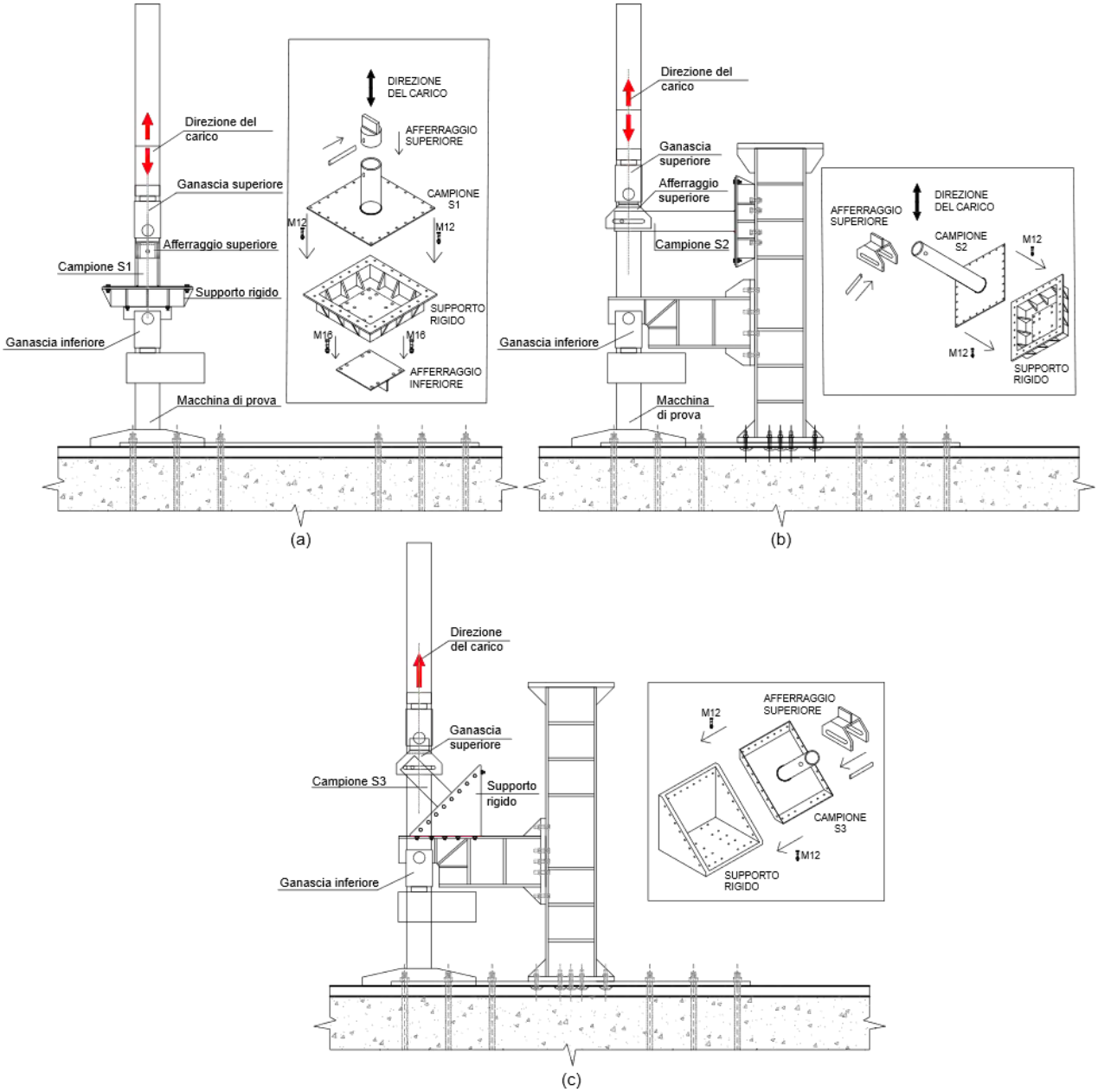


Figura 2. Setup di prova completo: S1 (a); S2 (b) e S3 (c)

Sono state eseguite una prova monotona e due prove cicliche sui campioni S1 ed S2, sottoposti rispettivamente ad un carico assiale e trasversale. Il campione S3, invece, inclinato di 45° per ottenere una combinazione delle due precedenti sollecitazioni, è stato sottoposto ad un'unica prova monotona. Nella Tabella 2 sono riassunte tutte le prove eseguite con i rispettivi ID assegnati a ciascun test.

Test ID	Campione	Tipo di prova	Condizione di carico
T1_M_1	S1	Monotona	Assiale
T1_C_1 – T1_C_2	S1	Ciclica	Assiale
T2_M_1	S2	Monotona	Trasversale
T2_C_1 - T2_C_2	S2	Ciclica	Trasversale
T3_M_1	S3	Monotona	Combinata 45°

Tabella 2. Prove sperimentali eseguite

3. Risultati delle prove sperimentali

Le tre prove monotone sui tre campioni sono state eseguite assumendo una velocità di carico pari a 2 mm/min. Nei tre test, è stato applicato un carico verso l'alto, il quale, applicato a ciascun setup di prova, ha generato tre diverse distribuzioni di sollecitazioni. Le direzioni di applicazione del carico sono riportate in Figura 3.

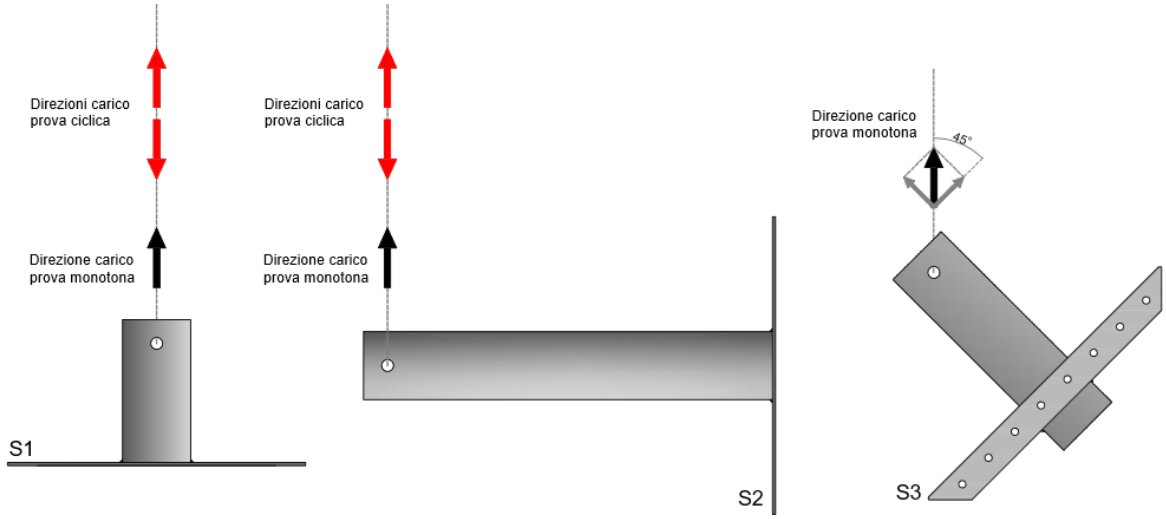


Figura 3. Direzioni di carico per le prove monotone e cicliche

I protocolli per la prova ciclica sono stati calibrati sulla base di quanto riportato dalla FEMA-461 [6], riguardante la determinazione di protocolli di prova per la determinazione delle caratteristiche sismiche dei componenti strutturali e non strutturali. Ciascuna storia di carico è costituita da diversi parametri, tra cui l'ampiezza massima di deformazione prevista Δ_m, il numero n di step contenuti e l'ampiezza a_i di ciascun ciclo. L'ultima ampiezza (a_n) corrisponde a quella massima stabilita Δ_m. Per ciascuno step, sono previsti due cicli alla stessa ampiezza. Lo spostamento target Δ_m è raggiunto tramite n step di due cicli ciascuno aventi ampiezza crescente. Al termine della prova, se il campione non ha raggiunto il livello di danno ipotizzato, l'ampiezza può essere ulteriormente aumentata con incrementi costanti di $0{,}3\Delta_m$.

3.1 Risultati campione S1

Il setup della prova monotona T1_M_1 sul campione S1 è raffigurato in Figura 4 (a), in cui la freccia rossa indica la direzione del carico applicato. In Figura 4 (b) è possibile osservare i risultati della prova in termini di curva forza-spostamento. Essa mostra un tratto iniziale elastico fino ad uno spostamento di circa 2-3 mm, seguito da un cambio di pendenza dovuto all'insorgere di deformazioni plastiche. La prova è stata interrotta al raggiungimento di un carico pari a 90 kN corrispondente alla capacità massima della macchina di prova, in corrispondenza del quale si è raggiunto uno spostamento verso l'alto di circa 18 mm. La configurazione deformata alla fine del test è raffigurata in Figura 4 (c) e presenta una deformazione simmetrica della piastra con uno spostamento massimo in corrispondenza della saldatura e nullo in corrispondenza dei bulloni esterni.

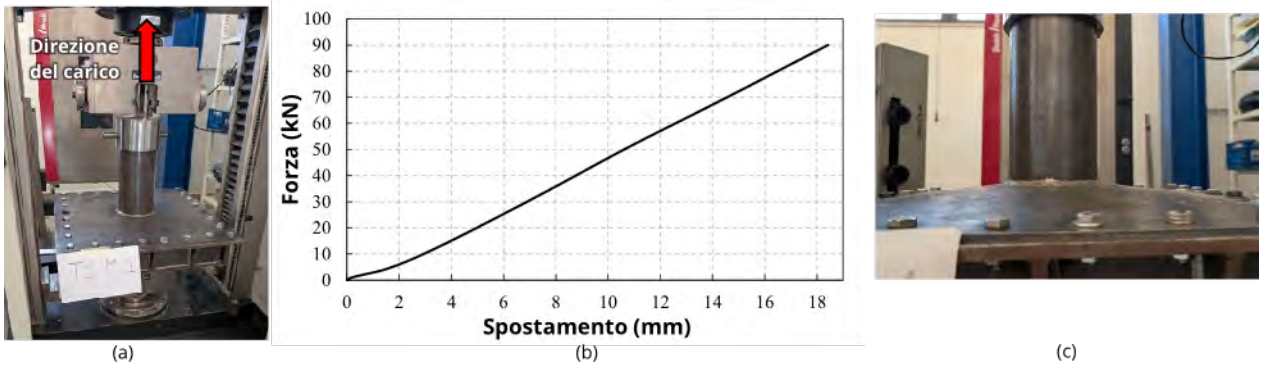


Figura 4. Prova monotona T1_M_1 su S1: setup di prova (a); curva forza-spostamento (b); configurazione deformata in corrispondenza di uno spostamento pari a 18 mm

Per la definizione del protocollo di prova per i test ciclici è stato scelto uno spostamento target Δ_m pari a 10 mm. Per raggiungere questa ampiezza, secondo quanto stabilito dalla FEMA 461, sono stati calibrati 10 step di due cicli ciascuno. Una volta raggiunto lo spostamento target è stato deciso di aggiungere ulteriori 3 step, incrementando le ampiezze di $0{,}3\Delta_m$, fino ad arrivare ad uno spostamento ultimo di 19 mm. La prima prova ciclica (T1_C_1) eseguita sul campione S1, i cui risultati in termini di legame isteretico forza-spostamento sono riportati in Figura 5(a) rapportati alla curva monotona, è stata interrotta in corrispondenza di uno spostamento pari a 10 mm a causa di un problema di disallineamento del campione. In Figura 5(b), invece, sono riportati i risultati della seconda prova ciclica T1_C_2. In questo caso, la prova è stata interrotta durante l'ultimo step a causa del raggiungimento del carico massimo imponibile dalla macchina di prova. L'andamento dei primi cicli rispecchia l'andamento della curva monotona, per spostamenti più ampi invece, i cicli sono divenuti più ampi a causa di una maggiore dissipazione di energia ed i loro picchi si trovano al di sotto della curva monotona a causa della perdita di resistenza dovuta a carichi ciclici. Si può notare inoltre un'asimmetria nei carichi raggiunti durante lo stesso ciclo in tensione ed in compressione. Per esempio, in corrispondenza di uno spostamento pari a 16 mm, si

raggiunge un carico di circa 70-75 kN in tensione e di 90 kN in compressione. Questa differenza è dovuta al contributo fornito dal supporto rigido in compressione, il cui bordo ha costituito un ulteriore vincolo quando il provino è stato soggetto ad uno spostamento verso il basso.

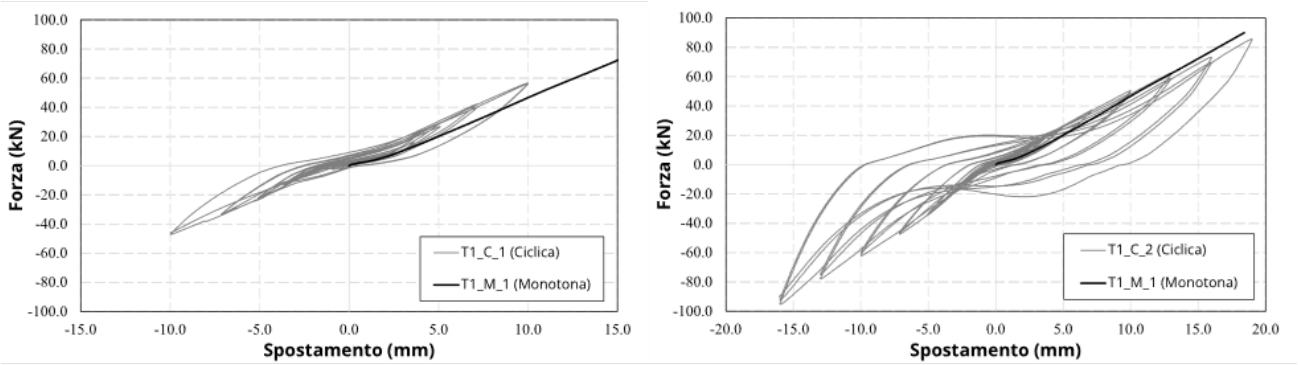


Figura 5. Curve isteretiche forza-spostamento di S1: T1_C_1 (a); T1_C_2 (b)

3.2 Risultati campione S2

La prova monotona sul campione S2, T2_M_1, è stata eseguita imponendo un carico verso l'alto, come riportato in Figura 6(a). La curva forza-spostamento, riportata in Figura 6(b), evidenzia la comparsa di un fenomeno di incrudimento in corrispondenza di uno spostamento pari a circa 60 mm, dovuto ad una perdita di ortogonalità tra l'asse longitudinale del tubo e la direzione del carico. La prova è stata terminata una volta raggiunto un carico di 10 kN in corrispondenza di uno spostamento pari a 100 mm. La configurazione deformata in corrispondenza dello spostamento ultimo è riportata in Figura 6(c); si può notare come la piastra si sia deformata verso l'esterno nella parte inferiore alla saldatura e verso l'interno nella parte superiore.

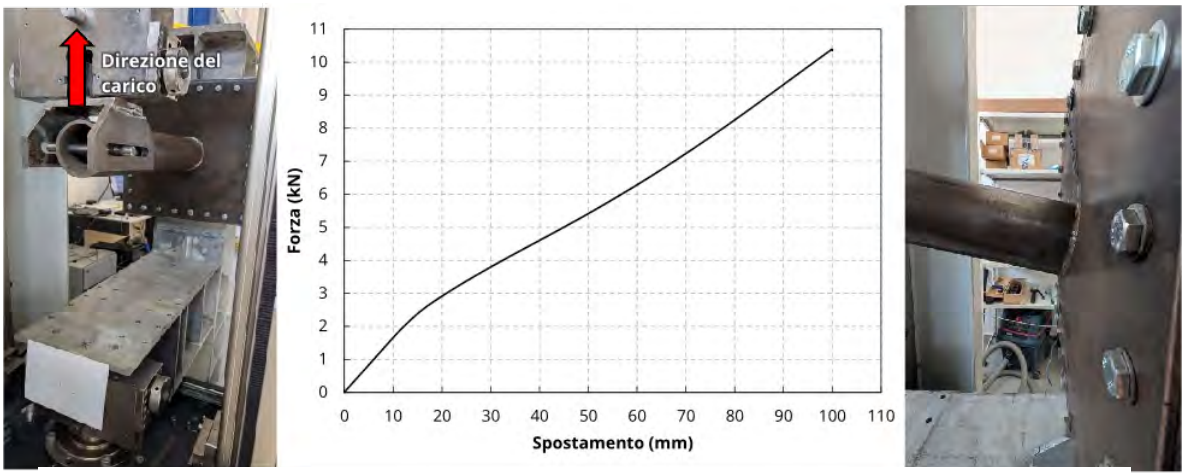


Figura 6. Prova monotona T2_M_1 su S2: setup di prova (a); curva forza-spostamento (b); configurazione deformata (c)

Per la calibrazione del protocollo di prova ciclica, è stato scelto uno spostamento target Δ_m pari a 20 mm, successivo all'insorgere del primo snervamento, da raggiungere attraverso dieci step di ampiezza crescente. Come per il caso precedente, sono stati aggiunti ulteriori dieci cicli ognuno incrementato di un'ampiezza pari a 0.3 Δ_m, fino ad arrivare ad uno spostamento finale di 80 mm.
I risultati dei due test ciclici condotti sul campione S2 sono riportati in Figura 7. La curva isteretica forza-spostamento della prima prova ciclica T2_C_1 (Figura 7(a)) ha mostrato un carico massimo in trazione pari a circa 6.2 kN ed in compressione pari a circa 6.3 kN. Durante la seconda prova T2_C_2 (Figura 7(b)), invece, il carico massimo raggiunto in tensione e compressione è stato pari a circa 6.5 kN e 6.1 KN, rispettivamente. Entrambe le curve sono state sovrapposte alla curva monotona, potendo notare in entrambi i casi una buona sovrapposizione fino ad un carico di 3 kN, dopo il quale si ha una perdita di resistenza dovuta all'applicazione del carico ciclico.

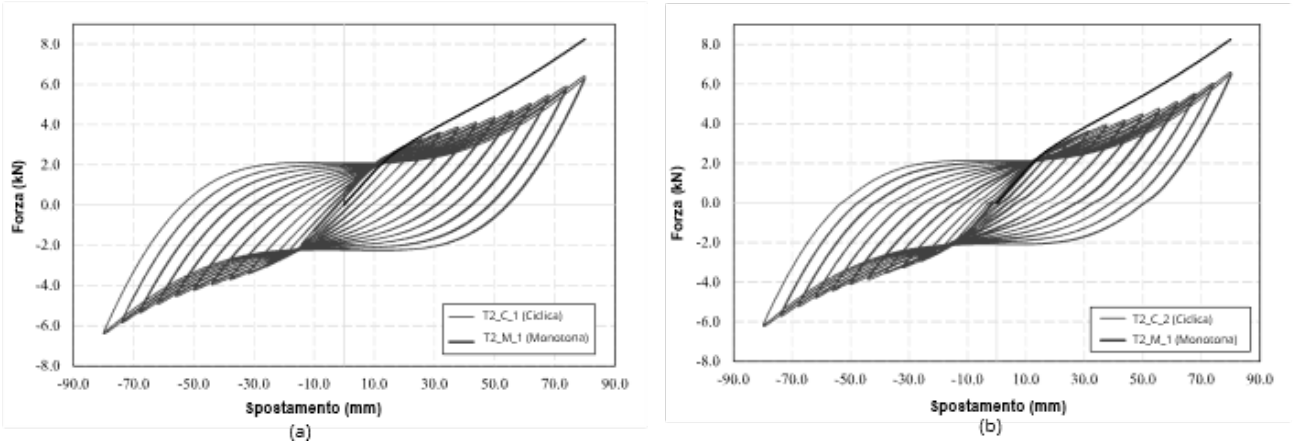


Figura 7. Curve isteretiche forza-spostamento di S2: T2_C_1 (a); T2_C_2 (b)

3.3 Risultati campione S3

Sul campione S3 è stata eseguita un'unica prova monotona, i cui risultati sono riportati di seguito. In Figura 8(a) è riportato il setup di prova con l'indicazione della direzione del carico applicato. La curva forza-spostamento riportata in Figura 8(b) non ha mostrato un carico di picco a causa del raggiungimento della capacità massima della macchina di prova. La variazione della pendenza, in corrispondenza di un carico di circa 27 kN, indica il verificarsi di fenomeni di instabilità locale. I meccanismi di resistenza di secondo ordine sono stati responsabili dell'effetto di incrudimento osservato nella seconda parte della curva. La Figura 8(c) mostra la configurazione deformata alla fine della prova, con uno spostamento verso l'alto di circa 67 mm e un carico corrispondente di circa 80 kN.

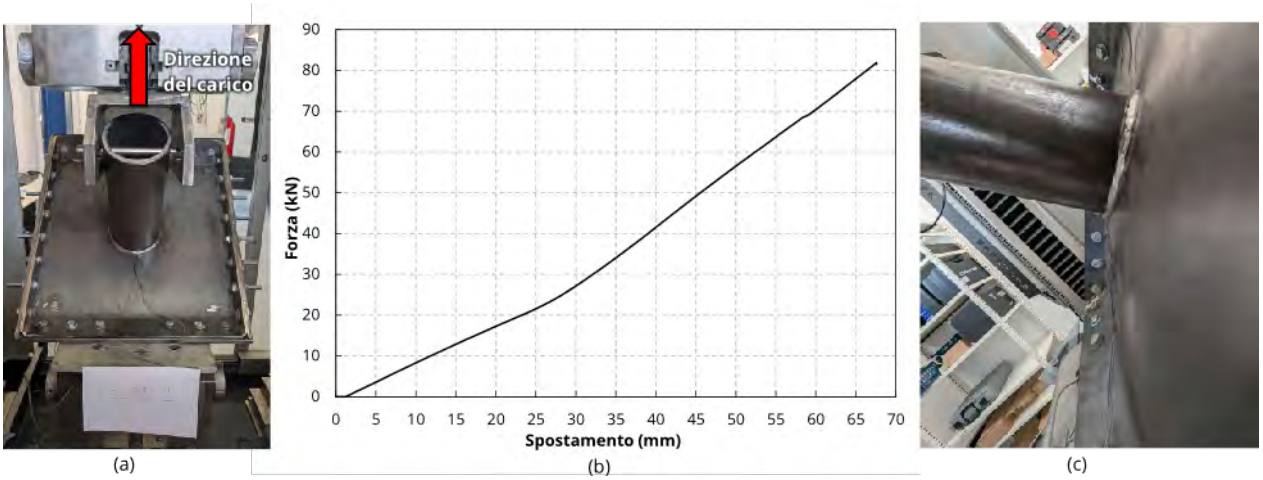


Figura 8. Prova monotona T3_M_1 su S3: setup di prova (a); curva forza-spostamento (b); configurazione deformata (c)

4. Conclusioni

Le connessioni serbatoio-tubazione rappresentano uno degli elementi non strutturali maggiormente vulnerabili all'azione sismica negli impianti industriali, a causa della differenza di massa e rigidezza tra i due elementi collegati che generano diversi comportamenti sotto l'azione sismica. In questo studio sono stati illustrati i risultati di prove quasi-statiche monotone e cicliche condotte su questo tipo di connessioni. I risultati ottenuti dalle prove condotte evidenziano prestazioni soddisfacenti sia sotto carichi assiali che trasversali; tuttavia, il massimo carico raggiunto durante le prove in cui il carico è applicato in direzione trasversale risulta significativamente inferiore a quello registrato nelle prove con applicazione del carico assiale. I risultati ottenuti saranno fondamentali per la calibrazione di modelli numerici utili lo studio delle performance di layout complessi e per la definizione di dettagli costruttivi rivolti alla mitigazione della vulnerabilità sismica.

Bibliografia

[1] Campedel, M. Analysis of major industrial accidents triggered by natural events reported in the principal available chemical accident databases. JRC Scientific and Technical Reports, 2008

[2] EU, Directive 2012/18/EU on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. Offic. J. Eur. Union L 197/1

[3] Italian Legislative Decree of 2015/06/26 n. 105: Implementation of the Directive 2018/18/EU

[4] Marino A, Ciucci M, Barbieri Vita L, Palermo O, Quinci G. Valutazione e gestione del rischio sismico negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante. Atti della Conferenza su *XVIII Convegno Anidis*. *Ascoli Piceno, 15-19 Settembre*.

[5] EN 14015:2006. Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above-ground welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above.
[6] FEMA 461:2007. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Characteristics of Structural and Nonstructural Components.

Sistemi a pilotaggio remoto per il miglioramento delle condizioni di sicurezza e la gestione dell'emergenza NaTech negli impianti PIR

A. Marino[1], M. Ciucci[1]

[1]Inail - Dit

Sommario
La gestione della sicurezza e dell'emergenza negli Stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante soggetti al D.Lgs. 105/2015 richiede, in relazione alla complessità intrinseca che li caratterizza, un approccio multidisciplinare e strutturato. Un aspetto caratterizzante dei grandi impianti industriali è proprio la diffusa presenza di spazi interni confinati, semi-confinati o comunque complessi che possono costituire un'importante fonte di incidenti e infortuni, anche piuttosto gravi sia in fase di esercizio che di gestione di emergenze. In particolare, l'impatto di un disastro naturale su un impianto di stoccaggio o lavorazione di sostanze pericolose può provocarne il rilascio con possibili gravi conseguenze al di fuori del sito attraverso scenari di rilascio di sostanze tossiche, incendi o esplosioni. In questo articolo viene proposta e valutata l'utilizzazione di droni (Sistemi A Pilotaggio Remoto) per la gestione "sicura" delle attività in ambienti complessi che consente di limitare l'intervento diretto di operatori che altrimenti potrebbero essere esposti a sostanze pericolose o a situazioni di rischio, fornendo allo stesso tempo informazioni real-time sulle condizioni all'interno degli ambienti e sulle potenziali situazioni di rischio. Consentendo l'ispezione visiva remota in qualsiasi ambiente interno complesso e spazi confinati, il drone evita la necessità per i lavoratori di entrare in luoghi pericolosi o affrontare situazioni rischiose evitando allo stesso tempo il rischio di collisioni e infortuni.

1. Introduzione
Un impianto o stabilimento con Pericolo di Incidente Rilevante (soggetto al d.lgs. 105/2015) è un sito industriale che, a causa della presenza di specifiche sostanze pericolose in quantità superiori a determinati limiti, può causare gravi incendi, esplosioni o rilascio di sostanze tossiche con danni per l'uomo e l'ambiente. La stessa direttiva definisce un incidente rilevante come: " Evento grave (emissione, incendio, esplosione) causato da sviluppi incontrollati, che provoca un pericolo grave, immediato o differito per la salute umana o l'ambiente, sia all'interno che all'esterno dello stabilimento, a seguito del rilascio di una o più sostanze pericolose". Recenti grandi disastri naturali hanno evidenziato l'emergere di un nuovo tipo di rischio che si manifesta quando il mondo naturale e quello tecnologico si scontrano. L'impatto di un disastro naturale su un impianto di stoccaggio o lavorazione di sostanze pericolose può provocare il rilascio di sostanze pericolose con possibili gravi

conseguenze al di fuori del sito attraverso scenari di rilascio di sostanze tossiche, incendi o esplosioni. Gli incidenti causati da un disastro naturale che provoca il rilascio di sostanze pericolose sono comunemente definiti eventi NaTech (Natural hazards triggering Technological disasters). Nonostante normative più severe per la progettazione e l'esercizio delle attività industriali, gli incidenti NaTech rimangono una minaccia. Il d.lgs.105/2015, sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose, riconosce l'importanza di NATECH. Per quanto riguarda l'identificazione e i metodi di prevenzione dei rischi accidentali, è richiesta una descrizione dettagliata dei possibili scenari di incidente rilevante e della loro probabilità o delle condizioni in cui si verificano, compresa una sintesi degli eventi. che possono svolgere un ruolo nell'innescare ciascuno di questi scenari, le cui cause sono interne o esterne allo stabilimento; tra cui, in particolare: cause naturali, ad esempio terremoti o inondazioni. È anche evidente, a causa dell'impatto del NaTech sugli scenari incidentali, la rilevanza del problema nell'informazione al pubblico; nella valutazione dell'effetto domino e nella pianificazione territoriale e nella gestione delle emergenze. La gestione del rischio NaTech, e in particolare la gestione delle emergenze, deve basarsi sulla disponibilità di dati affidabili e di informazioni tempestive. L'obiettivo di questa ricerca è quello di proporre e valutare l'applicazione degli UAS per la sicurezza in esercizio, la gestione dell'emergenza incidentale NaTech e la valutazione delle conseguenze (valutazione dei danni). Sebbene l'uso di UAV per l'ispezione visiva degli impianti industriali sia un approccio diffuso, c'è ancora bisogno di ricerca sull'applicazione di questi strumenti nella gestione degli incidenti che si sviluppano in ambienti industriali complessi, confinati e semiconfinati. La proposta prevede l'utilizzo di UAS (Unmanned Aerial System), dotati di opportuni sensori, per volare. L'utilizzo di questi mezzi consente di ridurre drasticamente il rischio ascrivibile all'impiego di operatori umani durante il campionamento, il monitoraggio e la gestione degli eventi di emergenza in corso. Questo approccio fornisce informazioni affidabili e puntuali sull'evento in corso, evitando per quanto possibile perdite umane o lesioni.

2. Rischio NaTech

Il rischio industriale, dal punto di vista della classificazione del rischio, può essere considerato come parte dell'ampia categoria dei pericoli di origine antropica. I pericoli antropici, con alcune variazioni a seconda delle diverse classificazioni, comprendono: i pericoli tecnologici, il rischio nucleare, il rischio dei trasporti e altre attività antropiche come la gestione delle infrastrutture e delle reti tecnologiche, che possono essere fonte di pericolo per l'uomo e l'ambiente; Nella prospettiva dei pericoli antropici il rischio ambientale è correlato alla probabilità di un evento causato da alterazioni inattese di parametri fisici e chimici nell'ambiente (acqua, aria e/o suolo), che abbiano effetti immediati, a breve o a lungo termine sulla salute della popolazione e dei lavoratori. Un'altra definizione, utilizzata nei documenti tecnici, evidenzia la differenza tra "disastro causato dall'uomo" che è causato direttamente dalle attività umane e

"disastro indotto dall'uomo", disastro naturale che è accelerato/aggravato dall'influenza umana. In questo quadro eterogeneo di pericoli, rischi ed eventi, è noto che alcuni incidenti industriali significativi sono causati o innescati da calamità naturali. Nella letteratura internazionale, questo tipo di incidente è definito come NaTech o evento "Naturale-Tecnologico". Una delle definizioni NaTech recita così: "Incidenti tecnologici, come incendi, esplosioni e rilasci tossici che possono verificarsi nei complessi industriali e lungo la rete di distribuzione a seguito di calamità naturali di matrice naturale".

3. Gestione del rischio NaTech e gestione delle emergenze

La gestione del rischio è un'attività complessa che richiede un approccio multidisciplinare. Il NaTech Risk Management può essere suddiviso in varie fasi: prevenzione e preparazione (prima che la catastrofe colpisca); risposta e mitigazione (durante l'evento); valutazione delle conseguenze e dei danni (il prima possibile dopo l'evento); recupero e ricostruzione (che si verificano dopo il disastro). La fase di prevenzione consiste in tutte le azioni necessarie per ridurre l'impatto di futuri disastri. Può essere suddiviso in misure strutturali (soluzioni tecniche e strutturali) e non strutturali, come la pianificazione territoriale e la pianificazione dell'emergenza. La fase di preparazione comprende le azioni intraprese per ridurre gli impatti quando il disastro è previsto (se possibile) o imminente. La risposta e la mitigazione riguardano le azioni intraprese durante e immediatamente dopo il disastro, con l'obiettivo principale di salvare e salvaguardare vite umane e evitare danni ambientali. Con il termine recupero si intende il processo di ripristino dei servizi e di riparazione dei danni dopo che il disastro ha colpito che segue ovviamente la fase di valutazione delle conseguenze e di valutazione dei danni. La gestione dell'emergenza richiede che le condizioni locali e le caratteristiche geografiche del luogo siano adeguatamente considerate, soprattutto in termini di pericolosità. Inoltre, gli eventi critici sono spesso caratterizzati da rapide dinamiche evolutive, con scenari che spesso possono cambiare in modo significativo in tempi brevissimi. Pertanto, una migliore gestione delle emergenze passa necessariamente attraverso la qualità e la quantità delle osservazioni e delle informazioni, nonché la velocità con cui le informazioni possono essere trasferite e rese chiare e fruibili dai decisori.

Uno dei principali problemi degli incidenti NaTech è il verificarsi simultaneo di un disastro naturale e di un incidente tecnologico, che richiedono entrambi sforzi di risposta simultanei in una situazione in cui è probabile che le infrastrutture e i sistemi di mitigazione necessari per la risposta ai disastri non siano disponibili, in quanto potrebbero essere stati danneggiati dal disastro naturale. Inoltre, i rilasci di sostanze pericolose possono essere provocati da una o più fonti in un impianto o contemporaneamente da più impianti critici nell'area di impatto del disastro naturale, il che richiede il dirottamento delle risorse di gestione delle emergenze occupate a rispondere al disastro naturale in un territorio spesso molto vasto.

4. Metodologia

La possibilità di monitorare da remoto un evento incidentale dimostra il potenziale dei sistemi aerei. La strumentazione di bordo permette inoltre di georeferenziare con precisione decimale il punto visualizzato per mostrare l'incidente rilevante istante per istante. La visione continua, ad esempio, di un incendio con una termocamera consente di analizzarne il movimento nel tempo. Pertanto, il possibile sviluppo futuro dell'incendio può essere previsto e contenuto. Un controllo simile può essere sviluppato durante gli incidenti che coinvolgono vari impianti in uno stabilimento, per prevedere i possibili effetti domino che possono verificarsi. L'individuazione delle zone più calde dell'apparecchiatura, che possono essere coinvolte in un incendio, consente di utilizzare manovre preventive, quali meccanismi di raffreddamento dell'area interessata, ove presenti. La gamma di sensori installabili a bordo del drone comprende anche rilevatori di gas. Questo permette di identificare la concentrazione di quello specifico gas in un punto dello spazio che, grazie al sistema di localizzazione di bordo, è georeferenziato.

5. Monitoraggio con UAS

La proposta utilizza SAPR (Sistemi A Pilotaggio Remoto), dotati di opportuni sensori, per volare nell'area degli impianti e per dare la possibilità di gestire incidenti rilevanti e identificare le aree di rilascio. La comunicazione continua dei dati raccolti e la loro rielaborazione presso la stazione di controllo a terra consentono di intraprendere azioni specifiche e mirate per ridurre o addirittura annullare gli effetti secondari indesiderati. L'utilizzo di questi mezzi consente di eliminare il rischio ascrivibile all'impiego di operatori umani sia in fase di campionamento per evidenziare anomalie sia per gestire eventi emergenziali in corso. Anche se gli operatori sono in possesso di sistemi di allarme indossabili, il rischio è comunque molto elevato. La caratteristica principale è la possibilità di monitorare regolarmente le aree interessate, che sono a maggior rischio senza entrare in contatto con le sostanze oggetto di analisi. Questo utilizzo consente di identificare eventi (rilasci) che potrebbero non essere identificati dai normali sistemi di monitoraggio e, soprattutto, consente di intervenire rapidamente prima che la diffusione delle sostanze provochi danni maggiori e imprevedibili. La capacità del veicolo di volare all'interno e all'esterno degli edifici consente di analizzare in dettaglio l'entità del rilascio.
Il ritardo nell'identificazione dell'evento può causare la diffusione della sostanza pericolosa e aumentare l'area del danno.



Figura 1. Mini droni dotati di gabbia protettiva



Figura 2. Drone collision tolerant

6. Approccio alla gestione delle emergenze

La gestione dell'emergenza dovrebbe seguire una procedura strutturata: subito dopo l'incidente NaTech, uno "sciame" di mini-droni programmabili dotati di telecamere HD dovrebbe accedere all'area dell'incidente grave al fine di fornire una prima valutazione visiva in tempo reale della situazione. Dopo la prima valutazione dovrebbero intervenire due diversi tipi di droni: Nelle aree interne, confinate e semiconfinate, il drone deve essere ”collision tolerant” per un'accessibilità sicura agli spazi confinati e caratterizzato da carico utile antiurto, stabilizzazione senza GPS, blocco della distanza, streaming live Full HD di videocamera e videocamera termica, illuminazione obliqua regolabile, antipolvere. Questo drone potrebbe eventualmente essere dotato di un sensore specifico per identificare le perdite di sostanze pericolose. In altre aree all'aperto ma strutturalmente complesse, il drone dovrebbe essere specificamente dedicato a missioni critiche con tempo di volo prolungato e dotato di rilevamento degli ostacoli che fornisce immagini visibili e termiche in tempo reale di siti, strutture e infrastrutture specifiche e, infine, dell'intera area.

7. Applicazioni

7.1. *Gestione delle emergenze NaTech*

Sono state identificate alcune delle principali applicazioni degli UAS alla gestione dell'emergenza Incidenti NaTech:

- ricerca di sopravvissuti;
- rilevamento e monitoraggio di esplosioni e incendi;
- rilevamento e monitoraggio dei rilasci di sostanze tossiche e/o infiammabili nell'aria.

I sensori necessari per identificare le persone tra i detriti sono le videocamere nel visibile e termiche. L'analisi dello spettro visibile aiuta ad individuare l'eventuale presenza di movimento da parte di creature viventi con visione diretta. L'utilizzo di termocamera, invece, permette di individuare eventuali anomalie termiche che possono individuare persone intrappolate sotto le macerie. La procedura prevede il volo del drone con una registrazione sia nello spettro visibile che in quello termico al fine di condurre un primo sopralluogo, rapido, in loco. L'area può essere così indagata e analizzata in sicurezza per identificare la possibile posizione di eventuali persone scomparse.

Per quanto riguarda il rilevamento e il monitoraggio di esplosioni e incendi, il payload UAS sarà costituito da una videocamera termica affiancata da una videocamera nel visibile, per fornire una visione delle temperature nelle aree adiacenti all'incendio (essenziale per l'identificazione di possibili effetti domino) e fornire una ripresa visiva fianco a fianco della stessa area. I dati misurati vengono registrati e inviati all'operatore, che analizza in tempo reale i dati monitorati dal sistema. Il software da abbinare a questo hardware consente un'identificazione dello sviluppo man mano che l'evento si svolge, per consentire un successivo intervento mirato. Il volo è centrato sull'area di interesse in modo da “fotografare” l'area coinvolta nell'incendio il più vicino possibile. L'immagine visibile permette immediatamente di monitorare le apparecchiature coinvolte dall'evento, insieme alle apparecchiature che possono essere coinvolte in un effetto domino. Grazie alla vista dalla termocamera, lo studio della temperatura superficiale delle attrezzature coinvolte nell'incendio e la conoscenza dei materiali consentono di calcolare il tempo che trascorrerà prima del collasso strutturale delle apparecchiature. Il software di gestione in questo caso individua la conformazione delle fiamme che, sovrapposta ad una mappa dell'impianto, permette di identificare le apparecchiature adiacenti a rischio. La visione con termocamera permette di identificare la temperatura degli hotspot dell'apparecchiatura e, grazie ad algoritmi strutturali, di determinare il tempo necessario per collassare.

Infine, per quanto riguarda il rilascio di sostanze tossiche/infiammabili nell'aria, il drone permetterà di avvicinarsi ai punti di rilascio all'interno degli impianti. I sensori a bordo: videocamera di visione, videocamera termica e rilevatori di gas o nasi elettronici, consentiranno di identificare le sostanze e la concentrazione presenti in

quello spazio. Nella maggior parte dei casi, la concentrazione della nube è tale da non permettere di vedere il gas (a meno che il gas non sia colorato), rendendo difficile l'identificazione visiva. Durante il volo, i dati registrati dalla termocamera, dalla videocamera di visione e dai rilevatori verranno trasmessi allo schermo del GCS (Ground Control System) per consentire una rapida identificazione da parte dell'operatore.

7.2. *Valutazione delle conseguenze*

Un SAPR può essere utilizzato per la valutazione delle conseguenze e dei danni per l'ambiente e per le strutture.

Un volo realizzato dopo l'evento consente una valutazione immediata delle conseguenze e dei danni nell'area dello stabilimento. Nello stesso tempo l'utilizzazione del drone all'interno dello stabilimento impianto fornisce informazioni anche estremamente dettagliate sui danni alle attrezzature e agli impianti.

L'utilizzo di un drone con i suoi specifici sensori consente di monitorare la diffusione di sostanze pericolose nell'ambiente sia nei corpi idrici che attraverso la valutazione delle interazioni tra le sostanze pericolose e la vegetazione attraverso la stima del livello di stress della vegetazione.

8. Conclusioni

La soluzione proposta consentirà di coprire un gran numero di situazioni di esercizio e di emergenza, in cui vi è un rischio considerevole per la salute umana e per l'ambiente circostante. Questi sistemi consentono di ottenere informazioni real-time estremamente accurate anche in ambienti complessi e in situazioni di pericolo in cui la salute degli operatori sarebbe esposta a rischi gravi. L'applicazione di SAPR può quindi essere uno strumento efficace per la risposta e la gestione degli eventi NaTech riducendo al minimo il rischio per gli operatori. Questa metodologia può rappresentare un approccio efficace per il miglioramento delle condizioni di sicurezza in esercizio, per la gestione dell'emergenza e la valutazione delle conseguenze nelle attività produttive.

Bibliografia

[1] O'Reilly G. J., Ciucci M., Marino A. Risk-aware navigation in industrial plants at risk of NaTech accidents. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023, Volume 88,1 April 2023, 103620.

[2] Marino A., Ciucci M. UAV for "safe" NaTech disasters management and consequences evaluation in Major Hazard industrial plants. Proceedings of the 35th European Safety and Reliability & the 33rd Society for Risk Analysis ESREL Europe Conference, Stavanger (Norway) 15-19/06/2025. doi: 10.3850/978-981-94-3281-3_ESREL-SRA-E2025-P0516-cd

[3] Marino A., Ciucci M. Smart Technologies and UAS for integrated risk and emergency management of NaTech events in Major Hazard establishments".

Proceedings Natech Symposium 2024 Enhancing the Resilience of Critical Energy Infrastructure against Natural Hazards Trondheim, Norvegia 30/06/2024-02/07/2024.

[4] Ciucci, M., Marino, A., Paolacci, F., Bursi O.S., (2019), Integrated smart seismic risks management (2019) American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division PVP, ASME PVP 2019 Conference, Vol. 8, DOI: 10.1115/PVP2019-94027

[5] Directive 2012/18/EU (2015) concerning the control of the danger of major incidents connected to hazardous substances.

[6] Di Franco S., Salvatori R. (2015). Current situation and needs in man-made and natech risks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment I*, 72-84

[7] Giovani M., Ramalli G., Manning N. C., Manneschi M., (2017). Monitoring with drones during a major emergency. *AES Bioflux 9(1)*, 45-55.

[8] Marino, A., Ciucci, M., Paolacci, F., (2017), Smart technologies for integrated natural risk management: Innovative methodologies and remote sensing (2017) American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division PVP, ASME PVP 2018 Conference, Vol. 8, DOI:10.1115/PVP2017-66198

[9] Ricci F., Yang M., Reniers G., Cozzani V., 2022, The Role of Emergency Response in Risk Management of Cascading Events Caused by Natech Accidents, Chemical Engineering Transactions, 91, 361-366.

Approccio multidisciplinare per la gestione degli eventi NaTech: interazione tra analisi della risposta sismica locale e serbatoi di stoccaggio in acciaio.

A. Marino[1], G. Berardo[2]
[1]Inail - Dit
[2]RINA Consulting S.p.A

Sommario
Gli incidenti industriali innescati da eventi naturali sono definiti come eventi NaTech. Questi processi derivano dall'interazione tra pericoli naturali e sistemi industriali e possono causare danni simultanei a più componenti, portando a rilasci incontrollati di sostanze pericolose. Questo studio indaga le interazioni tra pericolosità sismica e vulnerabilità tecnologica in uno stabilimento con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR) soggetto al d.lgs. 105/2015. La metodologia adottata distingue la valutazione dei pericoli naturali da quella tecnologica prima di integrarla in un quadro di rischio NaTech. L'analisi è stata applicata ad una selezionata Area di Interesse a elevata pericolosità sismica, dove sono attesi fenomeni di amplificazione dovuti alle condizioni geologiche locali. È stato sviluppato un modello geologico di riferimento attraverso un geodatabase integrato, costruito a partire da una raccolta completa di dati geotecnici, ulteriormente vincolati dalle indagini geofisiche. Una volta convalidato, il modello è servito come base per le analisi di risposta sismica locale eseguite lungo una sezione trasversale geologica rappresentativa. Inoltre, è stato compilato un inventario dettagliato dei serbatoi di stoccaggio, comprese le proprietà fisico-chimiche, costruendo un database tecnologico parallelo e combinato. Di conseguenza, lo studio esplora il modo in cui il movimento del suolo sito-specifico interagisce con i serbatoi di stoccaggio, influenzando la loro risposta dinamica e i fattori di amplificazione. A differenza degli approcci convenzionali, questo quadro sottolinea l'importanza della risposta sismica locale per prevenire lo sviluppo scenari incidentali.

1. Introduzione e stato dell’arte

Gli incidenti industriali innescati da eventi naturali sono noti come eventi NaTech (Natural Hazards Triggering Technological Disasters) e nella letteratura internazionale sono identificati come incidenti tecnologici, che possono causare danni simultanei, provocando molteplici rilasci di sostanze pericolose con la propagazione in effetti domino. Dal 2015 è in vigore la cosiddetta Seveso III, Direttiva 2012/18/UE, i cui principali obiettivi sono prevenire i rischi negli impianti con pericolo di incidente rilevante (PIR) che coinvolgono sostanze pericolose e limitarne le conseguenze per la salute umana e l'ambiente. La direttiva prevede la predisposizione di un Rapporto di Sicurezza (RdS) che deve tenere conto anche dei requisiti specificati nel NTC 2018 e nella Circolare Applicativa del 21/01/2019, per

qualsiasi impianto che produce o immagazzina grandi quantità di sostanze chimiche. L'analisi del rischio deve considerare tutti gli scenari di incidente attesi derivanti dall'interazione pericolo-evento-struttura-elementi critici che può generare un incidente rilevante. Gli approcci più comuni nella letteratura sulla mitigazione del rischio (ad esempio, HAZOP, FTA, ETA) permettono il percorso tra l'identificazione dell'evento, la successiva analisi del rischio e, infine, l'analisi delle conseguenze, attraverso tecniche e collegamenti appropriati. La valutazione del rischio NaTech identifica sequenze incidentali innescate da terremoti, poiché possono aumentare la frequenza di eventi accidentali associati a elementi critici e estendere le aree di danno. Le conseguenze devono essere adeguatamente considerate sia per gli aspetti strutturali, principalmente legati alla stabilità strutturale degli edifici e al contenimento di sostanze pericolose nell'impianto, sia per gli aspetti non strutturali, come il guasto di dispositivi di sicurezza o componenti critici. Il terremoto colpisce l'intera struttura contemporaneamente e può causare il crollo della struttura come conseguenza diretta dell'attività sismica, causando vari livelli di danno che possono condurre alla perdita del contenimento.

2. Caso di studio

Il caso di studio selezionato è uno stabilimento chimico, identificato come PIR di soglia superiore localizzato nell'Appennino Centrale. Questa area è caratterizzata da un alto rischio sismico, anche in relazione al ruolo della vicinanza alle strutture tettoniche primarie degli Appennini Centrali, come l'Unità Gran Sasso a nord e l'Unità Morrone. Inoltre, la morfologia e l'ambiente geologico del sito possono causare fenomeni di amplificazione sismica in presenza di depositi alluvionali con spessore superiore ai 50 m su substrato roccioso rigido, e di geometria sepolta dei sedimenti tipica di una valle stretta. Il complesso industriale copre un'area di circa 2 km^2 e comprende diverse unità produttive. L'analisi si concentra sugli impianti EURECO, impiegati per la sintesi dell'acido ftalimido perossicaproico (PAP). Questo composto è prodotto attraverso l'interazione sintetica tra anidride ftalica e caprolattamico, seguita dalla perossidazione con perossido di idrogeno dell'intermedio risultante.

3. Metodologia

La valutazione del rischio sismico svolge un ruolo chiave nell'identificazione di potenziali incidenti NaTech. Questo studio mira a indagare la risposta locale stocastica - 2D 1D attraverso un modello ingegneristico-geologico 3D ad alta risoluzione del sottosuolo utilizzando dati di input sismico (time history) derivato dall'analisi probabilistica del rischio sismico PSHA. Avere una conoscenza della geometria della valle del sito e delle unità litologiche coinvolte permette di valutare l'amplificazione sismica. L'approccio mira ad avere una buona conoscenza della geometria della valle per comprendere come un evento sismico possa innescare un evento NaTech e produrre effetti domino nell'impianto industriale.

La metodologia proposta contribuisce a rivalutare la frequenza di accadimento, modificando gli scenari di incidenti già previsti e indicando nuovi scenari che potrebbero verificarsi durante un terremoto. Questo approccio implica l'aggiornamento dell'analisi del rischio, ad esempio attraverso HAZOP o Analisi degli Alberi dei Guasti. Ad esempio, l'occorrenza di un terremoto può essere collegata a una LOC (perdita di contenimento) involontaria dal serbatoio di stoccaggio, quindi è necessario rivalutare la frequenza di accadimento. Vari elementi, come reattori, condotte e serbatoi di accumulo, hanno frequenze fondamentali di vibrazione differenti e vengono sottoposti a sollecitazioni in modi diversi a causa delle frequenze sismiche.

3.1 Modellizzazione geologica di riferimento

E' stato implementato un geodatabase completo per memorizzare informazioni provenienti da bibliografia e sondaggi del sito, comprendendo dettagli come posizione, profondità totale, litologia, falda acquifera e stratigrafia. Un totale di 125 sondaggi è stato incorporato nel geodatabase. Altri log stratigrafici, chiamati anche "sondaggi virtuali", sono stati estratti da sei sezioni trasversali geologiche (tre longitudinali e tre trasversali alla valle), fornendo un modello geologico preliminare. Lungo le sezioni trasversali, le informazioni litostratigrafiche venivano estratte attraverso i sondaggi virtuali, dove mancavano quelli reali, stabilendo una densa griglia irregolare (Fig. 1). Questo approccio strategico consente di validare lo spessore e la continuità di tutte le unità stratigrafiche, dalle sezioni geologiche, dalle mappe geologiche e dalle informazioni bibliografiche. I dati del progetto sono stati georeferenziati integrando coordinate geospaziali con le relative informazioni sui sondaggi, per condurre analisi spaziali avanzate e modellizzazione. Questo approccio ci ha permesso di integrare e combinare dati oggettivi con dati virtuali, fondendo litologie attraverso interpretazioni esperte. Sono stati estrapolati molteplici sondaggi virtuali dalle sezioni geologiche lungo questa struttura, al fine di riprodurre accuratamente le caratteristiche geologiche e geometriche del sito. Durante il processo di implementazione, è stato attribuito maggiore peso ai dati provenienti dai veri sondaggi rispetto a quelli virtuali, tenuto conto che le informazioni provenienti da questi ultimi sono state estrapolate dalle sezioni geologiche.

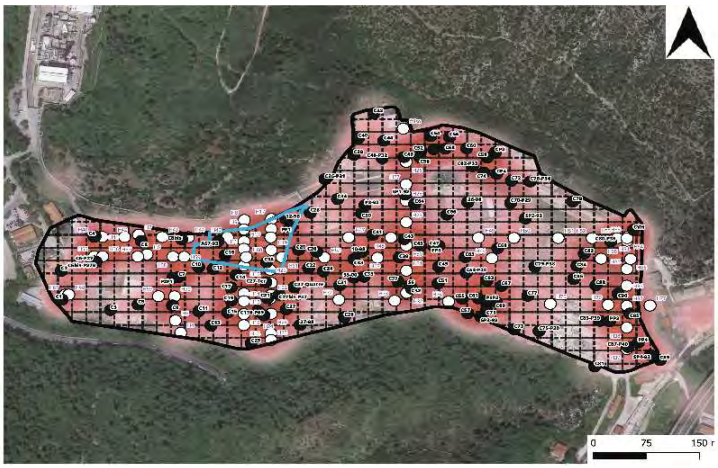


Figura 1. Distribuzione dei sondaggi virtuali (bianchi) e reali (neri) L'impianto EURECO è evidenziato con una linea blu.

3.2 Caratterizzazione fisica e dinamica dei suoli

Le proprietà del suolo sono parametri naturali e variano da sito a sito, determinando un ruolo significativo nelle analisi e nei progetti geotecnici e, di conseguenza, nella simulazione di scenari sismici. Le proprietà del sito per ciascun tipo di suolo sono state raccolte da una revisione della letteratura pertinente e da studi sulla Microzonazione Sismica di aree geologicamente compatibili, disponibili al link web: 10.5281/zenodo.813497927. Da questi studi sono state ricavate le proprietà fisiche (ad esempio, g, Vs) e dinamiche (ad esempio, modulo di taglio G/G0, smorzamento D) per ciascun tipo di suolo.

E' stato assegnato il codice del suolo a ciascuna unità geologica, classificato secondo l'Unified Soil Classification System (USCS), ad esempio attribuendo le classi GW-GM ai depositi di riempimento. Il valore medio per ogni parametro nella riga associata della tabella è presentato nella Tabella 1. Dati sperimentali delle curve G/G0 (γ) e D (γ) ottenuti da diversi tipi di test di laboratorio geotecnici: Doppio Campione Taglio Semplice Diretto, DSDSS; Colonna Risonante, RC; Triaxiale ciclico, TXC; Test di torsione ciclica, TC; Taglio torsionale ciclico, CTS; Test della colonna risonante e della torsione ciclica, RCT. Le diverse caratteristiche fisiche e dinamiche del suolo hanno permesso di identificare e confrontare le unità geotecniche con quelle geologiche. Comprendere la stratigrafia sismica delle aree coperte da indagini geologiche e parametri geotecnici ci ha permesso di valutare il grado di omogeneità dell'area di studio.

3.3 Analisi sismica

Le differenze nelle proprietà meccaniche e nella stratigrafia lungo il percorso dalla roccia madre sismica alla superficie libera causano modifiche nell'ingresso sismico, definendo il contributo al rischio sismico del sito (Fig. 2). Queste modifiche includono

variazioni nell'accelerazione, nella frequenza e nella durata del segnale sismico. Gli scenari sismici sono stati eseguiti con l'approccio di Analisi Probabilistica del Rischio Sismico (PSHA) che fornisce, per qualsiasi località, le curve di rischio sismico provenienti da molteplici fonti in termini di probabilità di superamento di Poisson. Nell'approccio probabilistico, è possibile scegliere scenari sismici con valori di probabilità di accadimento associati. L'approccio si basa empiricamente su osservazioni statistiche dei cataloghi sismici.

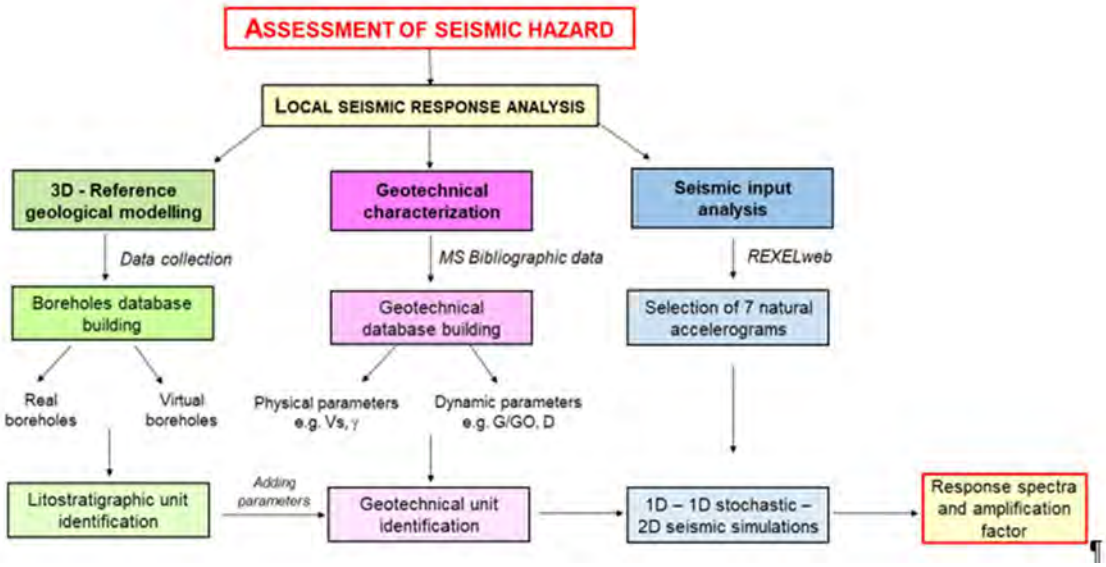


Figura 2. Diagramma di flusso della metodologia adottata per l'analisi del rischio sismico.

Le sorgenti sismogenetiche, le faglie attive e la sua storia sismica sono state analizzate per identificare le principali proprietà sismiche del sito. L'analisi di disaggregazione ha fornito indicazioni rilevanti per la determinazione degli intervalli da utilizzare nella selezione delle registrazioni. Nel caso di studio, la selezione degli accelerogrammi era orientata alla definizione dell'intervallo ottimale Mw-distanza dedotto dall'analisi di disaggregazione. In conformità le NTC2018, sono state selezionate sette registrazioni naturali orizzontali, registrate su roccia (classe di tipo di suolo: A) e topografia piana (classe topografica: T1), assumendo due diverse condizioni di Stato Limite Ultimo. Nel primo caso, le analisi sono state condotte nello Stato di Salvaguardia della Vita (SLV) con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni, mentre nel secondo caso è stato considerato uno scenario più grave nello Stato di Limite di Collasso (SLC) con una probabilità di superamento del 5% in 50 anni. Nel primo caso, è stata assunta una coppia magnitudine-distanza rappresentativa del rischio sismico del sito di 4-7 Mw per una distanza di 30 km. Nel secondo caso, la coppia grandezza-distanza selezionata è di 4,5-7,5 Mw per una distanza di 55 km. Il database strong-motion memorizzato in REXELweb restituisce un elenco di combinazioni compatibili con il sito secondo l'intervallo di periodo scelto e la tolleranza prevista, fornendo anche lo spettro medio target.

Le simulazioni di risposta sismica locale sono state effettuate utilizzando l'approccio lineare equivalente tramite simulazioni stocastiche-2D 1D-1D, considerando due diversi scenari di pericolo sismico di base (SLV - SLC). Per fare considerazioni oggettive riguardo ai risultati di entrambi gli approcci, sono stati considerati n°3 punti di analisi 1D caratterizzati da diverse profondità della roccia sismica. La sezione 2D è stata progettata in modo che questi punti n°3 fossero allineati lungo la sua traccia. Sono state condotte simulazioni stocastiche 1D, tenendo conto di una colonna stratigrafica sismica 1D che considera la variabilità dei parametri fisico-meccanici e stratigrafici nei n° 3 punti di analisi 1D.

3.4 Periodo di vibrazione del serbatoio di stoccaggio

L'impianto di EURECO è caratterizzato da diversi componenti strutturali e non strutturali con periodi fondamentali di vibrazione differenti. L'influenza del fattore di amplificazione (FA) sui diversi tipi di apparecchiature presenti negli stabilimenti può essere valutata, identificando possibili scenari di danno. Più nel dettaglio, si assumono tassi di incidenza per ogni tipo di componente capace di provocare un incidente grave, sviluppando infine un effetto domino. Correlando gli spettri di accelerazione del segnale di ingresso e di uscita, possiamo evidenziare graficamente il fattore di amplificazione (FA) per l'intervallo di vibrazione di interesse di un serbatoio di H202 presso lo stabilimento PIR, cioè tra 0,21 ÷ 0,51 S. Si tratta di una struttura cilindrica verticale in acciaio inox con una capacità geometrica di 24m^2. La correlazione consente di identificare le specifiche regioni dell'accelerogramma dove la struttura è più sollecitata, e consente di modificare gli scenari incidentali già previsti nell'analisi del rischio. Possono verificarsi diversi condizioni relative alla posizione del serbatoio di stoccaggio FA sugli spettri di accelerazione: (i) l'insieme delle frequenze di vibrazione dei serbatoi di stoccaggio si colloca all'interno della zona di amplificazione sismica, aumentando le frequenze di accadimento di un incidente rilevante; (ii) l'insieme delle frequenze di vibrazione dei serbatoi di stoccaggio non rientra nella zona di amplificazione sismica, mantenendo le frequenze previste, iii) l'insieme delle frequenze di vibrazione dei serbatoi di stoccaggio è posizionato dove il segnale sismico viene smorzato, riducendo la frequenza di accadimento. Analogamente, l'analisi descritta è applicabile anche alle tubazioni, che rappresentano elementi critici negli impianti industriali e nel trasferimento di sostanze pericolose, come i prodotti petroliferi e il gas naturale. Le tubazioni sono utilizzate per il trasporto più efficiente di questi fluidi all'interno dell'impianto, collegando diverse unità di produzione o di stoccaggio. Sono progettate per garantire un trasporto sicuro ed efficiente delle sostanze, prevenendo perdite, danni o contaminazioni.

4. *Risultati*

Le unità stratigrafiche dell'area di studio sono state ricostruite fondendo le litologie attraversate dai pozzi (125 reali, 110 virtuali) con un approccio di giudizio esperto e seguendo le informazioni della letteratura. Un modello ingegneristico-geologico 3D ad alta risoluzione è stato ottenuto integrando dati stratigrafici e geofisici per rappresentare in modo affidabile l'ambiente geologico e quindi supportare le analisi locali della risposta sismica. Più di 60 pozzi raggiungono una profondità di 50 metri, situati al centro della valle, mentre verso i lati la roccia madre si trova a profondità inferiori, anch'essa inferiori a 30 metri. Il geodatabase ha facilitato l'identificazione di sei unità stratigrafiche (Fig. 3) con contatti localmente complessi, rappresentati nella Fig. 3: 1) Riempimento, 2) Detriti di pendio, 3) Limo e argille lacustri, 4) Travertino, 5) Ghiaia fratturata e parzialmente cementata e 6) roccia madre sismica. La morfologia della valle sembra essere stretta e profonda, riempita di depositi alluvionali. Il modello ricostruito rivela che l'unità detriti sui pendii è presente solo ai piedi dei pendii circostanti, con spessori massimi di 8 metri verso nord-ovest dello stabilimento. Spostandosi verso il centro della valle, l'unità detriti diminuisce gradualmente fino a scomparire. Le proprietà nel sito EURECO per ciascuna unità sono riassunte in ordine stratigrafico nella Tabella 1.

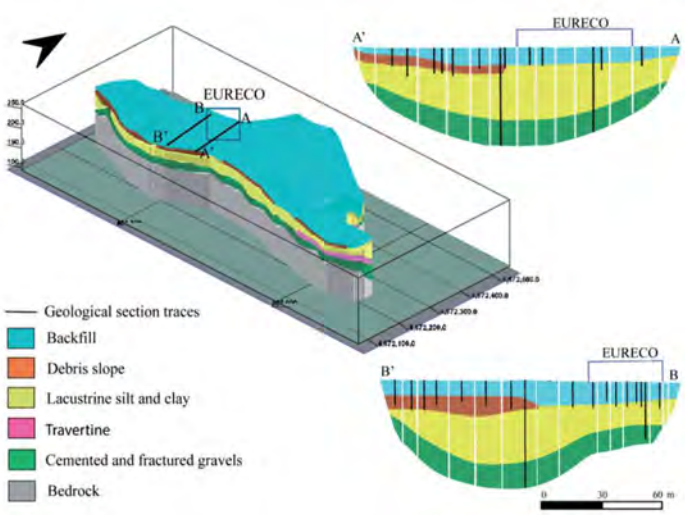


Figura 3. Modello geologico 3D La sezione trasversale A-A' è mostrata sopra, dove sono mostrati i sondaggi reali (neri) e virtuali (bianchi).

Unit	Mean thickness	Min thickness	Max thickness	Mean Vs	Min Vs	Max Vs	Mean Vp	γ	v ratio
-	*m*	*m*	*m*	*m/s*	*m*	*m/s*	*m/s*	*kN/m³*	-
Back fill	8	5	11	350	240	470	625	18.7	0.38
Debris slope	5	4	6	450	300	600	830	18	0.30
Lacustrine silt and clay	21	11	31	400	300	500	680	17	0.43
Cemented and fractured gravels	10.5	6	15	750	700	800	1050	22	0.30
Bedrock	-	-	-	1160	900	1250	2500	24	0.27

Tabella 1. Caratterizzazione geotecnica di ogni unità identificata per l'impianto EURECO.

I parametri geotecnici assegnati a ciascuna unità mostrano comportamenti differenti del suolo. L'analisi delle curve G/G0 ha contribuito a rilevare variazioni di rigidità e dissipazione di energia tra diverse unità geologiche, fornendo una prospettiva dettagliata sulle caratteristiche geotecniche del sottosuolo. La ricostruzione delle curve è stata effettuata analizzando statisticamente i dati raccolti, dove ogni unità litologica USCS identificata nel sito è rappresentata dai valori medi del decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento e dai livelli di confidenza (± 95%). La ricostruzione della morfo-sismo-stratigrafia di una colonna di suolo situata sotto l'impianto EURECO rivela che i valori Vs più bassi sono misurati nei depositi di riempimento (350 m/s) e nei limi e argille lacustri (400 m/s), in contrasto con ghiaia (750 m/s) e roccia madre (1160 m/s). Il modello geologico rivela che il travertino non è presente nell'impianto EURECO, ma si estende nel settore meridionale del sistema. Pertanto, i parametri per il travertino non sono stati inclusi nella Tabella 1. La sezione 2D utilizzata per le analisi di risposta sismica locale enfatizza le caratteristiche geometriche della valle e le unità sismiche sepolte, permettendo di valutare gli effetti combinati dei fattori stratigrafici e morfo-stratigrafici sulla modifica del segnale sismico di ingresso. Per ciascuno degli accelerogrammi utilizzati nelle analisi locali della risposta sismica, sono stati identificati i principali parametri del movimento del suolo (Tabella 2). Tra i parametri considerati i più importanti per questo studio specifico, dove l'obiettivo è evidenziare la variabilità del fattore di amplificazione in relazione al periodo di vibrazione di una componente del sistema, vengono enfatizzati il periodo predominante (PP) e il periodo medio (MP). Considerando che l'intervallo di vibrazione del serbatoio è compreso tra 0,21 ÷ 0,51 secondi, si osserva che la maggior parte degli accelerogrammi presenta un contenuto energetico predominante nello stesso intervallo. Sono state identificati 3 sondaggi H18 - H19 - H20, che rappresentano rispettivamente i limiti settentrionale, centrale e sud dell'impianto EURECO. Ogni verticale è caratterizzata dalle onde di taglio medie Vs Shear, dalla profondità della roccia madre e dalle proprietà geomeccaniche associate alla sua unità sismica. Questo approccio ha permesso simulazioni sismiche 1D e simulazioni sismiche stocastiche 1D, modellando una colonna unidimensionale mediata tra H18 - H19 - H20.

SL	ID	Name	PGA	PGV	PGD	Arias	RMSa	RMSv	RMSd	CI	SED	PP	MP	Time
SLV	1	0001_3A.MZ102..HNE.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP.ASC	0.3724	0.04431	0.01454	0.01797	0.03814	0.0043	0.0018	0.0654	0.0014	0.18	0.44568	77.15
	2	0002_HI.ARG2..HNN.D.EMSC-20140203_0000008.ACC.MP.ASC	0.26196	0.03356	0.008722	0.00599	0.02884	0.0032	0.00127	0.0329	0.00045	0.46	0.47284	45.01
	3	0003_IT.TLM1.00.HNN.D.IT-1976-0002.ACC.MP.ASC	0.35232	0.02268	0.003877	0.00822	0.03755	0.0029	0.00089	0.0439	0.00032	0.25	0.39698	36.39
	4	0004_IV.EVRN..HNE.D.EMSC-20181226_0000014.ACC.MP.ASC	0.30057	0.02839	0.005492	0.00368	0.01991	0.0026	0.00079	0.0214	0.0004	0.38	0.64324	57.905
	5	0005_IV.T1201..HNE.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP.ASC	0.34594	0.02082	0.009893	0.00952	0.03136	0.0035	0.00172	0.0432	0.00075	0.11	0.41722	60.48
	6	0006_SM.109.00.HN2.D.IS-2000-0053.ACC.MP.ASC	0.43489	0.04134	0.023363	0.0117	0.03645	0.0053	0.00332	0.0516	0.00155	0.1	0.36358	55
	7	0007_SM.112.00.HN3.D.IS-2008-0054.ACC.MP.ASC	0.33417	0.03498	0.009552	0.0054	0.02163	0.0026	0.00146	0.027	0.00047	0.36	0.51687	72
SLC	1	0001_3A.MZ102..HNE.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP.ASC	0.3724	0.04431	0.01454	0.01797	0.03814	0.0043	0.0018	0.0654	0.0014	0.18	0.44568	77.15
	2	0002_3A.MZ19..HNE.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP.ASC	0.36311	0.03528	0.012805	0.01195	0.03835	0.0041	0.00185	0.0535	0.00086	0.27	0.48103	50.755
	3	0003_HL.AIGA.00.HN2.D.GR-1995-0047.ACC.MP.ASC	0.49834	0.04045	0.008488	0.01033	0.04026	0.0042	0.00135	0.051	0.00069	0.41	0.51112	39.79
	4	0004_IT.AMT.00.HGN.D.EMSC-20160824_0000006.ACC.MP.ASC	0.37565	0.04232	0.008713	0.00751	0.04101	0.0044	0.00141	0.0439	0.00054	0.22	0.54108	27.895
	5	0005_IT.AQG.00.HNE.D.IT-2009-0009.ACC.MP.ASC	0.44605	0.03157	0.006108	0.01376	0.02932	0.0027	0.00066	0.0502	0.0007	0.21	0.44742	100
	6	0006_IV.T1214..HNE.D.EMSC-20161030_0000029.ACC.MP.ASC	0.60489	0.05501	0.021708	0.03995	0.0572	0.0046	0.00285	0.1195	0.00163	0.09	0.28198	76.24
	7	0007_SM.106.00.HN2.D.IS-2000-0048.ACC.MP.ASC	0.32031	0.07206	0.01817	0.01309	0.04179	0.0071	0.00368	0.0584	0.00233	0.39	0.65341	46.8

Tabella 2. Descrizione dei sette accelerogrammi naturali selezionati per l'analisi delle condizioni SLV e SLC. Parametri del movimento del terreno: valori massimi del terreno di Accelerazione (PGA), Velocità (PGV), Spostamento (PGD); Arias Intensity; Radice Media – Quadrato dell'accelerazione (RMSa), Velocità (RMSb), Spostamento (RMSd); Intensità caratteristica (IC); Densità Energetica Specifica (SED); Periodo Predominante (PP); Periodo medio (MP); Tempo.

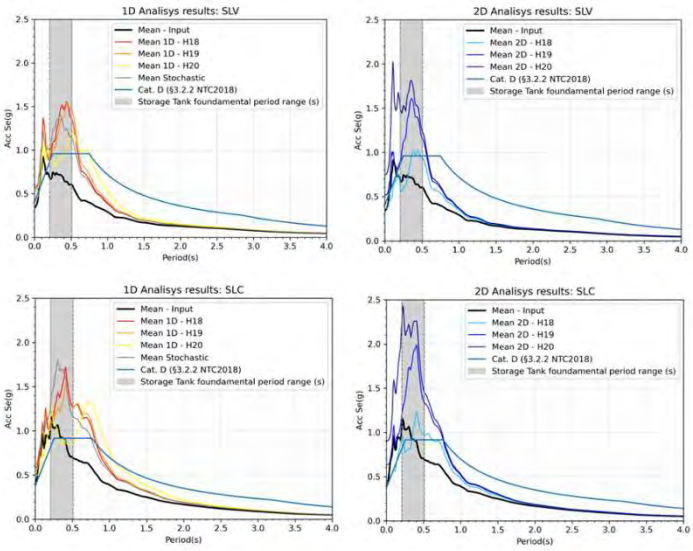


Figura 4. Confronto tra la risposta dello spettro di accelerazione nelle condizioni SLV (alto) e SLC (inferiore). La colonna di destra mostra i risultati ottenuti dalle analisi stocastiche 1D e 1D, mentre la colonna di sinistra mostra la risposta del sito dall'analisi 2D.

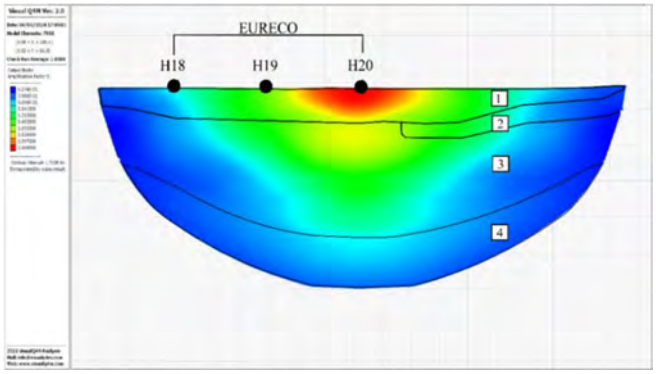


Figura 5: Distribuzione 2D del fattore di amplificazione (FA) lungo la sezione geologica A-A', per le condizioni SLV. Unità geologica: 1) Riempimento; 2) conoide di detriti; 3) Limo e argilla lacustri; 4) Ghiaia cementata e fratturata.

La simulazione 2D è stata effettuata riproducendo un modello con la sezione geologica dell'impianto EURECO, includendo le posizioni H18 - H19 - H20 come punti di controllo per i risultati di output. Per entrambi gli scenari SLV e SLC, sono stati confrontati lo spettro di accelerazione calcolato sulla superficie del terreno (Output) ottenuto tramite simulazioni numeriche con quello derivato da un approccio semplificato (§3.2.2 NTC2018), per valutare la risposta sismica del sito per una sottocategoria di tipo di suolo D (Output), come indicato nel RdS, con lo spettro di accelerazione della roccia madre (Input). Le analisi sismiche condotte sulle condizioni SLV e SLC rivelano una notevole variabilità nella risposta del sito lungo gli stessi verticali, almeno in termini di differenza assoluta di accelerazione. I risultati ottenuti dall'analisi 2D per le colonne H18-H20 evidenziano risposte di sito diverse, dove il segnale sismico viene smorzato all'ingresso medio lungo la colonna H18 (intervallo SLV: 0,2-0,3 s, intervallo SLC: 0-0,3 s). Nell’analisi 2D il FA aumenta da H18 verso H20,

come mostrato nella Fig. 5. I risultati delle analisi 2D mostrano come il FA sia principalmente influenzato dal contrasto di impedenza sismica dovuto agli strati più superficiali (Fig. 5 unità: 1 - 2 - 3) e dalla forma approssimativamente simmetrica del substrato roccioso rispetto all'asse della valle, che concentra l'energia sismica al centro della sezione 2D (H20). I valori massimi di FA calcolati nel punto H20 sono rispettivamente 2,28 e 2,25 per le condizioni SLV e SLC.

5. Conclusioni e prospettive future

La valutazione del rischio sismico contribuisce all'identificazione di potenziali scenari accidentali NaTech che potrebbero verificarsi presso l'impianto PIR. L'approccio scelto propone lo sviluppo del modello geologico e dell'analisi sismica stocastica-2D 1D-1D dello stabilimento PIR per fornire una solida base per ulteriori studi sulla risposta sismica locale e per la pianificazione di misure di mitigazione. Le simulazioni della risposta sismica locale condotte mostrano come le caratteristiche geometriche dei suoli sepolti e le loro proprietà geotecniche influenzino in modo significativo e variabile l'area circostante la struttura EURECO. Lungo la sezione 2D analizzata, ci sono aree caratterizzate da uno smorzamento locale del segnale sismico (FA < 1) a valori massimi superiori a un fattore 2, situate al centro della pianura alluvionale. Per tutte le analisi, il valore FA è stato calcolato entro un intervallo spettrale compreso tra 0,21 ÷ 0,51 secondi; questo intervallo rappresenta l'intervallo di vibrazione di un serbatoio di stoccaggio H202. Ottimizzando le risorse in termini di mitigazione del rischio sismico e per tutte le operazioni di manutenzione, sarà possibile ridurre il rischio di un evento NaTech innescato da un evento sismico.

5. Ringraziamenti

Si ringrazia il CTER Calogero Vitale per il contributo fornito alla determinazione del periodo di vibrazione del serbatoio in acciaio in base alle caratteristiche del materiale.

6. Bibliografia

[1] Marino A., Ciucci M. et al. RISCHIO NATECH DA SISMA PER STABILIMENTI SOGGETTI AL D.LGS.105/2015. Documento redatto nel Gruppo di Lavoro NaTech istituito nell'ambito del Coordinamento Nazionale di cui all'art.11 del Decreto Legislativo del 26 giugno 2015 n.105. Novembre 2023 https://www.portaleseveso.isprambiente.gov.it/documenti/RISCHIO%20NATECH%20DA%20SISMA%20PER%20STABILIMENTI%20SOGGETTI%20AL%20D-LGS-105_2015%20.pdf

[2] 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] Marino A., Ciucci M. & Palermo O., (2019) - Valutazione e gestione del rischio sismico negli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante. XVIII Convegno ANIDIS Ascoli Piceno 2019 15-19 Settembre "L'Ingegneria sismica in Italia".

Analisi del rischio Natech: sviluppo di un metodo di screening semplificato

L. Bitraj[1], V. Cozzani[2], C. Puccini[1], M. Pacileo[3], V. Galasso[4], A. Sibilano[4]

[1]Saipex S.r.l.
[2]Alma Mater Studiorum - Università di Bologna – Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali
[3]Fabbrica Italiana in Sintetici (FIS)
[4]Inail – UOT di Taranto

Sommario
La presenza sul territorio nazionale di numerosi stabilimenti soggetti alla Direttiva Seveso III, localizzati in aree vulnerabili ai fenomeni naturali, unita all'aumento della frequenza e dell'intensità di alcuni di questi fenomeni, come alluvioni o frane, causate dal cambiamento climatico, rende la gestione del rischio Natech una necessità concreta per garantire la sicurezza di lavoratori, popolazione ed ambiente.
In questo contesto si inserisce il presente studio che ha avuto lo scopo di sviluppare un metodo di identificazione delle apparecchiature critiche, al fine di individuare, per queste ultime, il rischio Natech.
Tale metodo è articolato in due fasi: una procedura di screening, volta ad individuare le apparecchiature maggiormente vulnerabili agli eventi naturali, e una successiva analisi del rischio quantitativa per quelle classificate come critiche.
La procedura di screening sviluppata ed il procedimento di analisi di rischio sono stati applicati ad una sezione del parco serbatoi atmosferici dello stabilimento F.I.S. di Termoli (CB), con un focus sul rischio alluvionale, poiché è stato individuato come il più credibile per il sito.
L'applicazione ha mostrato che un'analisi del rischio che comprende eventi Natech, conduce ad individuare apparecchiature critiche e scenari incidentali finali differenti rispetto a quelli individuati con l'analisi del rischio convenzionale, mettendo in evidenza l'importanza di integrare anche tali eventi nella valutazione del rischio di incidente rilevante.

1. Introduzione

Gli eventi Natech, *Natural hazard triggering technological accidents*, sono scenari incidentali severi in ambito industriale, cioè incendi, esplosioni o nubi tossiche, causati da eventi naturali straordinari, come terremoti o alluvioni.
Il presente studio ha lo scopo di sviluppare una procedura di screening semi-quantitativo, che renda più speditivo il processo di valutazione del rischio e di descrivere una metodologia di analisi quantitativa del rischio Natech.
Il metodo di screening sviluppato e la procedura di analisi del rischio Natech quantitativa sono state poi applicate al parco serbatoi di stoccaggio della sede F.I.S.

di Termoli (CB). F.I.S. è una società specializzata nella produzione di intermedi, intermedi avanzati e principi attivi per le case farmaceutiche.
I serbatoi di stoccaggio presi in considerazione nella presente analisi si dividono in serbatoi verticali a tetto fisso, collocati all'interno di bacini di contenimento, ed in serbatoi orizzontali interrati.

2. Fasi dell'analisi del rischio Natech

La struttura dell'analisi di rischio può essere schematizzata nelle seguenti fasi [1], [2]:
1. Identificazione dei pericoli naturali che possono portare ad un rilascio e dunque ad un incidente rilevante.
2. Identificazione delle apparecchiature critiche, cioè le apparecchiature più vulnerabili al pericolo naturale preso in considerazione.
3. Valutazione delle conseguenze del top event, effettuata tramite alberi degli eventi specifici per gli eventi Natech. Il rilascio di materia, infatti, è seguito da una catena di eventi che portano all'effetto fisico.
4. Valutazione della magnitudo della conseguenza, ovvero dell'effetto fisico associato ad ogni scenario incidentale finale individuato.
5. Valutazione della probabilità che si verifichi lo scenario incidentale finale, che è strettamente collegata alla frequenza dell'evento Natech.
6. Calcolo del rischio sociale ed individuale.
7. Confronto con i criteri di accettabilità del rischio e valutazione delle misure di gestione del rischio.

3. Identificazione del pericolo naturale

Per ogni evento naturale è stato calcolato un indice di pericolo globale I_E, dato dal prodotto dell'indice di frequenza I_F, dell'indice di magnitudo I_M e dell'indice relativo all'area di impatto I_A, ognuno dei quali assume un valore compreso fra 1 e 5, dove 1 rappresenta la categoria minima di pericolo e 5 la categoria massima.

$$I_E = I_F \cdot I_M \cdot I_A \quad (1)$$

Dove:
- L'indice I_F è assegnato sulla base del tempo di ritorno di un fenomeno naturale di intensità fissata nell'area di riferimento, suddiviso in 5 classi crescenti di frequenza.
- L'indice I_M è assegnato in funzione dell'intensità di un fenomeno naturale che si verifica con un tempo di ritorno fissato nell'area di riferimento, secondo 5 classi crescenti di magnitudo.
- L'indice I_A, infine, rappresenta l'area d'impatto del fenomeno naturale.

In questo studio, poiché l'analisi è limitata al solo stabilimento FIS di Termoli, l'indice relativo all'area di impatto I_A è sempre assunto pari ad 1, considerando che, se un evento naturale colpisce l'impianto, lo coinvolge in tutte le sue parti,

La Tabella 1 mostra i valori di I_F ed I_M assegnati nel caso studio, dunque il valore di I_E relativo ai vari fenomeni naturali nell'area dello stabilimento.

Evento naturale	Indice di frequenza	Indice di magnitudo	I_E
Terremoto	2	3.6	7.2
Alluvione	4	4	16
Forte vento	1	1	1
Fulminazione	3	1	3

Tabella 1. Indice di pericolosità dell'evento naturale

Il fenomeno naturale più pericoloso per lo stabilimento è l'alluvione, a causa sia della presenza del fiume Biferno ad una minima distanza dall'impianto, che della presenza della Diga artificiale del Liscione. Questo studio sarà dunque incentrato sull'analisi del rischio Natech dovuto ad alluvione nello stabilimento FIS.

4. Procedura di pre-screening

Il passaggio seguente consiste in una procedura di pre-screening, volta ad individuare le apparecchiature su cui applicare il metodo di screening. A tal scopo, è stato sviluppato un metodo ad indici, per cui per ogni apparecchiatura è calcolato un indice di preselezione, secondo l'equazione 2:

$$I_P = I_{TOX} + 2 \cdot I_{VOL} + I_{VAP} + I_{COMB} + I_{FP} + I_{CAP} + I_{Sf} + I_{PRES} \qquad (2)$$

Gli indici individuati sono associati a parametri relativi sia alle condizioni di stoccaggio, che alle proprietà della sostanza esaminata, come riportato in Tabella 2.

Tipologia	Parametro	I=1	I=2	I=3	I=4	I=5
Parametri di stoccaggio	Capacità, I_{CAP} (m^3)	<20	20÷45	46÷100	101÷1000	>1000
	Pressione di stoccaggio I_{PRES} (10^5 Pa)	1,01	1,01÷5	6÷10	11÷50	>50
	Stato fisico I_{Sf}	Liquido	Gas	-	-	-
Proprietà della sostanza	T flash point I_{FP} (K)	>365	333÷365	294÷332	273÷293	<273
	Entalpia di combustione, $I_{COMB,20°C}$ (kJ/mol)	≥ -500	-499 ÷ -1000	-1001 ÷ -2000	-2001 ÷ -3000	< -3000
	Entalpia di vaporizzazione $I_{VAP,20°C}$ (kJ/mol)	> 60	41÷60	31÷40	21÷30	≤ 20
	Tossicità IDLH, I_{TOX} (ppm)	>5000	1001÷5000	251÷1000	51÷250	≤ 50
	Volatilità, Psat $I_{VOL,20°C}$ (Pa)	≤ 1,33	1,34 ÷1333	1334÷3999	4000÷13332	> 13332

Tabella 2. Definizione degli indici utilizzati per il pre-screening

Il procedimento di screening è portato avanti per le apparecchiature che presentano un punteggio maggiore del 55% del punteggio di preselezione massimo, cioè 42. La figura 1 mostra le apparecchiature selezionate nel caso di studio.

5. Metodo di screening semplificato

Le apparecchiature che hanno superato la fase di pre-screening sono sottoposte poi ad una procedura di screening, basata sul metodo di screening Rapid Natech Risk Assessment, RNRA [3], modificato, tramite l'introduzione del Pollution Index, e semplificato nelle modalità di assegnazione di un valore agli indici, in modo da ottenere una prima valutazione del rischio Natech ancora più speditiva.
Ad ognuna delle apparecchiature analizzate è associato un indice di rischio NRI_i, come mostra l'equazione 3.

$$NRIi = [HRLi\,] * [Di + Area_{sci} + Ci + Pi] \quad (3)$$

Dove:

- HRL_i, Hazmat Release Likelihood, è l'indice relativo alla probabilità che si verifichi il rilascio di sostanza pericolosa;
- D_i è l'indice che indica il potenziale che si verifichi effetto domino;
- $Area_{sci}$ è l'indice che descrive le conseguenze sulla popolazione del rilascio da ogni serbatoio di stoccaggio;
- C_i è l'indice delle potenziali conseguenze del rilascio di materiale pericoloso sulle strutture essenziali presenti nell'area di impatto del disastro naturale.
- P_i, Pollution Index, è l'indice relativo alla probabilità che si verifichi la contaminazione di acqua, suolo e acque sotterranee.

5.1 Calcolo dell'indice Hazmat Release Likelihood, HRLi.

Come evento naturale di riferimento è stata scelta un'alluvione con livello dell'acqua di 1 m, velocità dell'acqua di 1 m/s e con tempo di ritorno di 100 anni, a seguito di un'analisi del Piano Stralcio Difesa Alluvioni della Regione Abruzzo. [4]

Per stimare la probabilità di cedimento delle apparecchiature sono stati utilizzati due modelli di vulnerabilità riportati in letteratura:

- Il metodo descritto nello studio [5], specifico per i serbatoi atmosferici.
- Il metodo descritto nello studio [6], specifico per le tubazioni.

In entrambi i casi sono individuati due parametri critici che possono essere associati direttamente alla probabilità di cedimento dell'item.

Nel caso dei serbatoi verticali, si tratta del livello di riempimento critico dell'apparecchiatura CFL_v, mentre nel caso delle tubazioni, della lunghezza critica L_{crit} del tratto di tubazione compreso fra due sopporti consecutivi.

In Tabella 3 sono riportate per entrambe le tipologie degli item i punti fondamentali dell'applicazione dello studio di probabilità di cedimento.

Serbatoi atmosferici verticali			
Item	Sostanza	CFL_h	HRL_i
S-45	Acido acetico	0,085	2
S-157	Acido cloridrico	0,067	0
S-170	Ammoniaca	0,092	0
S-268	Metil-THF	0,096	2
S-269	Idrazina idrata	0,117	0
S-271	Alcool terbutilico	0,105	2
S-332	Acido formico	0,059	0

Linee		
Sostanza	L_{crit}	HRL_i
THF	8,48	3
acetone	8,55	3
esano	6,88	4
etil acetato	8,48	3
terbutilmetiletere	8,58	3
THF	8,48	3
acetonitrile	8,55	3
acetone	8,55	3
xilolo	8,50	3
n-eptano	8,61	3
THF	8,48	3
isopropanolo	8,55	3
isopropanolo	8,55	3
etanolo	8,55	3
toluene	8,50	3
terbutilmetiletere	8,58	3

Tabella 3. Risultati HRLi per serbatoi e linee

5.2 Assegnazione indice effetto domino

Per assegnare un indice di effetto domino è necessario calcolare la massima distanza di danno per gli scenari incidentali che possono portare ad effetto domino. In questo studio sono stati considerati il Pool Fire e la Vapour Cloud Explosion (VCE) per tutte le apparecchiature che abbiano superato lo screening e che contengano sostanze infiammabili non completamente solubili in acqua e meno dense dell'acqua. Queste sostanze, infatti, possono dar vita ad una pozza evaporante sulla superficie dell'acqua che in caso di innesco può dare pool fire.

Per realizzare il calcolo è stato utilizzato il software Effects Gexcon, il quale permette di modellare le conseguenze di rilasci accidentali di sostanze pericolose. Per i serbatoi posti fuori terra è stato considerato un rilascio da foro di 4" sul fondo del serbatoio e una durata del rilascio tale da portare allo svuotamento dell'apparecchiatura. Per i serbatoi interrati, invece, è stata considerata la rottura full bore della tubazione di collegamento fra il serbatoio interrato e la pompa che porta il fluido dal serbatoio di stoccaggio al reparto di processo e una durata del rilascio tale da svuotare il contenuto del tratto di tubazione sopra descritto.

In entrambi i casi è stata simulata la formazione di una pozza di liquido sulla superficie dell'acqua alluvionale. Per il serbatoio S-268, contenente metil-tetraidrofurano, la simulazione è stata condotta considerando il tetraidrofurano, in modo conservativo.

5.3. Calcolo degli indici $Area_{sci}$, C_i e P_i

Per l'assegnazione degli indici $Area_{sci}$, che esprime l'effetto dell'incidente sulla popolazione circostante, e C_i, che esprime l'effetto dell'incidente sugli edifici sensibili, è stato considerato solo il fenomeno del rilascio tossico, poiché è l'unico che può avere un impatto al di fuori dei confini dello stabilimento.

Il valore soglia preso come riferimento per determinare la massima distanza di danno MDE è l'indice IDLH. Sono stati considerati i serbatoi o le tubazioni contenenti sostanze tossiche non completamente solubili in acqua e meno dense dell'acqua, che effettivamente formano una pozza evaporante sulla superficie dell'acqua e la cui dispersione è simulata dal software Effects Gexcon.

Un'ulteriore conseguenza che il rilascio delle sostanze tossiche può causare è la contaminazione dell'acqua, del suolo e delle falde. Tali effetti non possono essere modellati tramite il software Effects, tuttavia, non possono essere trascurati, dunque nel presente studio il Natech Risk Index NRI_i, in caso di alluvione, è stato modificato, in modo da tener conto di questo ulteriore parametro, nelle modalità descritte in Tabella 4.

Indice	Descrizione sostanza
1	Non tossica
2	Tossico per l'uomo o gli organismi acquatici
3	Tossica per l'uomo e gli organismi acquatici

Tabella 4. Assegnazione indice di inquinamento Pi

In base ai risultati ottenuti nelle sezioni precedenti è possibile valutare il Natech Risk Index NRI_i per le apparecchiature analizzate. I risultati sono riportati in Tabella 5.

Item	Sostanza	HRL_i	Di	Ci	$Area_{sci}$	Pi	NRI_i
G-15	esano	4	2	1	1	2	24
G-20	terbutilmetiletere	3	3	1	1	2	21
G-27	xilolo	3	3	1	1	2	21
G-28	n-eptano	3	3	1	1	3	24
G-32T	toluene	3	3	1	1	3	24
G-33	terbutilmetiletere	3	3	1	1	2	21
S-268	metil-THF	2	4	2	2	1	18

Tabella 5. Valori di HRLi per le apparecchiature critiche

Le apparecchiature critiche, cioè quelle per le quali deve essere effettuata l'analisi quantitativa del rischio di incidente rilevante sono i serbatoi interrati G-15, G-20, G-27, G-28, G-32, G-33 ed il serbato*i*o S-268, come mostra la Figura 1.



Figura 1. Apparecchiature che hanno superato il pre-screening (sinistra); apparecchiature che hanno superato lo screening (destra)

6. Analisi quantitativa del rischio Natech

Per le apparecchiature che hanno superato lo screening è necessario procedere con l'analisi quantitativa del rischio di incidente Natech, dunque calcolare il rischio locale. In questo studio per il calcolo del rischio non sono stati considerati l'effetto domino ed il verificarsi di scenari simultanei, dunque il LSIR, Local Specific Individual Risk, è stato calcolato considerando il singolo evento incidentale, come riportato nell'equazione 4.

$$\mathrm{LSIR}(\mathrm{Pj}) = \mathrm{fscen\ fin} \cdot \mathrm{PrM}(\mathrm{Pj}) \quad (4)$$

Dove:

- $f_{scenfin}$ è la frequenza dell'incidente Natech;
- PrM è la probabilità di morte corrispondente all'irraggiamento nel punto Pj, calcolata tramite la variabile di Probit;

Gli scenari incidentali finali che si possono verificare a seguito del rilascio sono stati individuati tramite alberi degli eventi specifici per indicenti Natech di origine alluvionale [7], [8]. Gli scenari possibili per il caso studio sviluppato sono: Pool Fire, Nube Tossica e Contaminazione di acqua, suolo e falda. Per gli scenari di Pool Fire e nube tossica, mediante la simulazione su Effects, sono state ottenute le curve iso-probabilità di morte.

Infine, la frequenza con cui si verifica l'evento Natech, P(Nat), è stata calcolata secondo l'equazione 5:

$$P(Nat)=P(Haz)\cdot P(Top|Haz)\cdot P(Nat|Top) \quad (5)$$

Dove:

- P(Haz) è la probabilità che si verifichi il pericolo naturale e nel presente studio è pari a 0.01 eventi/anno poiché un'alluvione con v=1 m/s e h= 1m ha un tempo di ritorno di 100 anni.
- P(Top|Haz) è la probabilità condizionata che si verifichi un rilascio, dato un pericolo naturale, calcolata precedentemente al fine di determinare HRL_i.
- P(Nat|Top) è la probabilità condizionata che si verifichi lo scenario Natech finale, a seguito del rilascio, calcolata utilizzando gli alberi degli eventi quantitativi, come quello riportato in Figura 2, relativo al rilascio dalla tubazione connessa al serbatoio G-15.
- La probabilità che si verifichi innesco immediato a seguito del rilascio, pari a 0.013, è stata riscontrata in articoli presenti in letteratura specifici per eventi Natech di origine alluvionale. [9]
- La probabilità con cui si forma la nube tossica è stata stimata per ogni apparecchiatura critica come rapporto fra la portata evaporata dalla pozza in un'ora, ottenuta mediante la simulazione condotta su Effects, e massa totale rilasciata.

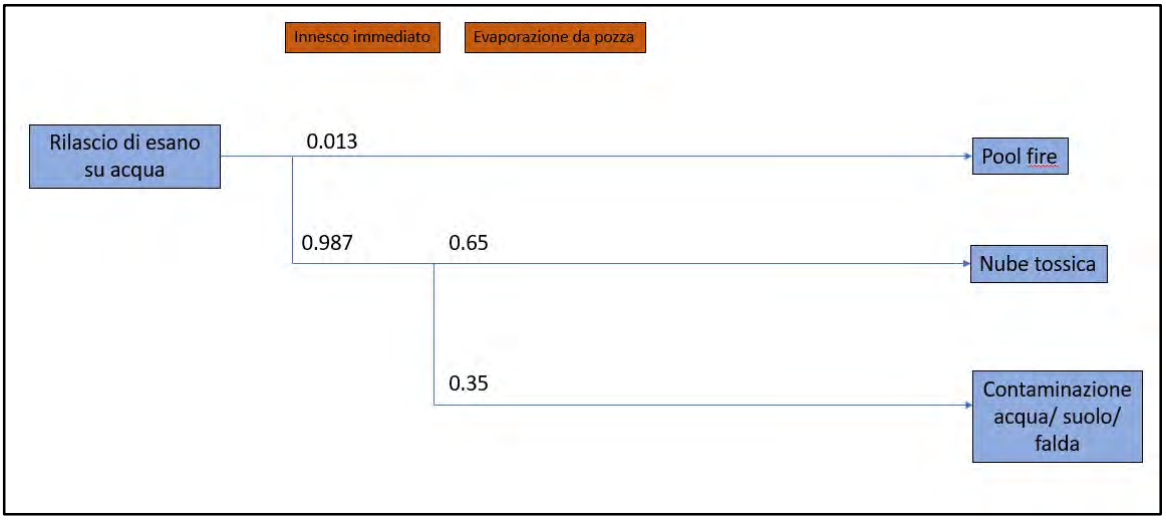


Figura 2. Albero degli eventi quantificato specifico per la tubazione connessa al serbatoio G-15

7. Risultati del rischio Natech

In Figura 3 sono riportate le curve LSIR per gli scenari incidentali pool fire individuati. Per il rilascio tossico da S-268, per ovviare alla scarsità di dati presenti in letteratura, sono stati utilizzati i valori soglia dell'effetto fisico come valori determinanti la probabilità di morte. In particolare, per ottenere un risultato conservativo, è stata presa come curva iso-probabilità di morte con PrM=1, l'isopleta corrispondente all'IDLH, come mostra la Figura *4*.



Figura 3. Curve LSIR relative allo scenario pool fire per gli item critici

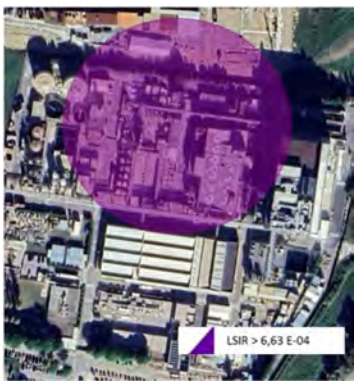


Figura 4. Cuvrve LSIR per rilascio tossico da serbatoio S-268

In Tabella 6 sono riportati i massimi valori di rischio locale calcolati per ognuno degli scenari incidentali identificati. Il rischio locale è stato confrontato con i criteri di accettabilità olandesi: il rischio risulta non accettabile se superiore a 10^{-2} eventi/anno mentre risulta in zona ALARP se compreso fra 10^{-6} e 10^{-4} eventi/anno.

Item	LSIR massimo per pool fire (morti/anno/persona)	LSIR massimo per nube tossica (morti/anno/persona)
G-15	$7{,}2 \cdot 10^{-5}$	-
G-20	$3{,}31 \cdot 10^{-6}$	-
G-27	$2{,}48 \cdot 10^{-5}$	-
G-28	$3{,}03 \cdot 10^{-5}$	-
G-32T	$2{,}89 \cdot 10^{-5}$	-
G-33	$2{,}89 \cdot 10^{-5}$	-
S-268	$1{,}43 \cdot 10^{-5}$	$4{,}15 \cdot 10^{-4}$

Tabella 6. Massimi valori di LSIR calcolati per gli item critici

Secondo tali criteri Il rischio locale risulta non accettabile per tutti gli scenari incidentali finali individuati nel caso studio, tranne per il pool fire causato dal rilascio di liquido infiammabile dalla tubazione connessa al serbatoio G-20, per cui risulta in zona ALARP. Tuttavia, si fa presente che l'analisi del rischio Natech è stata condotta senza tenere in considerazione le misure di prevenzione e mitigazione già messe in atto dallo stabilimento di FIS, se non i bacini di contenimento in cui sono collocati i serbatoi atmosferici. In ogni caso, l'analisi del rischio Natech di natura alluvionale ha permesso di identificare scenari di rischio che non erano emersi dall'analisi del rischio convenzionale riportata nel rapporto di Sicurezza di FIS, e scenari che hanno un LSIR maggiore. Questo risultato conferma che le caratteristiche specifiche degli eventi Natech rendono necessaria l'integrazione dell'analisi di tale rischio nella convenzionale analisi del rischio.

8. Conclusioni

Lo studio riportato nel presente articolo ha mostrato come l'integrazione degli eventi Natech nell'analisi del rischio consenta di individuare apparecchiature critiche e scenari incidentali differenti da quelli derivanti da un'analisi convenzionale.
È importante, dunque, considerare i fenomeni naturali di maggior impatto per il sito. In particolare, la procedura di screening sviluppata, basata e adattata alla metodologia proposta da Cruz e Okada (2008) [3], si è dimostrata uno strumento efficace per supportare l'identificazione delle apparecchiature maggiormente vulnerabili e indirizzare l'analisi quantitativa del rischio Natech.
L'analisi ha evidenziato, inoltre, la necessità di integrare il rischio di incidente Natech nel sistema di gestione della sicurezza dell'impianto. Nel caso studio analizzato, lo stabilimento FIS ha già incluso il pericolo alluvionale nel proprio sistema di gestione della sicurezza, anche in seguito ad un'alluvione che ha interessato lo stabilimento nel 2003, adottando misure di sicurezza strutturali, organizzative e gestionali, tra cui lo sviluppo di un palancolato metallico a protezione del lato est dello stabilimento, esposto al fiume Biferno.

Bibliografia

[1] Pinna G, Ricchiuti A, Geri F, De Rosa A, Barone D, and Vazzana F, "Stabilimenti con pericolo di incidente rilevante-La nuova UNI/TS 11816-1 sugli eventi NaTech," 2021.

[2] Necci and Krausmann, "Natech risk management Guidance for operators of hazardous industrial sites and for national authorities," 2022. doi: 10.2760/666413.

[3] A. M. Cruz and N. Okada, "Methodology for preliminary assessment of Natech risk in urban areas," in *Natural Hazards*, Apr. 2008, pp. 199–220. doi: 10.1007/s11069-007-9207-1.

[4] I. Michele and C.-S. Generale, "PIANO STRALCIO DIFESA ALLUVIONI ATTIVITA' (LINEE GUIDA, CRITERI MODALITA') RIVOLTE A VERIFICHE DI SICUREZZA E DI EFFICIENZA IDRAULICA PER RISCHI INCOMBENTI SULLE INFRASTRUTTURE, SU IMPIANTI PRODUTTIVI E TECNOLOGICI, OPERE PUBBLICHE ED EDIFICI CIVILI NEI BACINI DI RILIEVO REGIONALE DELL'ABRUZZO E DEL BACINO INTERREGIONALE DEL FIUME SANGRO GRUPPO DI LAVORO Per la REGIONE ABRUZZO," 2013.

[5] G. Antonioni, G. Landucci, A. Necci, D. Gheorghiu, and V. Cozzani, "Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 142, pp. 334–345, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.ress.2015.05.020.

[6] L. Rossi, V. Casson Moreno, and G. Landucci, "Vulnerability assessment of process pipelines affected by flood events," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 219, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ress.2021.108261.

[7] C. El Hajj, E. Piatyszek, A. Tardy, and V. Laforest, "Development of generic bow-tie diagrams of accidental scenarios triggered by flooding of industrial facilities (Natech)," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 36, pp. 72–83, 2015, doi: 10.1016/j.jlp.2015.05.003.

[8] V. Cozzani, "Towards the inclusion of external factors in quantitative risk assessment The analysis of Natech accident scenarios," *Chem Eng Trans*, vol. 19, 2010.

[9] F. Ricci, V. Casson Moreno, and V. Cozzani, "A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 147, pp. 703–713, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.12.031.

Valutazione Della Vulnerabilità Sismica Di Serbatoi Atmosferici Metallici Non Ancorati In Termini Di Perdita Di Contenimento

A. Bonelli[1], G. Quinci[1], M. Ciucci[2], Daniele Corritore[3], Fabrizio Paolacci[1]

[1]Università Roma Tre - Dipartimento di ingegneria civile, informatica e delle tecnologie aeronautiche
[2]Inail – Dit
[3]Safeplant s.r.l. – Spinoff Università Roma Tre

Sommario
Negli ultimi decenni, si è assistito ad un numero sempre crescente di eventi incidentali dovuti a fenomeni naturali estremi negli impianti industriali soggetti al D.lgs. 105-2015. Avvenimenti di questo genere sono definiti NaTech e nella maggior parte dei casi, specialmente nel contesto sismico, coinvolgono soprattutto apparecchiature come i serbatoi, dando luogo a fenomeni di rilascio di sostanze pericolose e catene incidentali.
L'osservazione degli eventi sismici passati evidenzia che le modalità di danneggiamento più comuni, in particolare per i serbatoi non ancorati, sono rappresentate da problemi di instabilità elastica ed elasto-platica del mantello, di sollevamento e scorrimento alla base. Quindi un'analisi approfondita di tali meccanismi consentirebbe di valutare nel dettaglio la vulnerabilità sismica di tale categoria di apparecchiature. In questo lavoro il focus viene posto nell'interazione tra il fenomeno dello sliding (spostamento relativo apparecchiatura-terreno) e dell'uplifing (sollevamento per effetto del momento ribaltante) su un singolo caso studio. In particolare, viene proposta un'analisi di fragilità incentrata su scenari di perdita di contenimento per rottura delle tubazioni collegate all'apparecchiatura non ancorata. Per analizzare la problematica viene adottato un approccio probabilistico semplificato, in cui, al parametro di domanda (EDP), verrà correlato il rilascio (LS) mediante curve di fragilità. Si tratta di una metodologia che mira a fornire uno strumento pratico per quantificare la probabilità di danno che una certa apparecchiatura può manifestare a seguito di un evento sismico.

1. Introduzione

Gli impianti industriali, in particolare quelli dei settori chimico, petrolchimico e della lavorazione del petrolio, sono sistemi complessi costituiti da numerosi componenti e apparecchiature interconnesse. L'interazione con gli eventi naturali estremi può quindi comportare l'innesco di incidenti con conseguenti danni a lavoratori, popolazione e ambiente. Per questo motivo la comunità scientifica ha dedicato notevoli sforzi alla ricerca nel contesto dell'analisi del rischio [1], specie quello sismico, negli impianti industriali cosiddetti a "Pericolo di Incidente Rilevante" (PIR). La ragione che ne ha motivato lo studio è legata all'estrema vulnerabilità sismica che gli

stabilimenti hanno mostrato a valle di eventi tellurici; ne sono un esempio testimonianze storiche come il terremoto di Kocaeli del 1999, di Northridge del 1994, di Kobe del 1995, di Hokkaido del 2003 e di Tohoku del 2011. Si tratta di eventi tutti accomunati dall'estrema dannosità sorta nelle diverse aree degli impianti colpiti.
In tal senso una fonte di rischio sismico rilevante è rappresentata dalla presenza dei serbatoi di stoccaggio, in gran parte attribuibile alle sostanze pericolose immagazzinate, la cui dispersione può comportare danni ambientali e l'innesco di scenari catastrofici.
Nel caso dei serbatoi non ancorati sono molteplici i meccanismi di danneggiamento che possono portare alla perdita di contenimento; è per questo motivo che nel tempo sono stati adottati diversi approcci per studiarne il comportamento, come ad esempio i metodi analitici semplificati [2]. Lavori come [3] e [4], forniscono preziose informazioni proprio sulla modellizzazione semplificata e l'analisi probabilistica dei serbatoi di stoccaggio non ancorati.
Dati quindi i vantaggi pratici di tale approccio di modellizzazione (svolgimento di analisi affidabili in finestre temporali ridotte), il presente lavoro ha come obiettivo la valutazione della vulnerabilità sismica di un caso di studio attraverso proprio tale strategia, inquadrando come meccanismi di danno, legati alla perdita di contenimento, lo scivolamento alla base e il sollevamento dell'apparecchiatura.

2. Modellazione semplificata

Per applicazioni pratiche, l'analisi dinamica di un serbatoio può essere effettuata utilizzando l'approccio generalizzato a un singolo grado di libertà (SDOF, [5]).
Questo prevede la suddivisione dell'eccitazione strutturale in due componenti principali, definite come moto "impulsivo", (dato dalla combinazione solidale tra la vibrazione strutturale e del liquido), e "convettivo" (associato invece alla formazione del moto ondoso superficiale – onda di sloshing). Tali componenti possono essere analizzate indipendentemente (Figura 1(a)), poiché la frequenza naturale dello sloshing è significativamente inferiore a quella impulsiva. Nella maggior parte dei serbatoi, il primo modo (dato dalle due componenti) eccita la quasi totalità della massa liquida, per questo motivo, associare la vibrazione sismica a queste due sole modalità è generalmente sufficiente per ottenere risultati affidabili.

2.1 Meccanismi di risposta sismica e approcci di modellazione

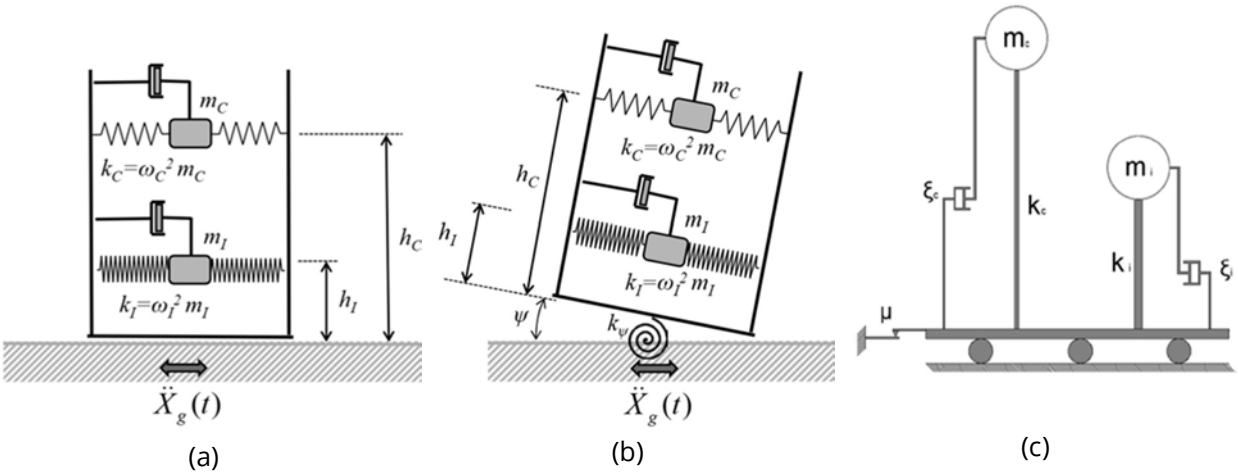


Figura 1. (a) modello semplificato di serbatoi; (b) modello meccanismo di uplifting; (c) modello meccanismo di sliding

I serbatoi in acciaio non ancorati sono ampiamente utilizzati negli impianti industriali solitamente per lo stoccaggio di grandi volumi di sostanze che possono essere pericolose e altamente infiammabili. Si tratta di una categoria di apparecchiatura particolarmente vulnerabile a diversi meccanismi che possono verificarsi durante forti eventi sismici, come fenomeni di fessurazione per instabilità, distacco dei tubi dal mantello, incendi innescati dall'urto del tetto galleggiante [6]. Sebbene questi differiscano in termini di fisica del fenomeno, possono tutti essere ricondotti allo spostamento relativo tra la base del serbatoio e il terreno, declinato in termini di scorrimento orizzontale (sliding) e sollevamento (uplifting). La modellazione semplificata di entrambi può avvenire abbinando al modello SDOF opportune condizioni di vincolo, che si prefigurano nel primo caso in una molla rotazionale [7], Figura 1(b), opportunamente progettata per riprodurre la relazione non lineare tra il momento di ribaltamento e la corrispondente rotazione della base.
Lo scorrimento viene simulato attraverso un carrello la cui attivazione ha luogo solo a seguito del superamento dell'azione di attrito orizzontale da parte della sollecitazione tagliante [4], Figura 1(c).
Comprendere e modellare accuratamente meccanismi di questo tipo è fondamentale per valutare la vulnerabilità sismica e quindi cercare di prevenire la perdita di contenimento.

3. Analisi di fragilità di serbatoi di stoccaggio

Una parte integrante della valutazione della vulnerabilità di tali apparecchiature è rappresentata dall'analisi di fragilità, la quale prevede un'ulteriore elaborazione dei risultati in output dall'analisi dinamica.

Si tratta di un approccio volto alla stima probabilistica del danno attraverso strumenti definiti curve di fragilità, le quali permettono di valutare proprio la probabilità di danno data l'intensità dell'evento sismico. Operativamente vengono calcolate attraverso l'opportuna selezione e combinazione di tre categorie di parametri: lo stato limite (LS), la misura di intensità (IM), e il parametro di domanda ingegneristica (EDP). Mentre quest'ultimo è intrinsecamente legato al modello e al suo comportamento strutturale (es. spostamenti, deformazioni, sollecitazioni), l'IM può essere selezionato da un'ampia gamma di parametri che descrivono l'evento sismico [8]. In virtù di ciò, di fondamentale importanza è il rispetto della coerenza dimensionale tra EDP e LS: entrambi devono essere riferiti alla stessa grandezza fisica a cui è possibile associare il danno.

3.1 Selezione dello stato limite

Le sostanze immagazzinate all'interno dei serbatoi vengono trasportate attraverso tubazioni collegate alle apparecchiature; tuttavia, la differenza in termini di rigidezze e masse dei due sistemi comporta un'estrema vulnerabilità da parte di queste ultime, in particolare qualora non siano in grado di dissipare l'energia sismica. La conseguenza inevitabile di ciò è la perdita di contenimento (LoC) del materiale trasportato.

Osservazioni sperimentali ([9], [10], [11]) hanno dimostrato che il rilascio a seguito di tali eventi è causata principalmente dal guasto di specifici componenti delle tubazioni. Questi includono la rottura dell'ugello, la fessurazione dei gomiti e l'apertura dei giunti flangiati. Pertanto, monitorando quei parametri indicativi dello sviluppo della perdita, è possibile definire lo stato limite (si tratta quindi del valore di sollecitazione a cui è sottoposto l'elemento quando si verifica il guasto).

3.2 Analisi Cloud

Il nome deriva dalla nuvola di punti (campioni della statistica) volta all'individuazione della retta di regressione da cui derivano i parametri necessari a costituire la curva di fragilità. Affinché questo abbia luogo è fondamentale assumere che la distribuzione probabilistica entro cui i dati si collocano sia di tipo log-normale; in questo modo la probabilità di superamento dello stato di danno può essere calcolata come segue:

$$P(EDP > LS|IM) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(LS_m) - \ln(D_m)}{\sqrt{\beta^2{}_{d|IM} - \beta^2{}_{LS}}}\right) \quad (4.1)$$

dove Φ rappresenta la funzione di distribuzione cumulata (CDF), LS_mè la stima mediana dello stato limite strutturale, D_m è la stima mediana della domanda ottenuta dalla regressione (per mezzo dei parametri a e b), $\beta_{d|IM}$ è la dispersione tra i valori di

EDP e la domanda ottenuta dalla regressione e β_{LS} è la dispersione dei valori ottenuti per lo stato limite.
Di seguito vengono proposte le relazioni che conducono alla derivazione delle grandezze appena descritte:

$$D_m = a(IM)^b \tag{4.2}$$

$$\ln(D_m) = \log(a) + b \cdot log(IM) \tag{4.3}$$

$$\beta_{d|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[\ln(d_i) - \ln(a(IM)^b{}_i)]^2}{n-2}} \tag{4.4}$$

4. Presentazione di un caso studio

Nel presente studio viene riportato il caso di un serbatoio tozzo (H/R=0.783), non ancorato, in metallo e a tetto fisso, per il quale viene predisposta un'analisi di vulnerabilità nei confronti della perdita di contenimento della tubazione collegata coerentemente con quanto riportato nelle sezioni appena trattate. In particolare, verranno approfondite le risposte sismiche della stessa apparecchiatura ai meccanismi di sollevamento e scorrimento sfruttando un approccio di modellazione semplificata a masse concentrate, quindi una volta individuato il corrispondente fenomeno di danno (LS), si procederà allo sviluppo dell'analisi di fragilità.

4.1 Descrizione strutturale dell'apparecchiatura

Il serbatoio oggetto di studio appartiene a un impianto petrolchimico situato idealmente in Sicilia; si tratta del sito di Priolo Gargallo, una delle zone più attive d'Italia in termini di sismicità. Le dimensioni principali dell'apparecchiatura sono un'altezza di 19.95 m, un diametro di 46.9 m e uno spessore del mantello che va da 6.4 mm (interfaccia con il tetto) a 17.7 mm (alla base). Il materiale stoccato è acqua (ρ=1000 kg/m^3) con un livello di riempimento pari al 92.1% dell'altezza, mentre le caratteristiche dell'acciaio strutturale prevedono come valore di snervamento 235 Mpa. Le masse in gioco sono di 300 ton e 46 ton rispettivamente per mantello e tetto fisso, mentre di 34*10^3 ton per il liquido.
Si considera come evento associato al LoC l'apertura dell'unione flangiata posta lungo lo sviluppo della tubazione per effetto delle sollecitazioni innescate dai cinematismi sismici dell'apparecchiatura. La stessa tubazione ha un diametro di 8 pollici e risulta parzialmente interrata, vincolo tale da rendere estremamente vulnerabile l'unità nei confronti degli spostamenti relativi tra serbatoio e terreno: si presuppone che il punto di ingresso sotterraneo del tubo possa essere identificato come un vincolo di incastro e che il guscio del serbatoio sia indeformabile, così come il corpo della tubazione. L'apertura della flangia risulta quindi l'unica forma di deformazione in grado di dissipare l'energia sismica trasmessa.

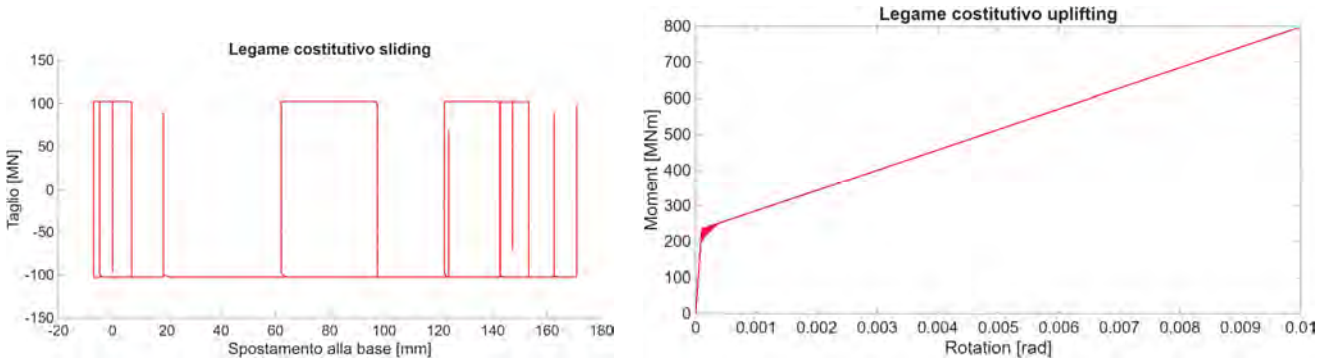
4.2 Modellazione strutturale

Come anticipato, il modello adottato per simulare i due meccanismi, prevede la suddivisione di masse e rigidezze in due contributi, quello impulsivo e convettivo coerentemente ai dettami del modello SDOF (Tabella 1).

Componenti	Impulsiva	Convettiva
Massa [kg]	mi = $15.52*10^6$	mc = $18.9*10^6$
Altezza [m]	hi = 8.09	hc = 11.6
Rapporto di smorzamento [-]	ξi = 2%	ξc = 0.5%
Periodo [s]	Ti = 0.34	Tc = 11.64
Rigidezza [N/m]	Ki = $5.32*10^9$	Kc = $1.28*10^7$

Tabella 1. Caratteristiche dinamiche del serbatoio

L'innesco dei vincoli alla base associati ai due modelli ha luogo rispettivamente quando viene superata la forza di attrito statico di 100 MN (per lo sliding, Figura 2(a)) ed il momento ribaltante di 250 MNm (per l'uplifiting, Figura 2(b)).



(a) (b)

Figura 2. (a) legame costitutivo vincolo sliding; (b) legame costitutivo vincolo uplifting

4.3 Analisi dinamica e calcolo delle curve di fragilità

Il modello è stato sottoposto a forzante sismica utilizzando 300 accelerogrammi ottenuti dall'Archivio Accelerometrico Italiano (ITACA). Di questi vengono proposti i risultati in termini di time histories (nei confronti sia dello scorrimento alla base che del sollevamento) per l'input accelerometrico più intenso (Figura 3(a)).

I valori di spostamento di picco registrati nelle varie time histories e le accelerazioni spettrali medie (SaAV: 0.2*Ti - 3*Ti) verranno utilizzati rispettivamente come EDP e IM nell'analisi di fragilità, mentre Il LS è rappresentato dai risultati ottenuti a valle della campagna descritta in [12], i quali conducono ad un valore di apertura della flangia connesso alla perdita di contenimento di 0.6 mm.

Quanto di seguito proposto mostra i risultati delle analisi dinamiche (Figura 3 (c), Figura 3 (d)) e le curve di fragilità (Figura 3 (e), Figura 3 (f)) derivanti dall'elaborazione

delle stesse. L'osservazione dello spettro risulta particolarmente indicativa a giustificare l'elevata risposta in spostamento ottenuta nelle due time histories: l'accelerazione spettrale corrispondente al periodo impulsivo rappresenta il principale contributo all'eccitazione sismica (Figura 3 (b)).
Ciò che emerge invece dal confronto delle curve di fragilità è una tendenza da parte del sollevamento di registrare probabilità di danno inferiori a parità di intensità sismica. Si tratta tuttavia di un'approssimazione legata ai limiti dell'approccio di modellazione: un'analisi completa del meccanismo di sollevamento dovrebbe consentire di tener conto anche delle conseguenze relative alla deformazione del mantello e della tubazione (ampliando la zona di interesse all'intero tratto piuttosto che alla sola unione flangiata). La modellazione del fenomeno attraverso elementi shell permetterebbe di tenere conto proprio di taluni aspetti di non linearità, il cui contributo nel computo della dannosità non può essere di fatto trascurato.

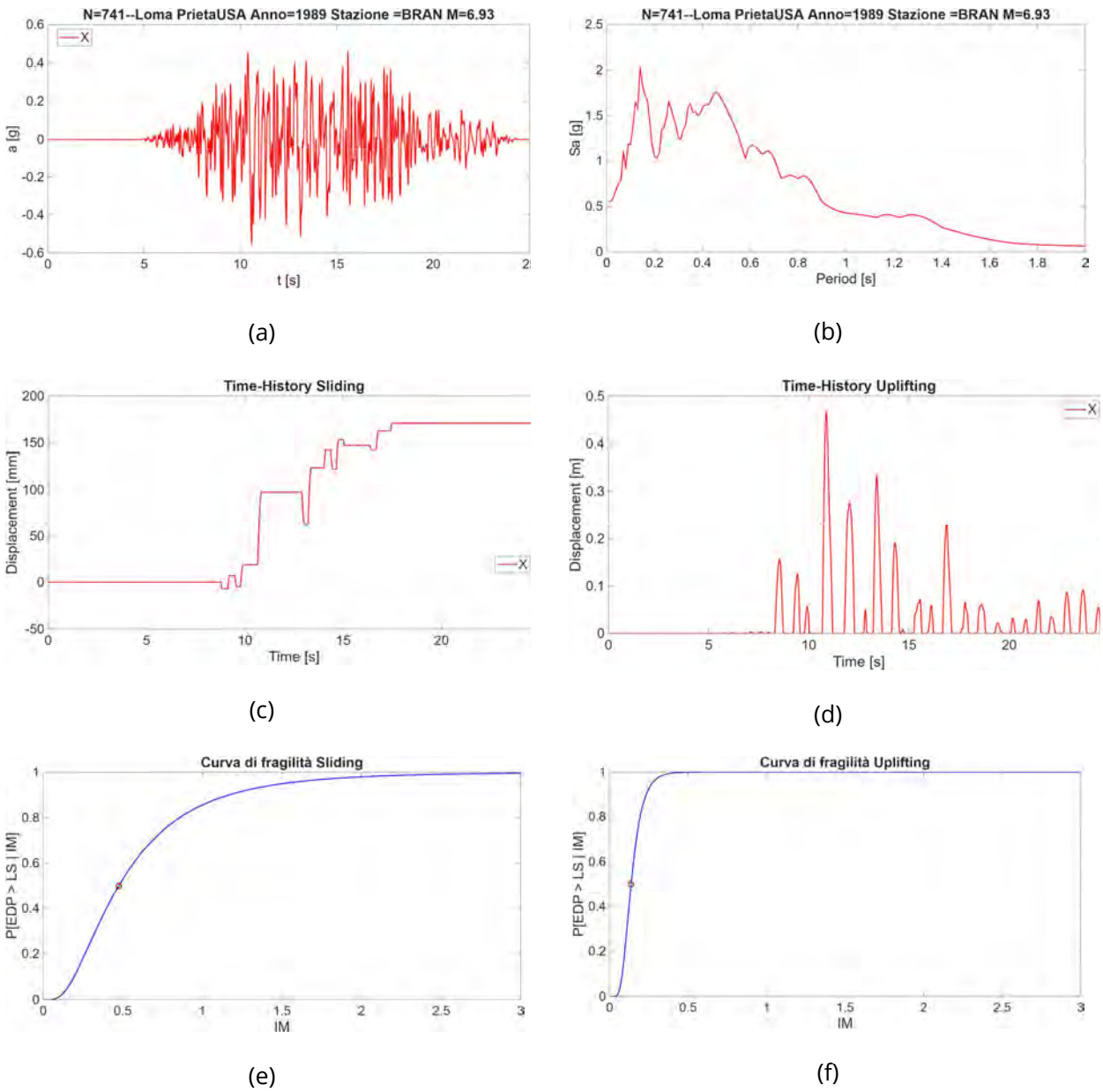


Figura 3. (a) accelerogramma di riferimento; (b) spettro di risposta corrispondente all'accelerogramma considerato; (c) time history sliding; (d) time history uplifting; (e) curva di fragilità sliding; (f) curva di fragilità uplifiting

5. Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è quello di sensibilizzare sia la comunità scientifica che gestori circa le criticità del comportamento sismico in questa categoria di apparecchiature. Sebbene lo scenario non rappresenti una minaccia sostanziale quando le condutture collegate sono in superficie, la situazione diventa più critica quando le tubazioni, oltre ad essere interrate, risultano collegate a serbatoi non ancorati. Sebbene i sistemi di tubazioni sotterranee siano progressivamente in fase di eliminazione per via delle normative ambientali e di inquinamento, numerose installazioni esistenti utilizzano ancora questa configurazione. In taluni casi, è quindi

essenziale tenere conto della vulnerabilità in termini di perdita di contenimento. Inoltre, sebbene i modelli semplificati offrano soluzioni pratiche per la progettazione, non riescono a cogliere le non linearità geometriche locali dei materiali. Per questo motivo l'utilità di taluni strumenti si prefigura soprattutto a valle di validazione mediante modellazione sofisticata ad hoc (il cui costo computazionale e tempo di analisi è di diversi ordini di grandezza superiore).
Questo lavoro fornisce quindi la base per un'indagine maggiormente approfondita sulla vulnerabilità dei serbatoi e delle rispettive componenti.

Bibliografia

[1] G. Antonioni, G. Spadoni, and V. Cozzani, "A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events," J. Hazard. Mater., vol. 147, no. 1–2, 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.12.043.

[2] G. W. Housner, "Dynamic pressures on accelerated fluid containers," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 47, no. 1, 1957, doi: 10.1785/bssa0470010015.

[3] F. Paolacci, D. Corritore, A. C. Caputo, O. S. Bursi, and B. Kalemi, "A probabilistic approach for the assessment of LOC events in steel storage tanks under seismic loading," in *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2018. doi: 10.1115/PVP2018-84374

[4] B. Kalemi, M. Farhan, and D. Corritore, "Sliding response of unanchored steel storage tanks subjected to seismic loading," in *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2019. doi: 10.1115/PVP2019-93310.

[5] E. 1998-4, "Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines," *Eurocode 8: Desing of structures for earthquake resistance*, vol. 4, no. 2006, 2006.

[6] M. Salimbeni, M. De Angelis, and M. Ciucci, "Analysis of the Behaviour of the Floating Roof in a Cylindrical Storage Tank Subjected to Seismic Excitation for the Mitigation of Fire Risk," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 104, 2023, doi: 10.3303/CET23104019.

[7] M. Vathi and S. A. Karamanos, "Simplified model for the seismic performance of unanchored liquid storage tanks," in *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2015. doi: 10.1115/PVP2015-45695.

[8] H. N. Phan, F. Paolacci, V. M. Nguyen, and P. H. Hoang, "Ground motion intensity measures for seismic vulnerability assessment of steel storage tanks with unanchored support conditions," *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, vol. 143, no. 6, 2021, doi: 10.1115/1.4051244.

[9] V. La Salandra, R. Di Filippo, O. S. Bursi, F. Paolacci, and S. Alessandri, "Cyclic response of enhanced bolted flange joints for piping systems," in *American*

Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 2016. doi: 10.1115/PVP2016-63244.

[10] M. Wieschollek, B. Hoffmeister, and M. Feldmann, "Experimental and numerical investigations on nozzle reinforcements," in *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2013. doi: 10.1115/PVP2013-97430

[11] S. A. Karamanos, E. Giakoumatos, and A. M. Gresnigt, "Nonlinear Response and Failure of Steel Elbows Under in-Plane Bending and Pressure," *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, vol. 125, no. 4, 2003, doi: 10.1115/1.1613949.

[12] O. S. Bursi, M. S. Reza, and A. Kumar, "Seismic Performance of Bolted Flange Joints in Piping Systems for Oil and Gas Industries," *15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon Portugal*, vol. 8, 2012.

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

C. Mazzini[1]

[1]Arpae- Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente ed Energia - Presidio Tematico Regionale Impianti a Rischio di Incidente Rilevante (PTR RIR)

Sommario

L'Emilia Romagna, regione caratterizzata da un elevato rischio idrogeologico, ha affrontato negli ultimi anni scenari alluvionali di eccezionale gravità. L'analisi si focalizza sui principali eventi recenti, evidenziandone la potenziale natura Na-Tech e le modalità di gestione dell'emergenza. Le pesanti alluvioni occorse dal 2023 ad oggi sono descritte sinteticamente in termini di allerte meteo-idrogeologica-idraulica, esondazione fiumi e conseguenti frane e allagamenti, con particolare attenzione agli effetti sugli insediamenti artigianali ed industriali. Viene approfondita, nello specifico la gestione dell'emergenza alluvionale in provincia di Ravenna, evidenziando l'importanza della comunicazione istituzionale e del sistema di informazione alla popolazione per la mitigazione del rischio.

Lo studio presenta inoltre tre casi emblematici: il primo analizza la gestione del rischio nel sito industriale e nel contesto urbano di Ravenna, il secondo esamina la gestione emergenziale di un impianto di biogas ricadente in una area a elevata pericolosità idraulica; il terzo, infine, riguarda un evento incidentale (incendio con successiva esplosione) presso un'azienda a rischio di incidente rilevante(RIR).Quest'ultimo caso risulta di particolare interesse poiché verificatosi in concomitanza di forti piogge, nell'intervallo temporale tra due significativi episodi alluvionali particolarmente gravosi.

L'analisi dei casi studio ha messo in luce sia le criticità nella gestione emergenziale, sia i punti di forza del modello organizzativo adottato.

L'esperienza acquisita ha permesso di trarre importanti lezioni apprese, sia tecniche che gestionali, che hanno guidato la fase post emergenziale, portando alla realizzazione di nuovi sistemi di difesa strutturale. Tali insegnamenti sono stati concretamente applicati, al territorio e alle realtà industriali ivi localizzate.

1. Rischio idrogeologico in Emilia Romagna

1.1 Normativa di riferimento

La Direttiva 2007/60/CE e il Decreto Legislativo 49/2010 rappresentano i pilastri normativi per la gestione del rischio alluvione. Tali norme definiscono tre scenari di probabilità relativi ai corsi d'acqua (RP - Rete Principale e RSCM - Rete Secondaria Montuosa Collinare): scenario di alluvione ad alta probabilità (P3), scenario di

alluvione a media probabilità (P2), scenario di alluvione a bassa probabilità (P1). Nella regione Emilia Romagna, le mappe di pericolosità idraulica associano a tali scenari i tempi di ritorno, rispettivamente di 20-50 anni (scenario P3) e 100-200 anni (scenario P2), evidenziando come circa il 50% del territorio pianeggiante sia di natura alluvionale. In questo contesto, la Provincia di Ravenna emerge come una delle aree a maggior rischio idraulico a livello nazionale.

1.2 Vulnerabilità del territorio-eventi alluvionali

La vulnerabilità del territorio è stata confermata dagli eventi meteorologici estremi verificatisi nel periodo 2023-2024 e nel 2025: due eventi alluvionali a poca distanza l'uno dall'altro nel maggio 2023 ove si sono registrate precipitazioni cumulative superiori a 450 mm e un evento nel settembre 2024 con circa 350 mm in un'unica giornata.

I fenomeni di intense e prolungate precipitazioni del 2023 e 2024 hanno causato esondazioni fluviali, rotte arginali e movimenti franosi, con gravi impatti su centri abitati e aree industriali. Nel maggio 2023, l'esondazione dei fiumi, la rottura degli argini dei fiumi Sillaro, Santerno, Senio, Lamone e Savio e la compromissione del sistema idrico secondario (canali) con lo straripamento della rete di canali consortili (Romagna e Romagna Occidentale e CER) hanno portato a un elevato rischio industriale Natech per le aziende ubicate nelle province di Ravenna, Bologna e Forlì. Il 2025 invece è stato caratterizzato da intense precipitazioni, allerte ricorrenti, ma senza fenomeni alluvionali su vasta scala.

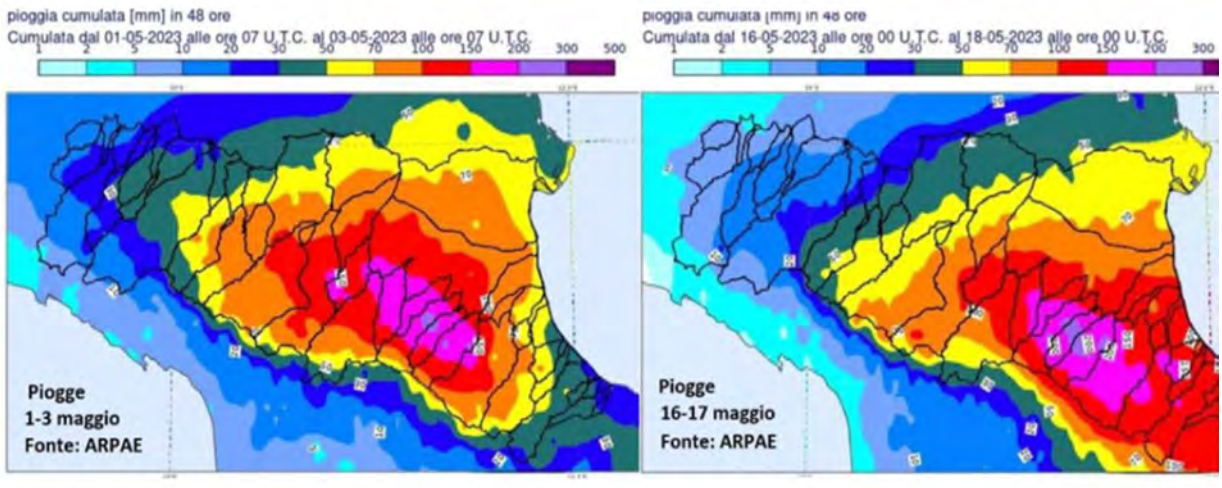


Figura 1. Mappa 2023 delle precipitazioni cumulate nelle 48 ore relative all'evento del 1-3 maggio (a sinistra) e del 16-17 maggio (a destra). Fonte: ARPAE.

2. Criticità Na-Tech e modalità di gestione, controllo e risposta in emergenza

2.1 Sito industriale multisocietario di Ravenna

Il sito Industriale multisocietario di Ravenna ospita al proprio interno nove stabilimenti soggetti alla Direttiva Seveso, ai quali se ne aggiungono altri cinque situati fuori del perimetro del sito. L'area industriale è situata tra due aree naturali protette denominate Piallassa Baiona e Piallassa Piomboni, a pochi chilometri dal centro abitato e insiste lungo il canale navigabile Candiano; quest'ultimo collega il sito al mare, ed è fondamentale per il trasferimento di materie prime e prodotti finiti. Durante l'evento critico dei primi di maggio (1-3 maggio 2023), le acque di piena del canale via Cupa avrebbe potuto riversarsi nel canale di alimentazione degli impianti (acque utilizzate per il raffreddamento, l'antincendio, l'acqua di processo, ecc.) compromettendo gli stessi a causa dell'elevata torbidità e rischiando di allagare l'intero sito industriale. Tempestive le allerte meteo-idrogeologiche emesse dal servizio idro-meteo-clima di Arpae e il coordinamento del Centro Coordinamento Soccorsi (CCS) presieduto dal Prefetto di Ravenna, in risposta al peggioramento delle condizioni meteorologiche. Quest'ultimo con comunicazione scritta ha ordinato alle aziende a rischio di incidente rilevante (RIR) di attuare tutte le misure di sicurezza necessarie per prevenire il rilascio di sostanze pericolose in caso di alluvione.
L'adozione di misure di sicurezza fisiche (strutturali) e gestionali (procedurali) ha permesso di preservare l'integrità del polo industriale soggetto alla direttiva seveso.

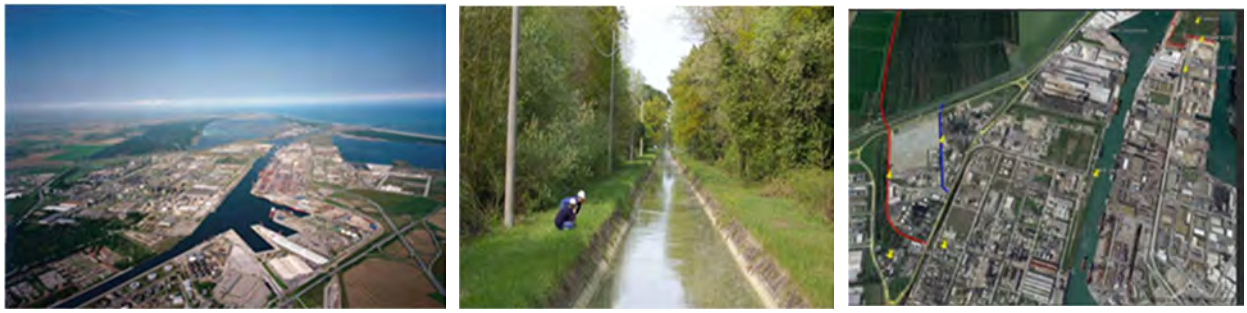


Figura 2. Sito industriale - canale di alimentazione degli impianti (linea rossa)
Fonte: Archivio web, Immagine di repertorio, Elaborazione da Google Eart

Nello specifico è stato istituito il Comitato di Emergenza composto da tutti i direttori degli stabilimenti, al fine di coordinare la risposta in emergenza del polo industriale. Sono state immediatamente attivate le procedure di emergenza di sito per la gestione di una possibile alluvione "da terra" (canale via Cupa) e quella per l'alluvione dal canale Candiano, per prevenire l'ingressione marina. Le procedure prevedevano il posizionamento di paratie a protezione dei varchi lungo il canale Candiano (rischio alluvione da mare), la disposizione di sacchi di sabbia lungo l'argine del canale di alimentazione acqua degli impianti (rischio alluvione da terra), la messa in sicurezza degli impianti, la sospensione della produzione e la pianificazione della sequenza di

arresto degli impianti stessi. Parallelamente, è stata mantenuta una comunicazione continua tra il CCS istituito dalla Prefettura e il Comitato di Emergenza del sito industriale.
Infine, dopo piogge intense ed ininterrotte protrattesi per diversi giorni, nonostante la costante gestione delle acque nella rete dei canali consortili da parte dei Consorzi di Bonifica e della rete fluviale da parte della Protezione Civile Regionale, si è reso necessario emettere un ordine per la rottura controllata dell'argine del canale "via Cupa". Tale intervento d'emergenza è stato disposto per prevenire l'allagamento del sito industriale e del centro abitato di Ravenna, contestualmente al posizionamento di argini di terra per proteggere la città.
Data la gravità dello scenario, oltre alla costante collaborazione della Protezione Civile regionale e nazionale, che ha consentito l'intervento a supporto da parte di diverse regioni d'Italia, è stata richiesta l'attivazione del Meccanismo di Protezione Civile dell'UE. In questo contesto, il portale web della Regione Emilia-Romagna, gestito dal Servizio Idro-Meteo-Clima dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia (ARPAE) e dalla Protezione Civile regionale, è stato fondamentale per la gestione delle allerte e delle emergenze. Il sito è stato progettato per unificare informazioni e dati necessari alla gestione del rischio, supportare le azioni delle autorità di Protezione Civile e informare la popolazione in tempo reale riguardo alle fasi di attenzione, preallarme, allarme per fenomeni quali alluvioni fluviali, frane e inondazioni improvvise, stato del mare e vento.
In fase post emergenziale (cosiddetto "tempo di pace"), sono state pianificate nuove misure strutturali. Tra queste, si cita il progetto sviluppato dal Consorzio di Bonifica della Romagna, già in fase esecutiva, per la costruzione di un canale di collegamento idraulico tra il canale "la Canala" di via Cupa e il canale parallelo di via Cerba, finalizzato alla deviazione delle acque durante eventi meteorologici estremi. L'opera insisterà su terreni agricoli che, durante l'alluvione del maggio 2023, furono inondati proprio a causa della rottura controllata dell'argine, effettuata per salvaguardare il sito petrolchimico e il centro abitato. Il progetto rappresenta, dunque, la capitalizzazione dell'esperienza acquisita e la trasformazione delle "lezioni apprese" in interventi di mitigazione permanente.

2.2 Aziende RIR ubicate nei Comuni di Cotignola e Bagnacavallo

Nei comuni di Cotignola e Bagnacavallo, quattro stabilimenti a Rischio di Incidente Rilevante dediti alla produzione di pesticidi, detergenti per la casa e allo stoccaggio del GPL, sono stati interessati da estesi allagamenti durante gli eventi del 1-3 maggio 2023 e del 17-18 maggio 2023.
La compromissione della resilienza territoriale successiva a tali episodi ha accentuato la vulnerabilità dell'area, determinando, in occasione delle forti piogge del 2024, il nuovo allagamento delle medesime quattro aziende. In entrambi gli scenari alluvionali, le aziende, allertate tempestivamente dal CCS, hanno attuato le procedure di emergenza previste dal sistema di gestione della sicurezza (SGS):

hanno disposto in luogo sicuro (piani elevati) le sostanze pericolose movimentabili, sospeso le attività ed evacuato il personale. In nessuno dei quattro casi si sono verificati rilasci di sostanze pericolose. I principali danni hanno riguardato apparecchiature critiche posizionate al piano di campagna, quali pompe, compressori, quadri elettrici e sistemi antincendio. Le misure migliorative messe in atto dai gestori già dal primo evento alluvionale, hanno riguardato in primis il *layout* di impianto, con la riprogettazione e il riposizionamento degli elementi critici in zone più sicure.

2.3 Impianto di Biogas sito nel Comune di Conselice

L'impianto di biogas di una azienda di Conselice, attiva nella trasformazione agroindustriale e nella produzione di energie rinnovabili, ricade in una area a elevata pericolosità idraulica, delimitata dai fiumi Sillaro, Santerno, Reno e interessata da alcuni dei principali canali di drenaggio. L'intera zona presenta una quota altimetrica particolarmente bassa e una morfologia depressa: lo stabilimento sorge in una "conca naturale", creata da secoli di bonifica, dove tendono a confluire tutte le acque derivanti da potenziali esondazioni dei fiumi Sillaro (sponda destra) e Santerno (sponda sinistra). Nel maggio 2023, il sito è stato colpito dall'evento alluvionale che ha comportato un battente d'acqua di 2-2,5 metri e un periodo di permanenza di circa tre settimane. Tutti i sistemi di alimentazione elettrica, incluso l'impianto di cogenerazione e le reti esterne (Terna per l'alta tensione e Enel per la media tensione), sono stati irrimediabilmente danneggiati, causando un blackout totale del sito fino a ottobre-novembre. Per il ripristino sono intervenute tre società specializzate in *disaster recovery* che hanno lavorato in loco con l'impiego di circa 600 persone fino al termine dell'estate. I danni diretti derivanti dall'evento alluvionale superano i 100 milioni di euro.

Il CCS della Prefettura di Ravenna ha gestito anche l'emergenza del sito di Conselice. Il sistema di drenaggio, sottoposto a uno stress estremo, è risultato particolarmente critico, specialmente presso l'impianto idrovoro della stazione Sabbadina, dove converge lo scarico aziendale. Tale situazione, ha reso necessario l'intervento delle autorità pubbliche e della Protezione Civile dell'UE, che ha fornito pompe più efficaci ad alta capacità (HCP- *High Capacity Pumping*). La dinamica dell'alluvione, caratterizzata da una lenta sommersione e da un deflusso ancora più lento, ha comportato la permanenza prolungata di acqua e detriti all'interno dei reparti produttivi e delle aree di stoccaggio. I serbatoi essendo prossimi al pieno carico e saldamente ancorati, non hanno subito fenomeni di galleggiamento. Non è stata rilevata alcuna contaminazione da rifiuti industriali. Arpae ha effettuato campionamenti mirati nelle acque limitrofe al parco serbatoi, nell'area di carico/scarico delle autocisterne e presso la banchina di carico della raffineria, analizzando la presenza di idrocarburi totali, oli e grassi e l'Escherichia coli nei fossi di guardia. I risultati delle analisi non hanno evidenziato segni di inquinamento

industriale; solo il BOD5 e il fosforo sono risultati leggermente superiori alle soglie di riferimento. Per quanto riguarda i canali limitrofi all'azienda, la criticità è stata causata dall'elevato carico organico e dall'anossia totale delle acque, che hanno determinato la morte della fauna ittica. L'elevato carico organico è stato attribuito alla presenza di reflui civili, conseguenti alla rottura della rete fognaria del Comune di Conselice.
I danni impiantistici sono stati ingenti. A seguito dell'alluvione, l'azienda ha implementato un sistema di difesa idraulica perimetrale progettato su misura. L'opera è costituita da una barriera composta da palancole in acciaio e argini in terra, integrata da tre paratoie scorrevoli ad azionamento idraulico. Tali paratoie, progettate per resistere ai carichi di piena previsti, vengono chiuse tempestivamente durante le fasi di allerta meteo per garantire l'impermeabilizzazione del sito e la continuità della protezione perimetrale.

3. Gestione dell'emergenza di un incendio in una azienda a rischio di incidente rilevante

L'evento è occorso in uno stabilimento Seveso situato a Faenza, la cui attività principale consiste nella lavorazione di prodotti e sottoprodotti della vinificazione.
L'incendio, con successiva esplosione ha coinvolto i serbatoi da 200 m^3 ciascuno situati nel magazzino di stoccaggio dell'alcol etilico. L'evento è configurabile come incidente rilevante per il superamento delle soglie specificate nell'Allegato 6 parte I del D.Lgs 105/15, in considerazione dei danni materiali subiti dallo stabilimento e per l'evacuazione della popolazione esterna per un raggio di 1,5 km.
La gestione dell'emergenza risulta particolarmente significativa, in quanto l'incidente si è verificato nell'intervallo tra due gravi fenomeni alluvionali del mese di maggio 2023, in concomitanza con forti e prolungate precipitazioni. E' Importante evidenziare che lo stabilimento non è stato interessato dalle inondazioni.
L'incendio, con successive esplosioni, si è sviluppato nel magazzino dedicato allo stoccaggio di sostanze infiammabili. Nel momento dell'evento, erano in corso la normale operatività dello stabilimento e le attività di manutenzione straordinaria su alcuni serbatoi all'interno del magazzino. Si è resa immediata l'attivazione del Piano di Emergenza Esterno (PEE) di cui all'art.21 del D.lgs 105/15, da parte del Prefetto, sentiti i vigili del fuoco e l'Arpae. La tempestività degli interventi del Corpo Nazionale dei vigili del Fuoco, di Arpae e di tutti i soggetti individuati dal PEE è stata garantita dal coordinamento strategico del CCS. Tutti gli operatori sono riusciti ad allontanarsi in tempo senza conseguenze e la popolazione presente è stata evacuata nel raggio di 1,5 km.



Figura 3. Vista aerea dell'aerea interessata dall'evento Fonte: Archivio web

Operativamente, a fini precauzionali, nel magazzino antistante a quello oggetto dell'incendio, è stato attivato l'impianto antincendio a pioggia (sprinkler), al fine di mantenere costantemente raffreddati i serbatoi contenenti sostanze infiammabili ivi presenti. Tuttavia, l'ingente volume di acqua utilizzato ha riempito i bacini di contenimento dei serbatoi dell'area; di conseguenza, i serbatoi con minor livello di riempimento, soggetti alla spinta idrostatica verso l'alto, hanno subito danneggiamenti a causa dei vincoli meccanici tra fasciame e basamento. Grazie al pronto intervento di un'autocisterna, la fuoriuscita di prodotto da due serbatoi è stata prontamente contenuta. I serbatoi sono stati svuotati ed il liquido travasato in altri serbatoi lontani dalla zona di pericolo.

3.1 Incidente tra due alluvioni – criticità e misure precauzionali

L'ingente quantità di acqua utilizzata per lo spegnimento e la fuoriuscita dei prodotti dai serbatoi hanno determinato il sovraccarico del sistema di depurazione. Tutte le acque sono infatti state collettate al depuratore aziendale, che si è trovato a gestire un carico organico anomalo. Grazie all'utilizzo di vasche di lagunaggio, è stato comunque possibile mantenere in efficienza il sistema ossidativo, garantendo allo stesso tempo l'approvvigionamento idrico all'impianto antincendio.

L'incidente si è verificato tra due importanti fenomeni alluvionali che hanno colpito duramente il territorio sul quale è presente lo stabilimento: il primo (2-3 maggio), occorso pochi giorni prima dell'incendio, pur nella sua negatività, ha paradossalmente "favorito" il pronto intervento dei Vigili del Fuoco, già mobilitati in un'area limitrofa per la gestione post-alluvione. Il secondo avvenuto dopo circa dieci giorni (16-17 maggio), a causa delle intense e ininterrotte precipitazioni, ha complicato ulteriormente la gestione delle acque del depuratore aziendale, già messo a dura prova. In questa fase, il Centro di Coordinamento Soccorsi (CCS) della Prefettura di Ravenna ha adottato importanti misure precauzionali, tra cui la realizzazione di sbarramenti in terra nei canali consortili per contenere lo

sversamento nell'ambiente della massa critica e delle acque antincendio, consentendone il successivo recupero tramite autospurghi

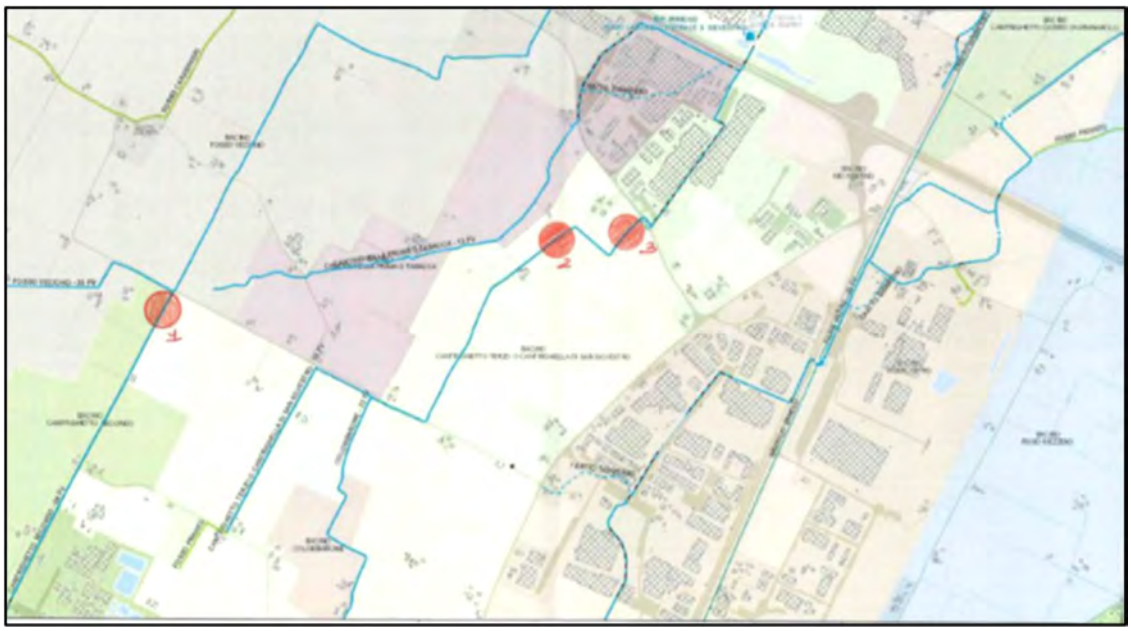


Figura 4. Sbarramenti in terra dei corsi d'acqua (rosso). Fonte: di repertorio

Nel corso del periodo emergenziale sono state adottate tutte le misure gestionali necessarie per riportare l'attività del sistema di trattamento delle acque reflue alle normali condizioni operative: inoculo dei fanghi, interruzione di quasi tutti i conferimenti e controllo continuo dei parametri di conduzione. La massa critica e le acque di spegnimento contenente schiuma biodegradabile è stata convogliata, tramite la rete fognaria interna, alla vasca di raccolta delle acque di dilavamento, e lì segregata. È stato prelevato un campione per determinarne le caratteristiche e stabilire il processo di trattamento più appropriato.
Per quanto concerne la matrice ambientale, i dati di monitoraggio rilevati da ARPAE, escludono fenomeni di inquinamento dell'aria conseguenti alla dispersione dei fumi di combustione dell'incendio o alla dispersione di sostanze pericolose. Non risultano danni permanenti o a lungo termine agli habitat terrestri, di acqua superficiale, alla falda acquifera o alle acque sotterranee.

4. Conclusioni: gestione dell'emergenza e resilienza alla vulnerabilità delle inondazioni

Il susseguirsi degli scenari alluvionali ha rappresentato, da un lato un'importante dimostrazione di efficace gestione dell'emergenza esterna in presenza di rischio Na-Tech, e, dall'altro, ha permesso di delineare fondamentali lezioni apprese, sia tecniche che gestionali.
Il successo nella messa in sicurezza del sito petrolchimico, delle sostanze presenti nelle aziende e del territorio, conferma che la collaborazione pubblico-privato costituisce la chiave di volta per la resilienza del sistema industriale e territoriale.

L’attivazione di una sinergia senza precedenti tra gestori, attori locali, nazionali e internazionali ha elevato la gestione dell’emergenza a modello di “*governance* della sicurezza integrata”. In tale modello, un ruolo strategico è stato svolto dalla comunicazione istituzionale e dall’informazione alla popolazione. L’utilizzo di piattaforme digitali, come il portale regionale gestito da Arpae e Protezione Civile, ha permesso la diffusione in tempo reale delle allerte e dei comportamenti di autoprotezione da adottare, divulgati anche dal CCS. La capacità di trasformare dati tecnici complessi in informazioni accessibili per i cittadini si è dimostrata un fattore determinante per la mitigazione del rischio sociale, integrando sicurezza fisica degli impianti con la consapevolezza della comunità.
Nella regione Emilia-Romagna, le mappe di pericolosità idraulica associano a tali scenari i tempi di ritorno di 20-50 anni (scenario P3) e 100-200 anni (scenario P2), evidenziando come circa il 50% del territorio pianeggiante sia di natura alluvionale. Tuttavia, l’attuale variabilità climatica pone in discussione l’affidabilità di tali parametri storici: l'evidenza dei fatti dimostra che eventi classificati come rari si stanno verificando con una “frequenza quasi annuale”. Ciò suggerisce che le serie storiche possano non essere più rappresentative dell'attuale regime pluviometrico e idrologico regionale.
In questo contesto, appare improrogabile una nuova gestione del territorio supportata dalla pianificazione di nuove misure strutturali. Lo sviluppo di progetti per la costruzione di canali di collegamento idraulico, finalizzati alla deviazione delle acque durante eventi estremi, rappresenta un esempio concreto di salvaguardia degli asset industriali e dei centri abitati, capitalizzando l’esperienza acquisita durante la gestione dell’emergenza nel maggio 2023.
Parallelamente, le misure impiantistiche - gestionali migliorative, la realizzazione di barriere e sistemi di difesa perimetrale riflette la crescente resilienza delle realtà industriali locali, impegnate a mitigare l'esposizione al rischio idraulico e a preservare l'integrità dei siti produttivi. In conclusione, la cooperazione tra le Autorità preposte alla gestione idraulica, le Autorità Tecniche, le Autorità Competenti e la realtà industriale si dimostra un fattore di successo: solo attraverso un approccio integrato è possibile trasformare le lezioni apprese durante l'emergenza in soluzioni strutturali durature.

Bibliografia

[1] Direttiva 2012/18/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2012, relativa al controllo del pericolo 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*, L 197, 24 luglio 2012
[2] D.Lgs. 105/15 s.m.i 26 giugno 2015 - “Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose”

[3] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 7 dicembre 2022 Approvazione delle linee guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna e per la relativa informazione alla popolazione per gli stabilimenti soggetti alla direttiva 2012/18/UE :"Linee guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna" (parte 1), "Linee guida per l'informazione alla popolazione" (parte 2) e "Indirizzi per la sperimentazione dei piani di emergenza esterna" (parte 3) ai sensi dell'articolo 21, comma 7 del Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Serie Generale n. 39, 16 febbraio 2023

[4] Direttiva 2007/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2007, relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, L 288, 6 novembre 2007

[5] Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49. Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 77, 2 aprile 2010

Comportamento sismico delle colonne di processo

D. Corritore[1], S. Caprinozzi[1], F. Paolacci[2]

[1]SafePlant s.r.l. – Spin-off Università Roma Tre - Roma
[2]Dipartimento di ingegneria civile, informatica e delle tecnologie aeronautiche, Università Roma Tre - Roma

Sommario
Le colonne di processo, molto comuni negli impianti petrolchimici, sono contraddistinte da strutture verticali snelle che possono essere soggette ad azioni ambientali estreme come i terremoti. Uno studio attento del comportamento strutturale e della vulnerabilità agli eventi Na-tech di questo tipo di apparecchiature industriali è cruciale per garantire la loro integrità strutturale e di conseguenza la sicurezza dell'impianto nei confronti degli eventi naturali catastrofici, in accordo ai contenuti delle norme UNI-TS 11816-1:2021. A causa della loro geometria, delle caratteristiche strutturali e delle elevate pressioni di esercizio, le colonne possono essere considerate tra le principali fonti di innesco di un effetto domino in caso di gravi danneggiamenti strutturali. Per questo motivo, è indispensabile effettuare una valutazione accurata della loro vulnerabilità alle azioni esterne attraverso l'utilizzo di modelli numerici avanzati che consentano di simulare fedelmente il loro comportamento strutturale con particolare riferimento al giunto di collegamento alla base, elemento spesso trascurato ma determinante per la caratterizzazione della risposta globale di questa tipologia di apparecchiature. In questo studio, attraverso un modello agli elementi finiti non lineare, viene analizzato il comportamento strutturale di un caso studio tipico, una colonna in acciaio alta circa 26 metri. I risultati mostrano come una corretta modellazione del giunto di collegamento alla base della colonna influisca significativamente sulla sua risposta dinamica, con implicazioni dirette sulle sue caratteristiche di resistenza e di stabilità quando soggetta ad azioni ambientali estreme. Lo studio promuove una maggiore consapevolezza ingegneristica nelle fasi di determinazione della vulnerabilità di queste tipologie di strutture molto complesse.

1. Introduzione

La complessità delle operazioni e delle configurazioni strutturali presenti nell'industria di processo, le conseguenze che gli eventi naturali catastrofici, come terremoti o tornado, potrebbero produrre in termini di danni alle apparecchiature [1] con rilasci di sostanze pericolose (infiammabili, tossiche o esplosive) e impatti ambientali significativi, ha spinto la comunità scientifica a concentrarsi sullo sviluppo di metodologie per la valutazione del rischio negli impianti di processo ([2], [3], [4]) che necessariamente passano attraverso analisi di vulnerabilità delle singole apparecchiature. Tra le varie tipologie di industrie di processo, quelle petrolchimiche

rappresentano una categoria particolarmente vulnerabile poiché processano ingenti quantità di sostanze pericolose ad elevate pressioni e temperature ([5], [6]).
Tra le varie apparecchiature che sono presenti all'interno degli impianti petrolchimici, le colonne ricoprono un ruolo cruciale in quanto rappresentano il cuore del processo di separazione dei diversi componenti del petrolio greggio. La loro importanza deriva dal fatto che permettono di frazionare il petrolio greggio in vari prodotti, grazie alle diverse temperature di ebollizione dei componenti. Le colonne di processo sono da ritenersi strutture particolarmente snelle poiché caratterizzate da un importante sviluppo verticale e da una ridotta dimensione della sezione di base rispetto all'altezza della struttura stessa.



Figura 1. Tipici esempi di colonne di processo

Sono costituite principalmente da un mantello circolare formato da lastre sottili di acciaio saldate tra loro e da una gonna di supporto alla base, direttamente ancorata al plinto di fondazione e anch'essa costituita da lastre in acciaio, di ridotto spessore, saldate tra loro. Al loro interno, contengono numerosi piatti metallici sui quali si deposita parte del materiale trattato che, infine, si accumula sul fondo della colonna stessa. Lungo tutto il loro sviluppo verticale sono presenti diverse tubazioni che le percorrono verticalmente e delle piattaforme poste a differenti quote di altezza, utili per scopi manutentivi e necessarie per accedere alle varie quote di interesse. Sul mantello sono inoltre presenti alcuni passi d'uomo necessari per effettuare periodici interventi manutentivi. Il mantello è saldato direttamente alla gonna di base, di altezza e spessore variabile, solitamente di forma cilindrica ma spesso anche tronco-conica, che poggia direttamente su un plinto di fondazione in cemento armato. Il collegamento tra la gonna della colonna e il plinto di fondazione avviene mediante tirafondi in acciaio annegati nel getto di calcestruzzo, fissati mediante dei dadi alla flangia di base della gonna stessa. Solitamente questi tirafondi presentano una forma ad uncino per prevenire fenomeni di sfilamento delle barre. Viste le particolarità strutturali di una colonna di processo, la loro importanza nell'intero processo

produttivo, le potenzialità di innesco di un effetto domino associate alle caratteristiche geometriche, le elevate pressioni di esercizio correlate alla pericolosità e alla quantità delle sostanze processate, lo studio del loro comportamento strutturale diventa molto rilevante. Diviene così di estremo interesse valutare al meglio il processo di modellazione numerica affinché si possa riprodurre e simulare fedelmente il comportamento strutturale dell'apparecchiatura, soprattutto quando essa è soggetta ad un evento naturale catastrofico come un terremoto o un tornado. La modellazione agli elementi finiti di una colonna e dei relativi dettagli costruttivi richiede un'adeguata conoscenza del problema e la comprensione delle più opportune condizioni di vincolo. In effetti, come molto spesso avviene nel campo dell'ingegneria civile, assumendo che la rigidezza della flangia di base e dei tirafondi di ancoraggio sia sufficientemente elevata, si potrebbe immaginare di modellare un giunto di collegamento alla base con un vincolo di incastro. Ma questa assunzione non è purtroppo sempre corretta, specialmente nel caso delle colonne di processo, dove anche una piccola rotazione del giunto flangiato potrebbe determinare un comportamento dinamico totalmente differente. Di conseguenza, in questo articolo, viene illustrato il processo di modellazione strutturale di questo tipo di apparecchiature industriali con particolare riguardo proprio al collegamento alla base, che rappresenta una parte strutturale di dettaglio molto delicata nelle valutazioni di vulnerabilità sismica e dell'analisi del rischio di uno stabilimento RIR in accordo ai contenuti delle norme UNI-TS 11816-1:2021 [7].

2. I principali elementi geometrici e costruttivi di una colonna di processo

Gli impianti industriali rappresentano sistemi molto complessi e questa loro complessità è dovuta sia alla numerosità delle connessioni, delle apparecchiature e dei sistemi di emergenza presenti, che alla quantità e alle caratteristiche delle sostanze chimiche processate ad elevate temperature e pressioni. Gli impianti industriali in Italia sono stati perlopiù costruiti intorno alla metà del '900, dunque si tratta di opere obsolete, realizzate con normative ampiamente superate. Le colonne sono largamente presenti in un impianto petrolchimico, possono essere di bassa, media o elevata altezza ma tutte con geometrie particolarmente snelle poiché dotate di un rapporto tra l'altezza e il diametro della sezione generalmente compreso tra i valori 5 e 30. Questa configurazione geometrica le rende strutture particolarmente deformabili, a cui possono associarsi rotazioni non trascurabili della base della struttura e conseguentemente delle flange delle tubazioni collegate lungo lo sviluppo del mantello. Generalmente, si definiscono "basse" le colonne con altezza fino a 7 m mentre vengono definite "medie" le colonne dotate di altezza fino a 11 m. Le colonne "alte" possono invece arrivare ad altezze ragguardevoli anche fino a 40 m di altezza. La massa totale di una colonna di processo è composta principalmente dalla massa del materiale che la costituisce (mantello, passi d'uomo, etc..) e dalla massa dei liquidi contenuti al suo interno. Il mantello è realizzato con delle virole in acciaio saldate tra loro, di spessore massimo approssimativamente pari a qualche decina di millimetro. Le virole sulla parte superiore della colonna sono generalmente meno spesse delle

virole inferiori, in effetti il loro spessore è determinato dall'entità del peso sovrastante e dalle pressioni presenti all'interno della colonna, dovute ai processi di trasformazione. Per lo studio del comportamento strutturale di una colonna di processo occorre poi tenere in conto anche le masse degli elementi strutturali secondari e degli elementi ancillari, che a volte possono essere di entità non trascurabili come le scale, le piattaforme e tutti gli accessori esterni. Le linee di ingresso e fuoriuscita dei liquidi e dei gas sono ben collegate al mantello con dei giunti flangiati, ma generalmente la rigidezza e la massa delle tubazioni rispetto a quelle della colonna vera e propria può considerarsi trascurabile, per tale ragione a seconda dei casi, si può evitare di considerare il loro contributo nello studio dinamico del sistema.

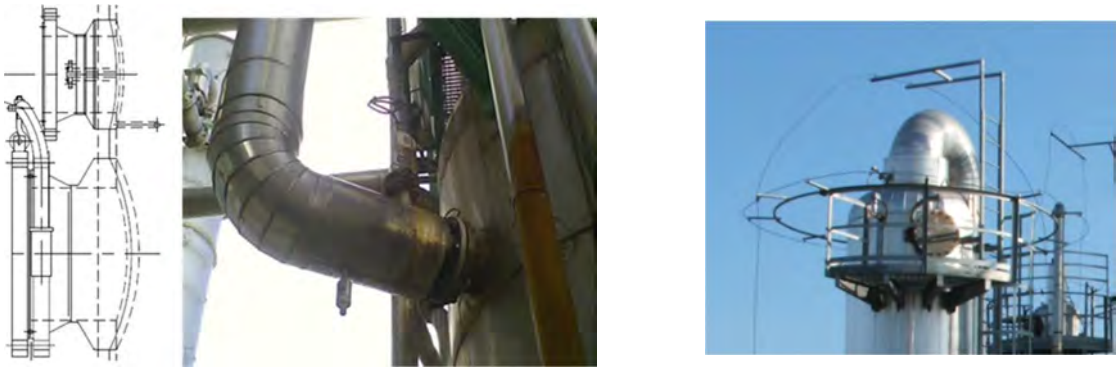


Figura 2. Esempi di giunti flangiati di attacco delle tubazioni al mantello e alla sommità di una colonna

Il sistema di ancoraggio alla base di una colonna di processo rappresenta invece un elemento strutturale assai rilevante poiché influenza in maniera determinante la sua resistenza e il suo comportamento dinamico. Esso dovrebbe essere progettato e realizzato per garantire stabilità, trasferire i carichi al sistema di fondazione e per assorbire le sollecitazioni dinamiche (vento e sisma). La sua configurazione è abbastanza standard nell'ingegneria degli impianti, il giunto di base è infatti costituito da una piastra circolare in acciaio, molto spessa, saldata alla colonna, che ha la funzione di trasferire i carichi in fondazione e di accogliere i tirafondi. Quest'ultimi sono costituiti da barre in acciaio ad alta resistenza, filettate e di grande di diametro, annegate direttamente nel plinto di fondazione, fissate tramite dadi e controdadi con funzione aggiuntiva di regolazione della verticalità.



Figura 3. Esempio di sistema di ancoraggio alla base di una colonna di processo

3. Modello numerico del giunto alla base e simulazione del comportamento strutturale

Una corretta determinazione del comportamento sismico di una colonna di processo richiede una modellazione numerica accurata del giunto di collegamento flangiato alla base. Presa come riferimento una colonna tipica negli impianti petrolchimici, alta 26 m e di diametro pari a 3.5 m, si è sviluppato un modello numerico non lineare, di dettaglio del giunto di collegamento alla base, con il software agli elementi finiti Abaqus [8]. Il giunto alla base, si è supposto realizzato da n.12 tirafondi M56 equidistanti e da una flangia di base costituita da due piastre, una superiore e una inferiore. Nello specifico, riguardo i materiali, sono stati definiti due tipi di acciaio, uno con comportamento perfettamente elastico attribuito alla gonna della colonna e alla flangia di base, e uno invece con comportamento elasto-plastico in grado di simulare la plasticizzazione e la conseguente rottura, impiegato per i tirafondi. Il calcestruzzo del plinto di base è stato definito mediante l'utilizzo di un materiale in grado di catturare e riprodurre le fessurazioni sia a trazione che a compressione. Nella figura seguente sono riportate le parti strutturali principali del modello, la gonna con la flangia di collegamento, la vista di uno dei tirafondi e quella del plinto in calcestruzzo di fondazione.

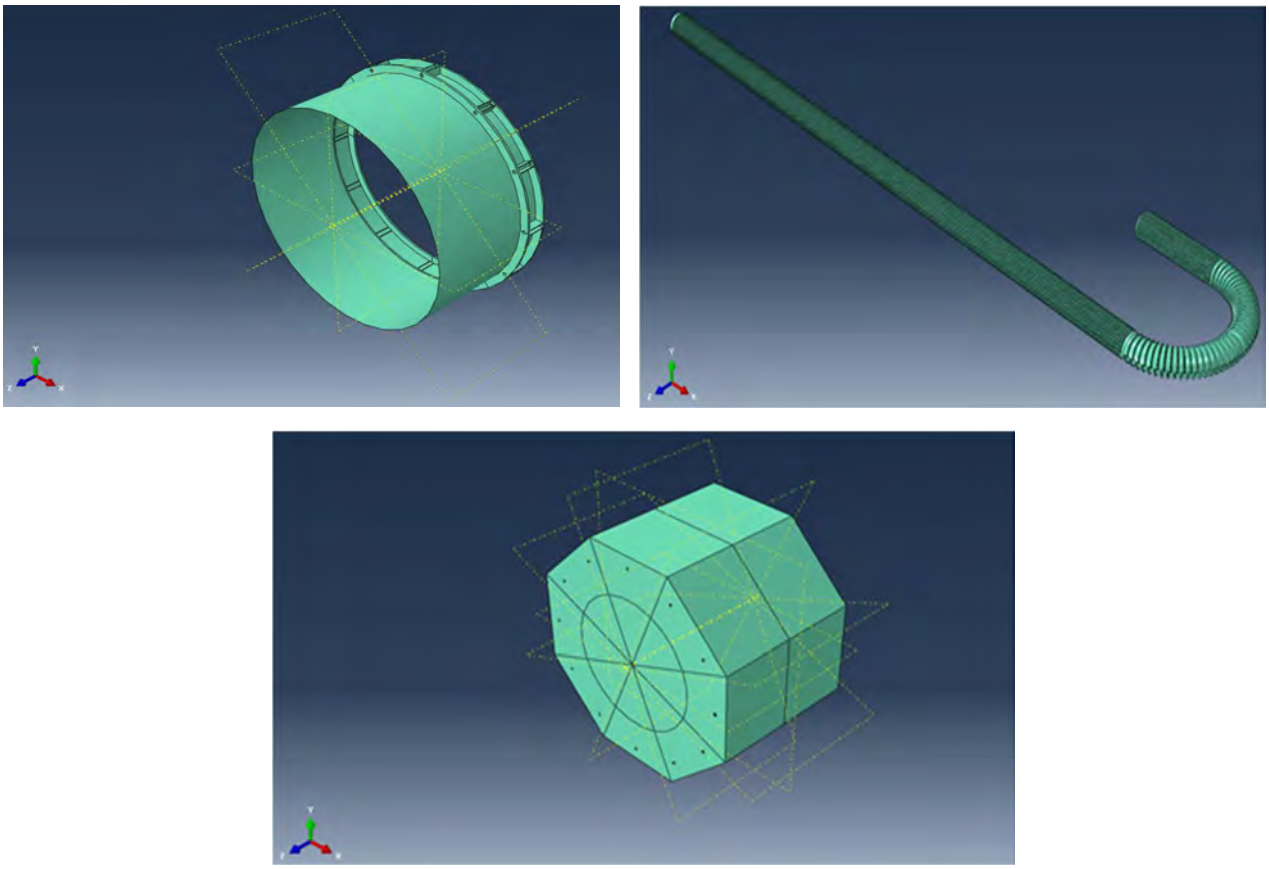


Figura 4. Modellazione in Abaqus dei componenti principali del collegamento alla base della colonna.

Ai tirafondi, è stata assegnata una filettatura ISO di passo 5.5 mm anch'essa modellata, una lunghezza del tratto rettilineo pari a 1.5 m e un tratto curvilineo. È importante sottolineare come nel tratto curvilineo la filettatura sia più rada per agevolare il processo di generazione del mesh dell'elemento. Il plinto di calcestruzzo ha una pianta ottagonale con 1.7 m di lato e altezza pari a 2.7 m. Le partizioni visibili nell'immagine del plinto di fondazione hanno il solo scopo di regolarizzare il mesh ma non rappresentano un'interruzione del solido di calcestruzzo. La base del plinto in calcestruzzo è stata vincolata alla base tramite dei vincoli di incastro. La testa dei tirafondi, invece, presenta un collegamento di tipo *rigid body* con la superficie superiore della flangia così come illustrato nella figura seguente.
Un ulteriore collegamento di tipo *rigid body* è realizzato in corrispondenza della sommità della gonna. Più in particolare, si è assunto che il bordo libero della gonna sia costretto a muoversi rigidamente con un nodo creato in corrispondenza del suo centro sul quale, successivamente, verrà applicata la forza per la simulazione del comportamento del giunto soggetto a una forzante esterna (vento, sisma). Nella figura seguente è riportata la vista del collegamento nel suo insieme, del nodo centrale e del carico ad esso applicato (forza orizzontale crescente in un solo verso).

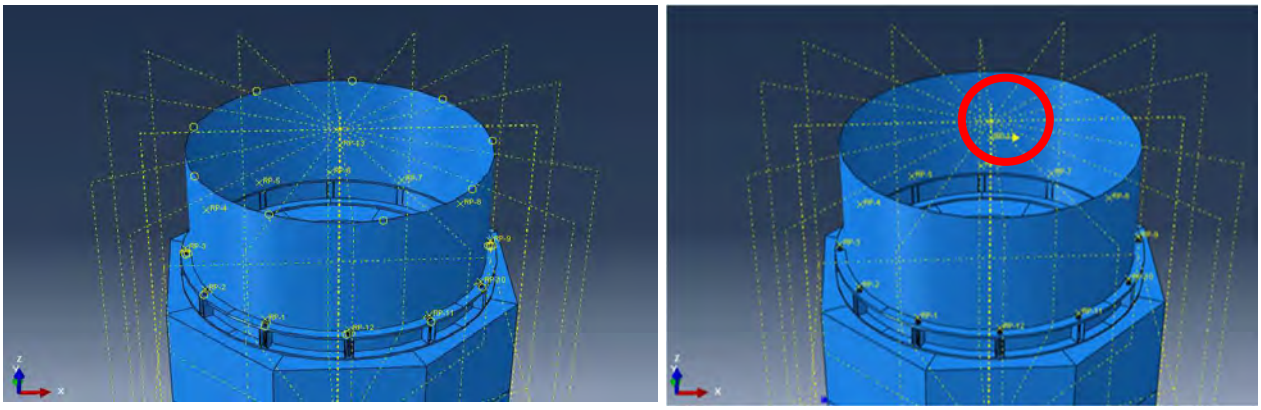


Figura 5. Modellazione completa del collegamento alla base e applicazione della forzante (cerchio rosso) orizzontale monodirezionale crescente nel tempo.

3.1 Risultati dell'analisi numerica

Incrementando la forza in maniera monotona nel tempo, si sono osservati progressivamente degli evidenti ed estesi danneggiamenti sia del calcestruzzo del plinto di fondazione che dei tirafondi di ancoraggio che risultano soggetti a sforzi di trazione. All'aumentare della forza è possibile osservare una rotazione alla base dell'apparecchiatura, che da una parte determina una compressione esercitata dalla colonna sul plinto di calcestruzzo e dall'altra il sollevamento della colonna rispetto al plinto stesso. La formazione di tale meccanismo conferma il fatto che per forze esterne di modesta o elevata entità, come quelle determinate dall'azione sismica, la modellazione del giunto alla base con un vincolo di semplice incastro potrebbe

risultare errata poiché la formazione di un moto rotazionale alla base potrebbe alterare notevolmente i periodi di oscillazione principali della struttura, soprattutto quando esse sono snelle.

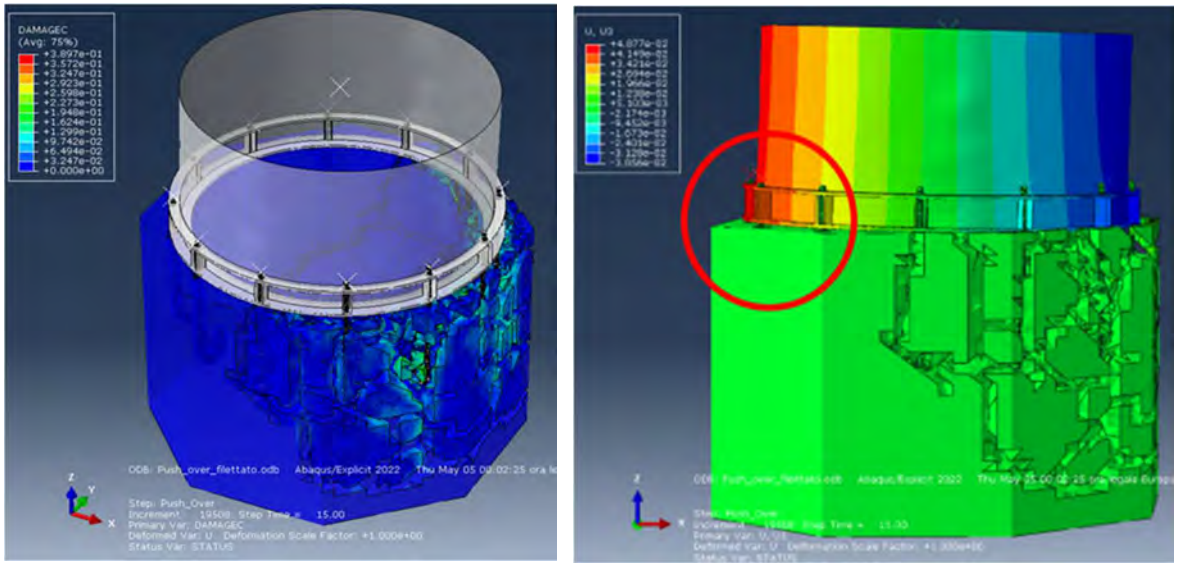


Figura 6. Stato fessurativo al termine della simulazione (sinistra), spostamenti verticali al termine della simulazione (destra).

Gli spostamenti verticali massimi associati al sollevamento, registrati in corrispondenza del tirafondo posto nella direzione di applicazione della forza, risultano non trascurabili e nell'ordine dei 5 cm in corrispondenza di un momento massimo alla base dell'ordine dei 5.000 kN x m, totalmente compatibile con le sollecitazioni attese.

Nei grafici seguenti di Figura 7, vengono rappresentati gli spostamenti U in corrispondenza del tirafondo più sollecitato e le reazioni alla base del plinto RF misurate nel tempo lungo i tre assi principali: U3 (direzione verticale), U1 e U2 (direzioni principali del piano).

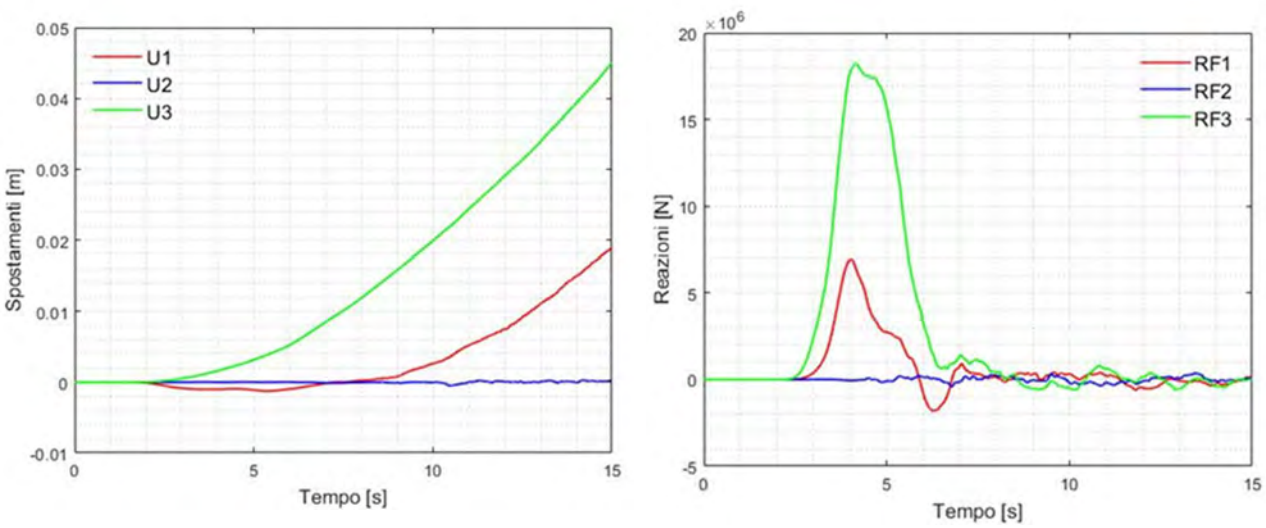


Figura 7. Spostamento del tirafondo più sollecitato (sinistra), reazioni alla base del plinto (destra).

Note quindi le storie temporali degli spostamenti in direzione verticale U3, delle reazioni alla base nella direzione di applicazione del carico RF1, della distanza tra il centro di rotazione assunto nell'ipotesi di comportamento rigido della flangia e il tirafondo più distante (3.6 m) e della distanza verticale tra il punto di applicazione del carico e la base della flangia (1.8 m), si è potuto calcolare l'andamento momento M - rotazione θ alla base della colonna (Figura 8). In particolare, si può notare un comportamento apparentemente anomalo (valori negativi) in corrispondenza di un valore della rotazione alla base della colonna θ pari a circa 1.5E-03.

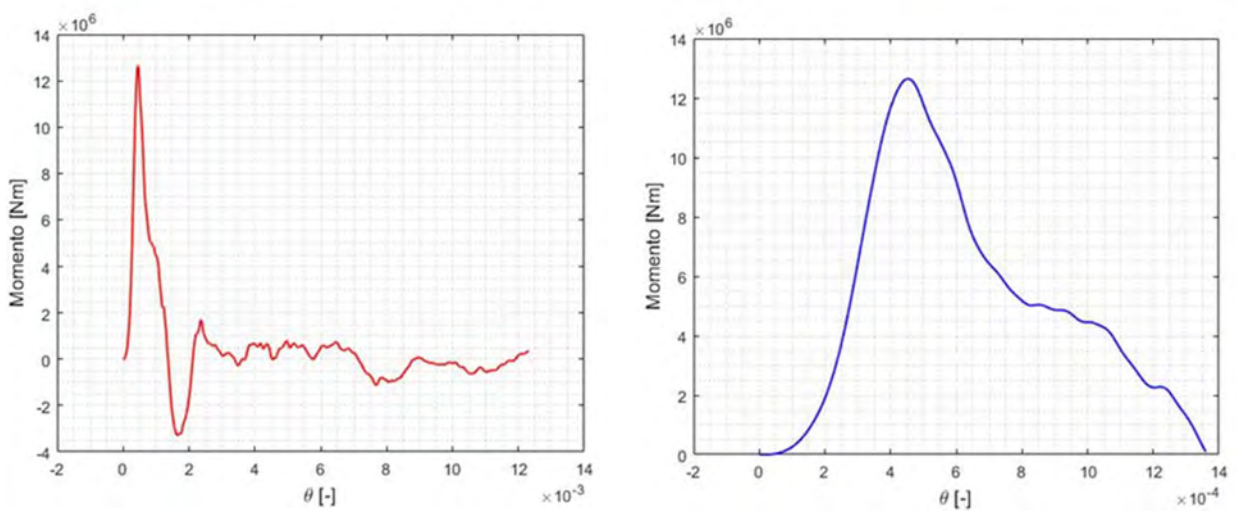


Figura 8. Andamento momento – rotazione alla base per l'intera prova (sinistra) e limitato ai valori positivi (destra).

Se si osserva il grafico di Figura 7 (destra), è apprezzabile l'annullamento della componente RF1, con la quale viene calcolato il momento, in corrispondenza di un tempo pari a 5,9 s. Contemporaneamente si osserva, un brusco calo della reazione verticale RF3 che tende poi ad oscillare intorno al valore nullo. Allo stesso istante temporale avviene anche l'annullamento del valore di momento nel grafico di Figura 8, ciò è dovuto al fatto che questo istante temporale coincide con una quasi totale distruzione della porzione di calcestruzzo compresso con inoltre il raggiungimento di importanti valori delle tensioni nei tirafondi per sforzo di trazione e al limite della rottura. Risulta quindi ragionevole ritenere la simulazione valida fino a questo istante temporale, t=5,9 s, trascurando tutto ciò che succede successivamente, a seguito della rottura completa della porzione di plinto di calcestruzzo. Pertanto, la relazione momento M - rotazione θ che deve ritenersi corretta è quella calcolata fino al tempo t=5,9 s che è riportata nella Figura 8 (destra).
Nell'immagine seguente (Figura 9) vengono riportate le condizioni del plinto di calcestruzzo nell'istante t=5,9 s, termine ultimo in cui può ritenersi conclusa l'analisi. In particolare, si possono notare grosse ed estese fessurazioni generatesi nel plinto con porzioni di calcestruzzo completamente sconnesse tra loro.

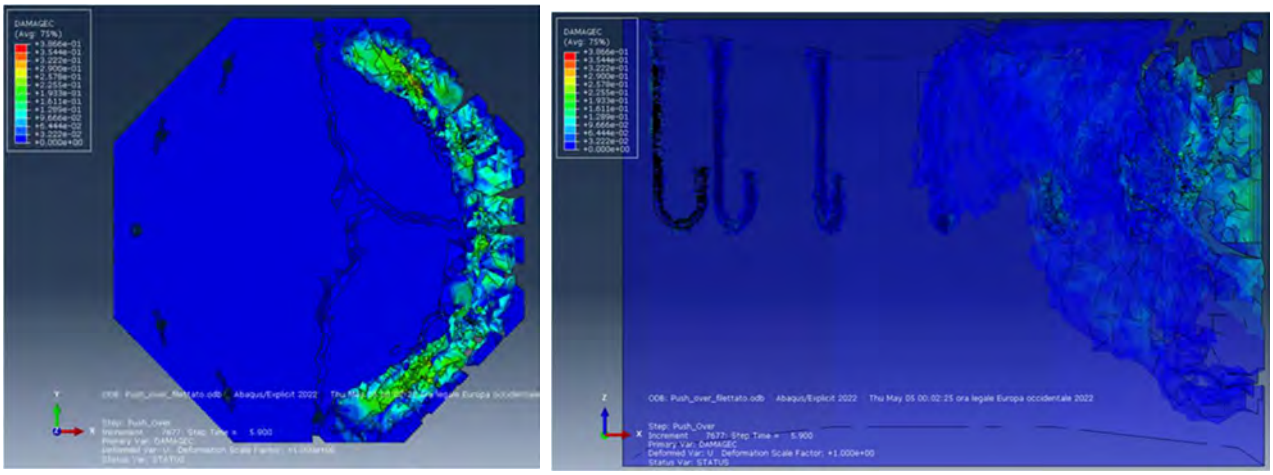


Figura 9. Vista in pianta (sinistra) e in sezione (destra) del plinto di calcestruzzo a t= 5.9 secondi di analisi, tempo in cui può assumersi il completo danneggiamento del plinto di fondazione.

Nell'immagine seguente (Figura 10), si possono osservare le condizioni dei tirafondi di ancoraggio nello stesso istante temporale, con il raggiungimento di un valore delle tensioni vicino al limite della rottura e comunque ben oltre il valore del limite elastico (720 MPa).

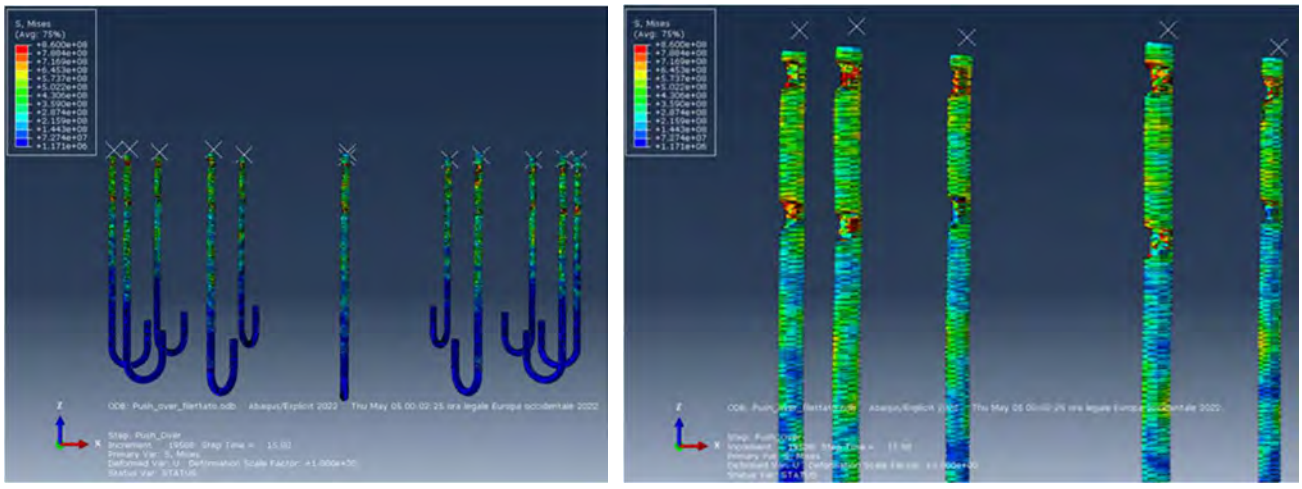


Figura 10. Stato tensionale e deterioramento dei tirafondi a t=5.9 secondi.

Una volta acquisita la consapevolezza del comportamento meccanico del giunto di collegamento alla base, soggetto ad una forza orizzontale come l'azione sismica, si è proceduto alla definizione di un'approssimazione lineare del comportamento momento M-rotazione θ fino al tempo limite 5.9 s, applicando il criterio di uguale energia. In particolare, calcolando l'area sottesa alla curva ottenuta dalle simulazioni mediante integrazione numerica e imponendo all'approssimazione lineare di raggiungere il valore del massimo momento, si è calcolato quanto mostrato in Figura

11, che riporta l'approssimazione lineare della curva momento-rotazione determinata applicando il principio di ugual energia (retta rossa) e l'approssimazione lineare determinata applicando sempre il principio di uguale energia ma imponendo il passaggio per un valore del momento pari all'80% di quello massimo (retta verde) .

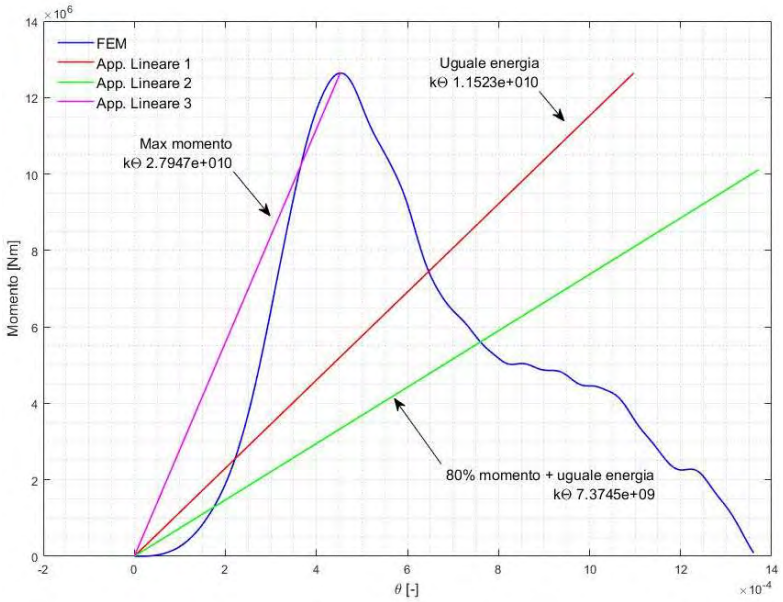


Figura 11. Momento-rotazione ottenuti dal modello FEM e mediante approssimazione lineare applicando il principio di uguale energia (retta rossa).

L'approssimazione lineare calcolata applicando il criterio di uguale energia fornisce un valore della rigidezza rotazionale k_θ pari a 1.1523e+10 Nm e pari 7.3745 e+09 Nm rispettivamente imponendo il passaggio della retta per il valore del momento massimo e per un valore pari all'80% del momento massimo. La rigidezza, invece, calcolata partendo dal momento massimo, trascurando il criterio di uguale energia, risulta pari a 2.7947e+10 Nm, più del doppio dei valori precedenti. Tutti i valori della rigidezza non sono comunque trascurabili e giustificano l'importante errore che si commetterebbe se si assumesse un vincolo di incastro alla base della colonna.

3.2 Analisi modale della colonna

Al fine di valutare in maniera quantitativa l'influenza del valore della rigidezza rotazionale del giunto di base sul comportamento dinamico della colonna di processo presa come riferimento, sono stati calcolati i modi di vibrare principali della struttura nell'ipotesi di colonna modellata con vincoli di incastro alla base e della medesima colonna dotata di differenti valori della rigidezza rotazionale tra cui il valore k_θ pari a 1.1523e+10 Nm, determinato applicando il principio di uguale energia e imponendo il passaggio della retta di approssimazione lineare per il valore del momento massimo del grafico momento M-rotazione θ precedentemente determinato.
Nello specifico, utilizzando questo valore della rigidezza torsionale alla base della colonna e applicandolo ad un modello numerico FEM 3D raffinato dell'intera colonna,

si ottiene una prima frequenza di vibrazione pari a 1.8433 Hz. Nel caso si assumesse in maniera erronea un vincolo di incastro alla base, la prima frequenza di vibrazione si attesterebbe a 2.13 Hz, un valore molto diverso che potrebbe determinare grosse differenze in termini di sollecitazioni sismiche negli elementi strutturali.

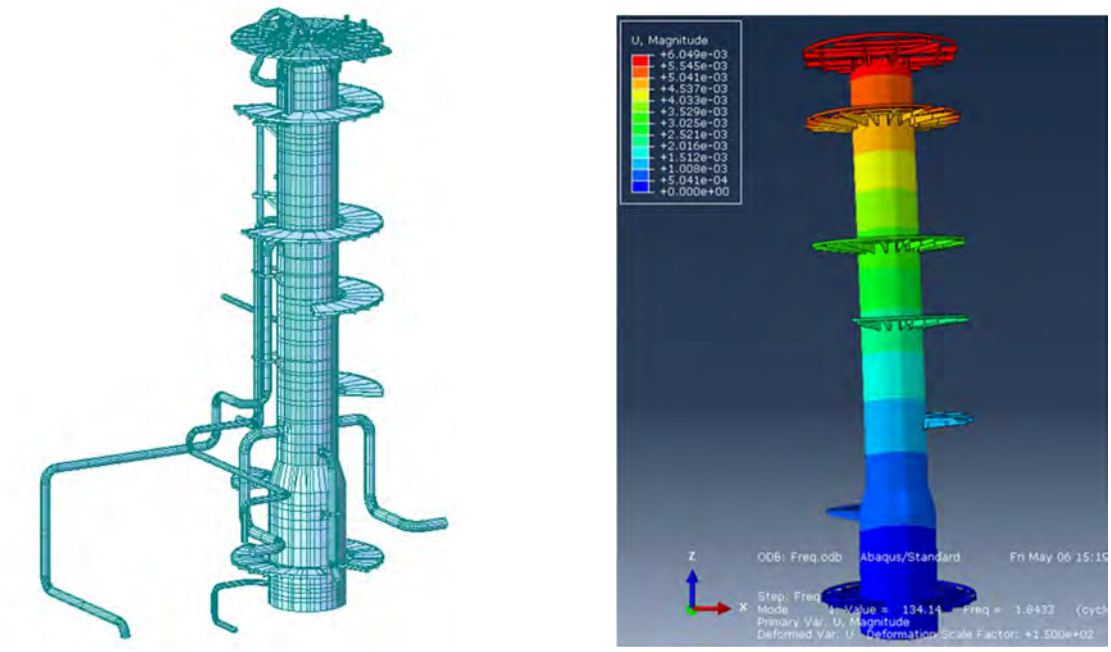


Figura 12. Configurazione indeformata e modo di vibrare fondamentale della colonna dotata di una rigidezza rotazionale alla base di 2.7947e+10 Nm.

Naturalmente, come è possibile osservare anche nella tabella seguente che riporta il valore delle frequenze di oscillazione per differenti valori della rigidezza rotazionale alla base, all'aumentare del valore della rigidezza si ottiene anche un generale aumento del valore delle frequenze di oscillazione principali della colonna.

Casi di analisi	***Rigidezza rotazionale alla base [Nm]***	***Frequenza principale di oscillazione [Hz]***
Caso 1	5e+08	0.6781
Caso 2	1e+09	0.9168
Caso 3	5e+09	1.5730
Caso 4	7.3745e+09	1.7112
Caso 5	1.1523e+10	1.8433
Caso 6	2.7947e+10	2.0187
Caso 7	5e+10	2.0834
Caso 8	1e+11	2.1276
Caso 9: vincolo di incastro alla base	Infinita	2.1303

Tabella 1. Frequenze del modo principale di vibrare al variare della rigidezza rotazionale.

Il fatto che, la sottostima o la sovrastima delle frequenze di oscillazione possa o meno risultare svantaggiosa in termini di sollecitazioni sismiche, dipende fortemente dalla rigidezza e della massa dell'intero sistema e dall'andamento dello spettro di risposta sismica. Alla luce di questa grande variabilità dimostrata in maniera quantitativa, assume grande rilevanza la comprensione di tutti i meccanismi di danneggiamento del giunto alla base di una colonna attraverso modelli sofisticati o in mancanza effettuando misure interferometriche in sito che consentono di rilevare i periodi fondamentali di oscillazione di questa tipologia di strutture.

4. Conclusioni

Le simulazioni numeriche approfondite condotte su una tipica colonna di processo di un impianto industriale, hanno permesso di comprendere come il comportamento sismico globale della colonna risenta fortemente dell'approccio modellistico adottato. Come illustrato e rappresentato nei paragrafi precedenti, in effetti, l'utilizzo di un vincolo di incastro alla base della colonna porterebbe ad una sovrastima della rigidezza dell'intera colonna con conseguente sottostima degli spostamenti in sommità e ad una errata valutazione del suo comportamento sismico. Appare quindi evidente che lo studio approfondito del meccanismo di danneggiamento alla base e l'adozione di una modellazione accurata di tali meccanismi, rappresenti un elemento indispensabile per simulare il reale comportamento sismico della colonna. L'utilizzo di un modello non lineare raffinato, come quello appena illustrato, permette di cogliere al meglio alcuni importanti aspetti; tuttavia, richiede molta attenzione sia nelle fasi di modellazione che in quelle di interpretazione dei risultati. Vista la complessità delle analisi, risulta sempre consigliabile un'analisi strumentale in situ che consenta di avere una misura affidabile di riferimento delle grandezze ingegneristiche di interesse.

Bibliografia e sitografia

[1] STREST (2016), Harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards, STREST Reference Report: Report on lessons learned from recent catastrophic events, Editors: Editors: Tsionis G, Pinto A, Giardini D, Mignan A, doi: 10.2788/17066

[2] Fabbrocino, G., Iervolino, I., Orlando, F., & Salzano, E. (2005). Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas. Journal of Hazardous Materials, 123(1:3), 61-69.

[3] Campedel, M., Cozzani, V., Garcia-Aneda A., Salzano, E., (2008), "Extending the Quantitative Assessment of Industrial Risks to Earthquake Effects", Risk Analysis, Vol. 28, No. 5, pp. 1231-1246.

[4] Alessandri, S., Caputo, A.C., Corritore, D., Giannini, R., Paolacci, F., Phan, H.N. (2018). Probabilistic risk analysis of process plants under seismic loading based on Monte Carlo simulations, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 10.1016/j.jlp.2017.12.013. [5] HAZUS, (2001). Earthquake loss estimation

methodology, National Institute of Building Science, Risk Management Solution, Menlo Park, CA, USA.
[6] PEC 2017, Deliverable D4.1, (2017). Definition of the structural models and seismic fragility analysis techniques available for the specific case study, PEC Project: Post-Emergency, Multi-Hazard Health Risk Assessment in Chemical Disasters.
[7] Guidelines for the management of NaTech events in establishments with major-accident hazards - Part 1: General requirements and earthquake (2021). UNI/CT 266.
[8] ABAQUS. (2022). Abaqus User's Manual version 2022. In *Dassault Systèmes Simulia Corp.: Providence, RI, USA*.

Potenzialità dello Structural Health Monitoring e dell'Early Warning negli impianti industriali

D. Corritore[1], S. Caprinozzi[1], F. Paolacci[2]

[1]SafePlant s.r.l. – Spin-off Università Roma Tre, Roma
[2]Università Roma Tre - Dipartimento di ingegneria civile, informatica e delle tecnologie aeronautiche, Roma

Sommario
L'articolo illustra il ruolo dei sistemi di monitoraggio strutturale (SHM) e di early warning (EW) nella mitigazione dei rischi NaTech in impianti industriali, in accordo alla norma UNI/TS 11816-1. I due sistemi possono considerarsi tra loro complementari: l'EW opera su scala regionale fornendo preavvisi sismici utili per la gestione delle emergenze, mentre lo SHM consente di valutare con maggiore precisione gli effetti sulle singole apparecchiature, riducendo i falsi allarme, consentendo la manutenzione predittiva e il monitoraggio dell'invecchiamento strutturale. Il sistema SHM si basa su una rete di sensori installati direttamente sulle apparecchiature critiche di un impianto industriale. Questi dispositivi, caratterizzati da durabilità, compatibilità ATEX, immunità alle interferenze elettromagnetiche e all'installabilità anche con impianti in esercizio, consentono il monitoraggio delle condizioni dell'apparecchiatura in tempo reale e l'attivazione automatica di misure di protezione.
Tra i vantaggi operativi, oltre alla mitigazione dei rischi dovuti a eventi NaTech, questa tecnologia può risultare molto utile per la riduzione delle campagne ispettive periodiche, per programmare ispezioni risk-based o in caso di superamento delle soglie di allarme, per una pianificazione efficiente della manutenzione delle apparecchiature con una riduzione dei tempi di fermo impianto. In questo articolo, viene dimostrata l'utilità di un sistema di monitoraggio strutturale nelle apparecchiature di un impianto industriale attraverso l'applicazione di analisi numeriche condotte su un modello definito gemello digitale di un caso studio: un separatore verticale molto comune negli impianti petrolchimici.

1. Introduzione

Nel corso dell'ultimo decennio, molti settori industriali hanno dovuto affrontare sfide economiche e tecnologiche sempre più forti, con la necessità di ridurre i costi di produzione, introdurre nuove tecnologie e migliorare la competitività. I governi, insieme a numerosi programmi di ricerca e sviluppo, hanno cercato soluzioni economicamente vantaggiose per aumentare l'efficienza dei processi produttivi e dei sistemi strutturali [1]. Una delle risposte più promettenti a queste esigenze è rappresentata dall'introduzione di nuove tecnologie e tra queste, il monitoraggio strutturale sta assumendo un ruolo sempre più rilevante. I benefici includono un

miglioramento delle prestazioni, una riduzione dei costi operativi e un incremento della sicurezza. A tal riguardo, i sistemi di monitoraggio sono considerati uno strumento fondamentale per prevenire e mitigare i rischi NaTech negli impianti industriali, come peraltro fortemente richiamato anche nelle norme UNI/TS 11816-1 per la gestione di eventi NaTech nell'ambito degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante [2].

I sistemi di monitoraggio per il controllo delle apparecchiature industriali sono costituiti principalmente da sensori che misurano temperature, deformazioni, rotazioni e accelerazioni attraverso un sistema di rilevamento elettromeccanico o in fibra ottica incorporato o applicato successivamente alla superficie di una struttura.

I sensori che consentono di misurare le deformazioni vengono generalmente definiti estensimetri o "strain gauges". Questi sono costituiti da sottili reticoli metallici incollati su una superficie. Quando il materiale si deforma, anche il reticolo si deforma e cambia la sua resistenza elettrica. Il rapporto tra la variazione relativa di resistenza rappresenta proprio la deformazione ε dell'elemento, amplificata da un fattore definito "gauge factor" tipicamente di valore fissato in funzione della tipologia dei materiali. Dai valori di deformazione si può risalire in maniera semplice alle variazioni di tensione locale nel materiale.

Gli accelerometri misurano invece l'accelerazione rilevando la forza che agisce su una piccola massa interna. Gli inclinometri più comuni funzionano tramite micro-accelerometri che misurano l'accelerazione statica della gravità lungo gli assi principali X, Y, Z. Se il sensore è perfettamente orizzontale, la gravità agisce solo su un asse. Inclinando il sensore, la gravità si distribuisce su più assi e da questa variazione si può ricava l'angolo di rotazione.

Sono disponibili anche dispositivi che misurano la forma, la curvatura e la deformazione tridimensionale di un oggetto lungo tutta la sua lunghezza e non in un solo punto come avviene per gli estensimetri o gli accelerometri [3]. Questi sensori vengono chiamati sensori di forma o "shape sensors". Sono usati quando serve conoscere come si deforma o si muove un corpo nello spazio, in modo continuo.

L'obiettivo del monitoraggio non è più soltanto rilevare anomalie, ma prevedere il comportamento futuro delle apparecchiature, anticipare guasti e attivare automaticamente procedure di sicurezza.

Le tecnologie chiave che abilitano questa trasformazione sono:

- Early Warning (EW): sistemi automatici che rilevano condizioni anomale e attivano allarmi o procedure di emergenza [4] [5].
- Structural Health Monitoring (SHM): monitoraggio continuo dello stato strutturale tramite sensori e modelli numerici [6] [7].
- Predictive Maintenance (PM): manutenzione predittiva basata su dati reali e algoritmi predittivi [8].
- Digital Twin (DT): replica digitale dell'apparecchiatura, aggiornata in tempo reale tramite dati sensoriali [9].

L’integrazione di queste tecnologie consente una gestione intelligente dell’impianto, riducendo costi operativi, aumentando la sicurezza e migliorando la disponibilità delle apparecchiature.

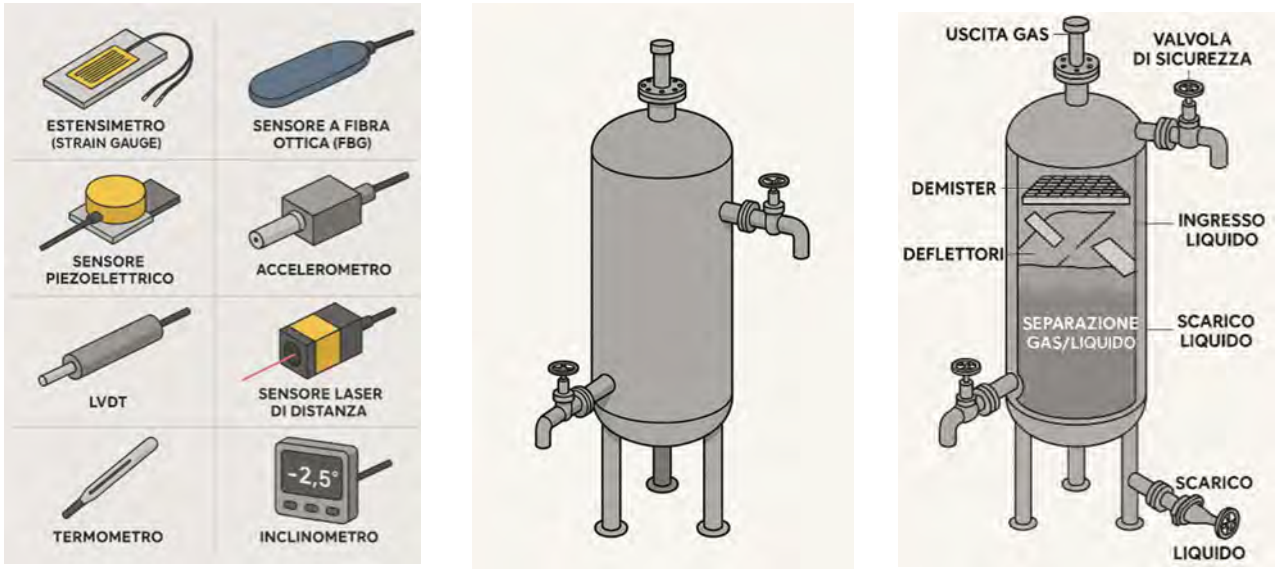


Figura 1. Tipologie di sensori per il monitoraggio di apparecchiature industriali

Per raggiungere gli obiettivi è fondamentale effettuare una progettazione accurata del sistema di monitoraggio che consenta di rispondere adeguatamente ai seguenti quesiti: quali apparecchiature industriali occorre monitorare, qual è l’obiettivo principale del monitoraggio, quale tipologia di sensori è più adatta all’ambiente in cui sono inserite le apparecchiature industriali, cosa occorre realmente monitorare, di quali misurazioni si ha bisogno, in che modo è possibile utilizzare i dati ottenuti, come è possibile correlare le misurazioni all’invecchiamento del materiale e al danno strutturale.
Le risposte a questi quesiti alcune volte non sono semplici e richiedono una conoscenza approfondita delle apparecchiature e soprattutto uno studio rigoroso del loro comportamento strutturale, sia nelle condizioni operative che in quelle di emergenza (es. evento sismico).

2. Tipologie principali di sistemi di monitoraggio negli impianti industriali per la gestione del rischio NaTech

La norma UNI/TS 11816-1:2021 definisce un approccio sistemico alla gestione del rischio NaTech negli impianti industriali a rischio di incidente rilevante, articolato in diverse fasi: previsione, prevenzione, pianificazione, gestione dell’emergenza e ripristino. All’interno della norma i sistemi di monitoraggio sono inquadrati come degli strumenti utili per eliminare o ridurre la probabilità di effetti disastrosi causati da eventi NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) e dunque, rientrano nella fase di prevenzione e previsione poiché consentono di:

- rilevare precocemente condizioni anomale o pre-evento (es. deformazioni, vibrazioni anomale, cedimenti);
- valutare l'evoluzione di eventi naturali (sismi, alluvioni, frane) e i loro effetti sulle strutture industriali;
- supportare la definizione di scenari incidentali e la risposta operativa.

Inoltre, la norma introduce esplicitamente il concetto di Early Warning sismico regionale (EW) come strumento utile per la gestione del rischio NaTech negli stabilimenti soggetti a incidenti rilevanti poiché il sistema consente di fornire informazioni tempestive sull'arrivo di onde sismiche, prevedere intensità e impatto su aree industriali e consentirebbe di ottenere un tempo utile per attivare misure automatiche o manuali di protezione (es. chiusura valvole, attivazione misure antincendio, arresto impianti, isolamento serbatoi). I sistemi EW dovrebbero essere citati nei rapporti di sicurezza degli impianti industriali come misura di prevenzione e dovrebbero essere integrati con sistemi locali di monitoraggio strutturale (es. accelerometri, inclinometri, sensori di pressione) di Structural Health Monitoring (SHM).

Dunque, i due sistemi di monitoraggio SHM e EW possono essere complementari: la combinazione dei due garantisce la massima conoscenza dell'impianto e offre indubbi vantaggi.

Un sistema EW è un'infrastruttura che rileva un terremoto nei primissimi istanti e invia un'allerta alle aree circostanti prima dell'arrivo delle onde sismiche più distruttive. È composto da una rete di sensori, stazioni di trasmissione dati, centri di elaborazione e canali di comunicazione dell'allerta che operano in modo coordinato.



Figura 2. Schema di funzionamento di un sistema EWS

Le onde sismiche sono rilevate tramite accelerometri e sismometri distribuiti intorno all'impianto industriale. Il sistema, una volta captato il segnale sismico, elabora in pochi decimi di secondo i parametri del sisma (localizzazione, magnitudo iniziale, intensità attesa) e invia un'allerta alla sala controllo dell'impianto industriale con

l'obiettivo di guadagnare secondi preziosi tra la rilevazione e l'arrivo delle onde più dannose. Le allerte possono arrivare da 5 a 60 secondi prima dell'impatto, a seconda della distanza dall'epicentro. Questa tipologia di sistema è molto utile poiché consente di adottare delle misure preventive e di sicurezza (chiusura automatica valvole, arresto pompe e compressori, messa in sicurezza di reattori e linee di processo, allerta al personale) ed è molto vantaggiosa dal punto di vista economico poiché ha bisogno di un limitato numero di sensori. Questa tecnologia ha però dei limiti: agisce a livello dell'intero impianto (regionale) e non su scala locale ossia sulla singola apparecchiatura, per tale ragione è piuttosto facile imbattersi in un falso allarme.
I sistemi Structural Health Monitoring (SHM) si basano invece su una rete di sensori installati direttamente sulle apparecchiature. I dati così ottenuti, inviati alle centrali di comando consentono l'attivazione automatica di strumenti di difesa. Questo tipo di sistema può essere utilizzato anche per monitorare in tempo reale o periodicamente lo stato di salute di una apparecchiatura. Il suo obiettivo è rilevare precocemente danni, degrado o anomalie che potrebbero compromettere la sicurezza o la funzionalità delle apparecchiature di uno stabilimento.



Figura 3. Schema di funzionamento di un sistema SHM

Un sistema SHM ha indubbiamente una serie di vantaggi aggiuntivi rispetto ad un sistema EW poiché consente una stima precisa degli effetti dovuti a eventi naturali (sisma, frane, etc..) o accidentali (urti, guasti, etc..) sulla singola apparecchiatura di un impianto con una riduzione/eliminazione del problema dei falsi allarmi. Inoltre, in accoppiamento con un Digital Twin (DT), il sistema permette di effettuare una Predictive Maintenance (PM) basata sul post-processing dei dati sensoristici, consente di monitorare il grado di invecchiamento delle apparecchiature e può essere utilizzato anche per scopi ispettivi con l'intento di ridurre la frequenza delle campagne ispettive. Inoltre, se utilizzato come misura di sicurezza, può consentire un'interruzione dei processi mirata, solo dove realmente necessaria. Ovviamente, vi sono anche aspetti negativi, legati alla necessità di avere un'elevato livello di

conoscenza delle apparecchiature, un elevato grado di conoscenza del loro comportamento strutturale, un costo elevato in fase di start-up legato alla necessità di installare un largo numero di sensori e di processare una grande mole di dati.

3. Fasi di attivazione di un sistema SHM

L'utilizzo del sistema di monitoraggio SHM per i fini precedentemente descritti si articola secondo un preciso flusso di lavoro illustrato in Figura 4. La fase preliminare all'attivazione di un sistema SHM consiste nell'individuazione delle apparecchiature più critiche di un impianto industriale. Le apparecchiature possono essere classificate in classi di rischio in funzione della loro vulnerabilità agli eventi NaTech, dell'intensità e della distanza degli effetti fisici che possono derivare da rilasci di materiale pericoloso e della frequenza con cui possono generare scenari incidentali credibili. In letteratura esistono molti metodi, sia qualitativi che quantitativi, che consentono una classificazione delle apparecchiature in classi di rischio e quindi di selezionare quelle più critiche [10] [11]. Negli impianti dotati di un gran numero di apparecchiature, questa fase preliminare diventa fondamentale ed è propedeutica alle fasi di attivazione del sistema.

La prima fase di attivazione consiste nella realizzazione di un modello gemello digitale (DT) dell'apparecchiatura che si vuole monitorare con lo scopo di capire quali siano i parametri e i dati principali da acquisire attraverso il sistema sensoristico. Successivamente, si procede alla progettazione di dettaglio del sistema di monitoraggio e del suo cablaggio: tipologia sensori, quantità, posizione, caratteristiche metrologiche e dimensionamento del sistema di acquisizione dati. Una volta installato il sistema di monitoraggio si procede alla sua calibrazione e all'acquisizione dei primi dati. Queste prime fasi si eseguono una sola volta e precisamente nel periodo precedente l'attivazione vera e propria del sistema di monitoraggio (Fase realizzativa).

A seguire, si analizzano i dati ricevuti, controllando quindi la corretta funzionalità del sistema installato sull'apparecchiatura individuata, confrontando i dati registrati con quelli attesi. Qualora questo confronto evidenziasse una buona congruenza tra quanto atteso e quanto registrato, si reitera il processo a partire dallo step precedente. Queste due fasi rientrano nella cosiddetta operatività, ovvero quando tutto è pienamente operativo senza nessun avviso di problematiche varie. Qualora ciò non si verificasse, è prevedibile un automatismo in grado di isolare l'apparecchiatura se i dati raccolti risultano eccedere soglie predeterminate, altrimenti si indagano le possibili cause che possono essere attribuibili a fenomeni naturali, umani o di processo. I dati nuovamente processati forniti dal sistema di monitoraggio, qualora risultassero compatibili con quelli precedenti alla registrazione dell'anomalia, indicherebbero una fase di operatività senza necessità di ulteriori azioni. Se ciò, invece, non dovesse accadere, si passerebbe all'aggiornamento del modello digitale, alla valutazione del rischio e al confronto dello stesso con i valori ammissibili. Se il rischio calcolato dovesse risultare accettabile si tornerebbe

nuovamente alla fase di operatività proseguendo con le normali attività di monitoraggio, viceversa, si studierebbero azioni mitigative del rischio per poi arrivare ad aggiornare il modello digitale e portare il rischio calcolato entro valori accettabili. L'iter si conclude tornando alla fase di operatività al fine di tenere sempre sotto controllo l'apparecchiatura in esame e poterne comprendere e/o prevedere i fenomeni di degrado.

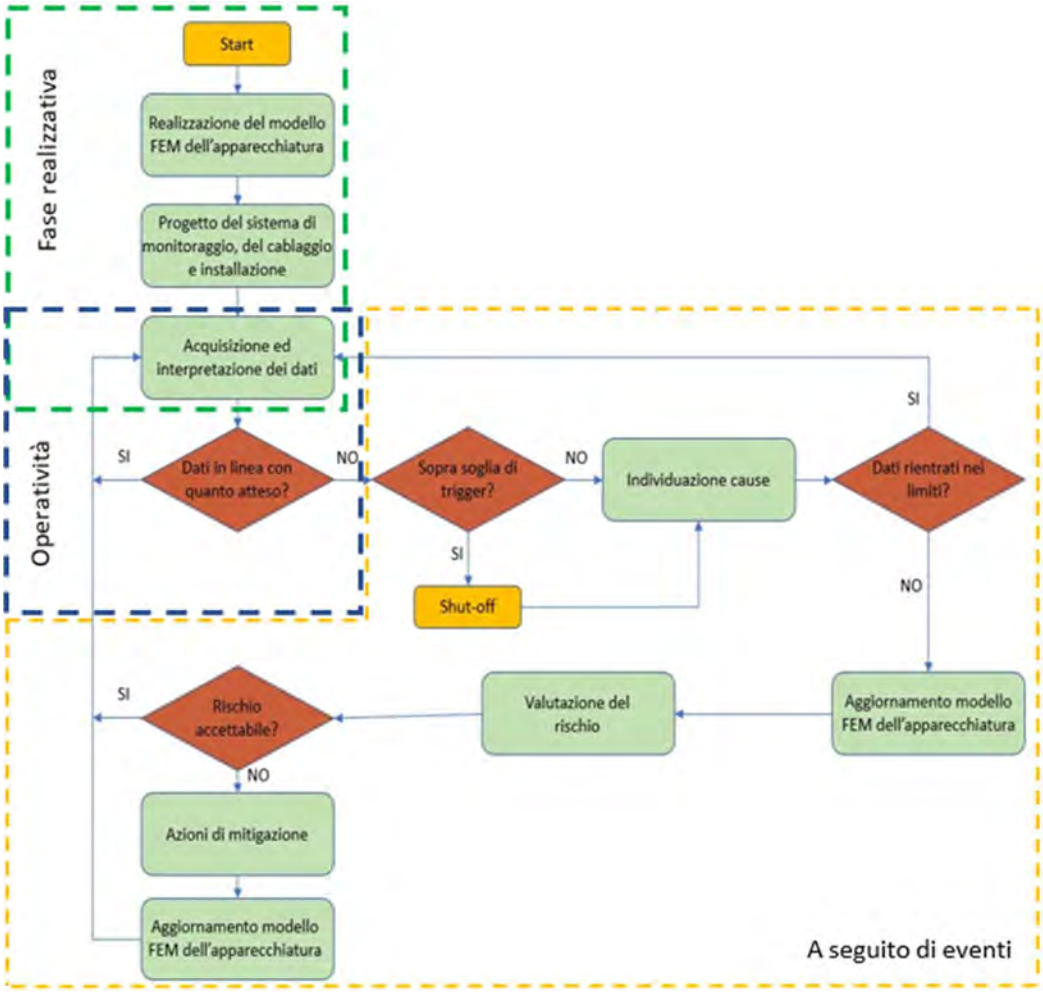


Figura 4. Schema logico di funzionamento di un sistema SHM per un'apparecchiatura industrial

4. Simulazione numerica del funzionamento di un sistema SHM

Al fine di comprendere le potenzialità del sistema di monitoraggio SHM per le apparecchiature di un impianto industriale è stato sviluppato un gemello digitale agli elementi finiti, di dettaglio, di un caso studio molto diffuso negli stabilimenti: un separatore verticale. Esso è costituito da un serbatoio in pressione, fissato a terra con quattro gambe in acciaio, fissate al serbatoio per mezzo di piastre saldate e alla base su un plinto in calcestruzzo tramite piastre imbullonate. Il separatore verticale è collegato all'impianto di processo dello stabilimento attraverso una serie di tubi flangiati di vario diametro connessi al mantello dell'apparecchiatura. È importante sottolineare che l'apparecchiatura scelta rappresenta esclusivamente un esempio e

che, quindi, le medesime considerazioni, fatte salve le peculiarità del caso, sono estendibili a qualsiasi componente presente all'interno di impianti industriali come: serbatoi di vario genere, separatori orizzontali, colonne, air cooler, torce, edifici, etc. etc.

4.1 Architettura del sistema di monitoraggio

L'installazione del sistema di monitoraggio ipotizzato prevede l'impiego di sensori e trasduttori in fibra ottica basati sulla tecnologia Fiber Bragg Grating [FBG], progettati e configurati per monitorare in tempo reale i parametri strutturali dell'apparecchiatura in esercizio, dotati di caratteristiche metrologiche, funzionali e operative particolarmente adatte ad un utilizzo all'interno di impianti petrolchimici. Dal punto di vista della tipologia, ubicazione, quantità e funzione dei sensori e trasduttori FBG da installare sull'apparecchiatura, è stato ipotizzato un primo layout che prevede l'installazione di nr. 23 tra sensori e trasduttori FBG. Il layout prevede n.3 accelerometri triassiali ai vertici superiori e inferiori del serbatoio e alla base del plinto di fondazione, n.4 estensimetri monoassiali, un misuratore di posizione per ogni flangia di attacco delle tubazioni e un misuratore di variazione di forma della superficie esterna del serbatoio.

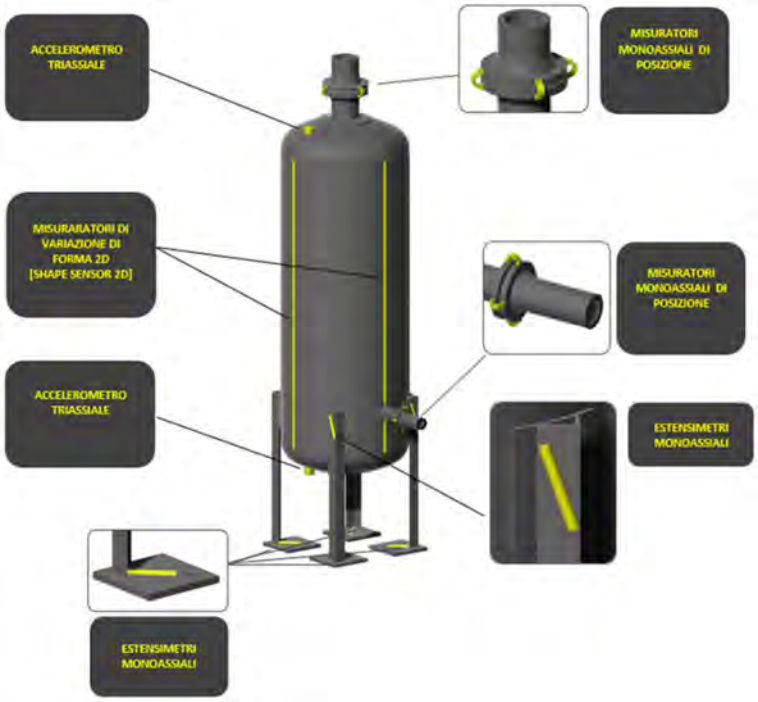


Figura 5. Layout del sistema di monitoraggio basato su tecnologia Fiber Bragg Grating

In relazione all'ubicazione dell'apparecchiatura è stato ipotizzato un layout che prevede l'utilizzo di un'unità optoelettronica di interrogazione per sensori FBG installata all'interno di una palazzina Network Operation Center NOC e collegata ai sensori FBG posti sull'apparecchiatura tramite una dorsale in fibra ottica monomodale. Quest'ultima è connessa con i sensori FBG attraverso dei connettori ottici collegati ad un box che consente ai segnali TX/RX generati dall'interrogatore FBG

di raggiungere, attraverso il cavo in fibra ottica prelevato dalla dorsale preesistente, tutti i sensori/trasduttori FBG installati sull'apparecchiatura.

4.2 Gemello digitale

È stato sviluppato un gemello digitale costituito da un modello agli elementi finiti tridimensionale molto dettagliato, da cui sono stati estratti gli stessi dati che, nel caso reale, verrebbero forniti dai diversi sensori installati sull'apparecchiatura. Nello specifico, è stata simulata la presenza delle principali tipologie di sensori ipotizzate nel precedente layout (accelerometri triassiali, sensori di forma ed estensimetri all'attacco gambe di sostegno del serbatoio). È utile riportare che l'acciaio impiegato nel modello è stato assunto con un comportamento perfettamente elastico al fine di assicurare ridotti tempi di analisi. Il fondo inferiore del serbatoio ha uno spessore di 13 mm, il mantello di 15 mm e il fondo superiore di 18 mm. Le gambe di sostegno hanno un profilo ad L a lati uguali di larghezza pari a 120 mm e spessore 15 mm. Le piaste di ancoraggio al mantello, in grigio in Figura n.6, hanno uno spessore pari a 10 mm. Al modello, infine, è stata applicata una pressione interna, con lo scopo di simulare le reali condizioni di esercizio ed è stata assegnata una storia temporale di accelerazioni alla base avente come scopo quello di simulare le vibrazioni del terreno indotte dal sisma. Le piastre di ancoraggio sono state "fuse" al mantello così da simulare la perfetta adesione tra i due componenti.

Le gambe di supporto, invece, sono state vincolate alle piastre di ancoraggio mediante dei collegamenti analitici aventi come scopo quello di simulare i cordoni di saldatura. Tali collegamenti sono stati realizzati su entrambe le ali delle gambe come nel caso reale. In riferimento alla disposizione dei sensori illustrata in Figura n.5, si sono individuati i punti specifici del modello su cui andare a registrare i dati.

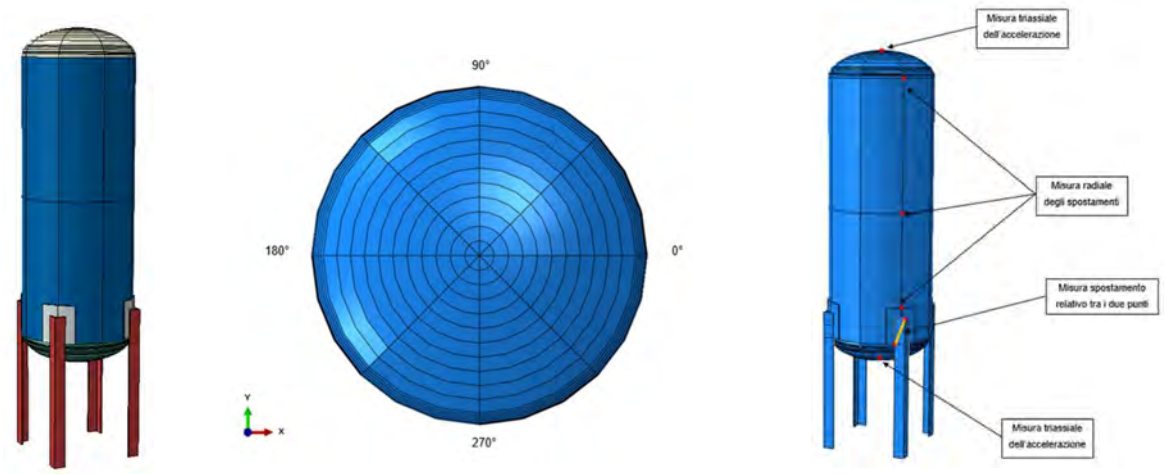


Figura 6. Rappresentazione del gemello digitale con individuazione dei punti di misura e del sistema di riferimento.

In totale si hanno quindi n.2 misure triassiali di accelerazione, n.4 misure di spostamento relativo (uno su ciascuna gamba) e n.12 misure triassiali di spostamento

sul mantello (tre ogni 90° di rotazione). Tuttavia, si fa notare come i misuratori di spostamento relativo tra le flange di attacco delle tubazioni al mantello siano stati trascurati in questa fase di studio. Le tubazioni non sono state modellate nel modello digitale poiché considerate ininfluenti dal punto di vista della massa e della rigidezza.

4.3 Simulazione numerica e discussione dei risultati

Sono stati ipotizzati i n.4 possibili scenari di seguito elencati:

- Case0: la struttura è perfettamente integra;
- Case1: le saldature su un lato di una gamba si sono staccate dalla piastra di ancoraggio (in particolare sulla gamba posta a 180°);
- Case2: la struttura è completamente integra ma gli spessori del fondo inferiore, superiore e del mantello sono ridotti a seguito di usura (10 mm di spessore ciascuno); Case3: Case1+Case2.

Lo scopo dell'analisi è quello di verificare numericamente l'utilità dei risultati forniti dai sensori, nei diversi casi sopra riportati, quando il separatore verticale è soggetto alla medesima azione sismica applicata in direzione orizzontale e in direzione verticale. La storia temporale di accelerazione del suolo (sisma) è stata applicata in direzione 180°- 0° e in direzione verticale lungo l'asse Z. La direzione 1 è quella parallela all'asse X, la direzione 2 all'asse Y e la direzione 3 è quella verticale, normale alle precedenti.

Nelle immagini seguenti si riportano i risultati delle analisi che sono state condotte. Le accelerazioni riportate in Figura 8, registrate in corrispondenza della posizione dei due accelerometri triassiali di Figura 6 (posti in sommità e alla base del serbatoio) non riescono ad individuare il danno simulato alla saldatura, molto probabilmente perché di entità molto limitata, ossia il contributo di rigidezza offerto da questa saldatura è trascurabile rispetto alla rigidezza totale del sistema e delle restanti saldature. Però, risultano differenze nel caso di assottigliamento delle pareti (Case2) e dell'azione combinata di rottura della saldatura e assottigliamento delle pareti (Case3). Quest'ultimo aspetto conferma quanto l'usura delle pareti sia individuabile tramite l'utilizzo di accelerometri, poiché si osserva una riduzione della massa dell'intera struttura e dunque una variazione del periodo di vibrazione. Tuttavia, da una semplice analisi delle accelerazioni non si può stabilire con certezza l'entità dell'assottigliamento del mantello.

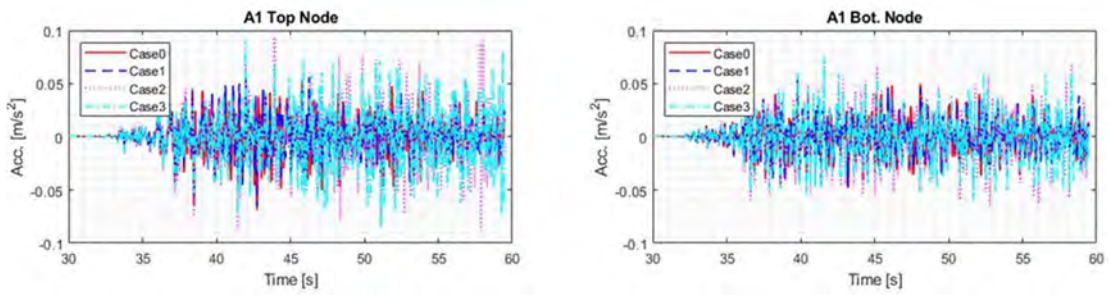


Figura 7. Accelerazioni misurate per i diversi casi, lungo l'asse 1 (x) nei punti in corrispondenza dei due accelerometri (accelerometro superiore Top e inferiore Bot).

Quanto sopra risulta confermato in maniera ancora più evidente dall'analisi degli spettri delle storie accelerometriche riportate in Figura 9. Dunque, gli accelerometri triassiali non consentono di stimare l'entità dell'assottigliamento del mantello e la rottura delle saldature ma rimangono, tuttavia, strumenti di fondamentale importanza per la caratterizzazione dinamica dell'apparecchiatura e per le indicazioni che possono fornire su un possibile assottigliamento delle pareti dovuto alla

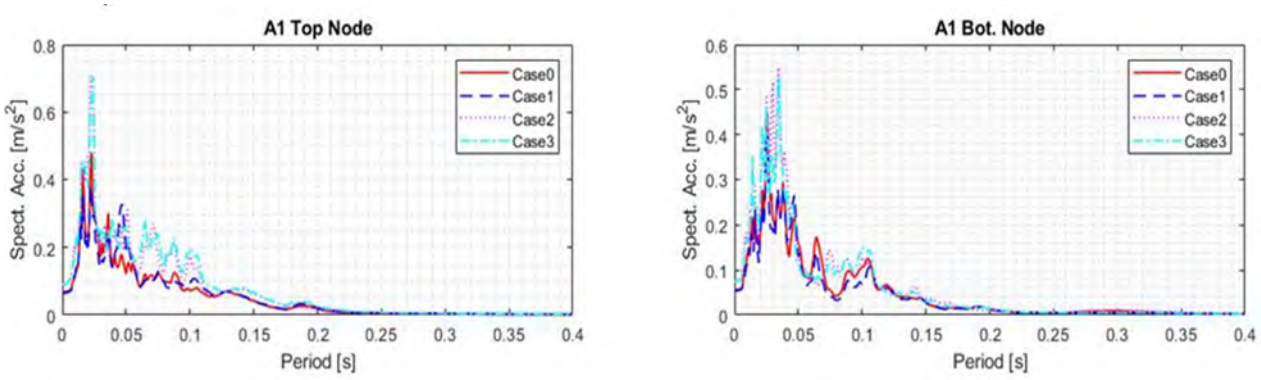


Figura 8. Spettri delle accelerazioni misurate per i diversi casi lungo l'asse 1 (x).

L'analisi degli spostamenti relativi dei nodi sulle gambe misurate per i diversi casi e riportati in Figura 10, permette invece immediatamente di identificare e localizzare la rottura della saldatura. Guardando infatti gli spostamenti relativi alla posizione 180°, si nota fin da subito un grosso scostamento di valori tra Case0 e Case1, molto più evidente che nelle altre direzioni. Questo permette senza dubbio alcuno di identificare l'avvenuta rottura e di localizzarla sulla gamba disposta a 180°. L'assottigliamento delle pareti risulta pressoché indeterminabile seppur qualche picco possa lasciarlo intendere. I risultati del Case3 sono in accordo al Case1 testimoniando quindi un'estrema capacità di questa misurazione di individuare problematiche relative alle connessioni con le gambe. Questi sensori risultano quindi determinanti nelle connessioni strutturali.

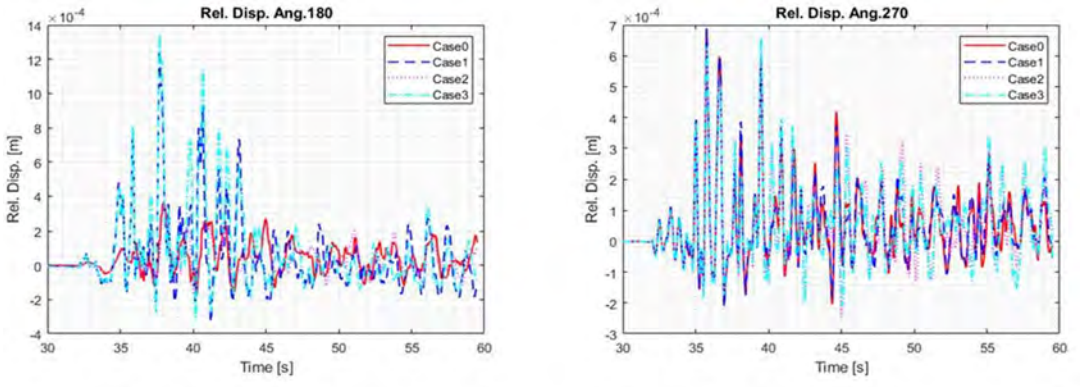


Figura 9. Spostamenti relativi tra i due punti di misurazione di ciascuna gamba misurati per i diversi casi.

In Figura 11 si mostrano i massimi spostamenti di piano (XY) registrati nei vari punti del mantello dell'apparecchiatura. In questo caso, si è limitata l'analisi alla sola presenza della pressione interna e non dell'azione sismica, ritenendo la pressione interna maggiormente impattante nei confronti delle deformazioni delle pareti del serbatoio. Come si può immediatamente notare, il Case2, ovvero assottigliamento delle pareti, colorato in giallo nella figura, presenta valori decisamente più elevati rispetto al Case0 (struttura integra) e al Case1 (rottura della connessione). Quanto evidenziato, testimonia l'elevata efficacia di questa tipologia di sensoristica nell'individuare l'assottigliamento delle pareti e nel confermare quanto inizialmente segnalato dagli accelerometri.

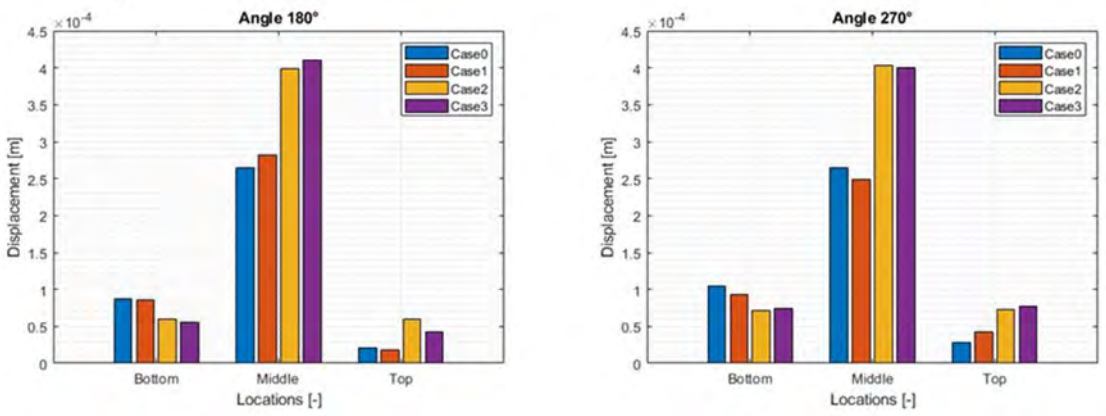


Figura 10. Massimi spostamenti misurati nel piano per i diversi casi in corrispondenza dei punti di rilievo sul mantello.

5. Conclusioni

Il documento mostra come l'integrazione tra sistemi di Early Warning sismico (EW) e Structural Health Monitoring (SHM) rappresenti una delle strategie più efficaci per la mitigazione del rischio NaTech negli impianti industriali. I due sistemi operano su scale diverse ma complementari: l'EW fornisce un preavviso utile alla gestione dell'emergenza a livello impiantistico, mentre lo SHM consente una valutazione puntuale dello stato delle singole apparecchiature, riducendo falsi allarmi e migliorando la capacità decisionale del gestore. I vantaggi per il gestore dell'impianto derivanti dall'adozione di un sistema di monitoraggio sono molteplici e trasversali, spaziando da benefici strettamente operativi ad aspetti legati alla sicurezza e alla conformità normativa. In effetti, nelle norme UNI/TS 11816-1:2021 per la gestione di eventi NaTech nell'ambito degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante, ci sono chiari riferimenti all'utilizzo dei sistemi di monitoraggio strutturale per scopi predittivi e mitigativi, con la possibilità di interrompere automaticamente i flussi in entrata/uscita da apparecchiature che per diversi motivi forniscono dati dei sensori oltre una soglia di allerta prefissata. Di seguito, alcuni dei principali benefici offerti da un sistema di monitoraggio al gestore di uno stabilimento:

- Un sistema EW e SHM rappresenta uno strumento affidabile di prevenzione e mitigazione del rischio NaTech in conformità alle norme UNI/TS 11816-1:2021.

È importante che tali sistemi siano inclusi anche nei piani di sicurezza degli stabilimenti.

- Un sistema di monitoraggio strutturale garantisce il massimo livello di conoscenza delle apparecchiature di un impianto e ciò permette di ridurre le campagne manutentive e di indagini in situ.
- Consente una migliore programmazione delle ispezioni, agendo direttamente sulle apparecchiature che mostrano dati sensoristici oltre il livello di guardia.
- Consente di eseguire la manutenzione predittiva e risk-based delle apparecchiature basata sul post-processing dei dati sensoristici.
- Riduce i tempi di fermo delle apparecchiature grazie ad una più accurata ed efficiente pianificazione degli interventi manutentivi.
- Può rappresentare un sistema di protezione attiva dell'impianto mediante attivazione automatica di misure mitigative e preventive.
- Il sistema consente un monitoraggio costante dell'invecchiamento delle apparecchiature tramite elaborazione periodica dei dati, e dunque riveste un ruolo decisivo anche sulle scelte manutentive o di sostituzione.

Tuttavia, l'attivazione di un sistema di monitoraggio di tipo SHM richiede un grado di conoscenza molto elevato delle apparecchiature presenti in un impianto, la corretta comprensione del loro comportamento strutturale, nonché una progettazione di alto livello con lo sviluppo di un gemello digitale affidabile poiché l'integrazione dei dati nel modello deve consentire di interpretare correttamente le anomalie, aggiornare il modello e supportare decisioni manutentive basate sul rischio.

Bibliografia e sitografia

[1] Raymond M. Measures (2001). Structural monitoring with fiber optic technology. Academic Press.

[2] Guidelines for the management of NaTech events in establishments with major-accident hazards - Part 1: General requirements and earthquake (2021). UNI/CT 266.

[3] Wu et al. (2021). Fiber Bragg Grating-Based Shape Sensing: A Review and Perspective. Conference SPIE – Global Intelligent Industry Conference. DOI: 10.1117/12.2590684

[4] Krausmann, E., Cruz, A.M., Salzano, E. (2017). Natech Risk Assessment and Management: Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations. Elsevier.

[5] Salzano, E., Basco, A., Busini, V. (2013). Industrial accidents triggered by natural hazards: The Natech risk. Chemical Engineering Transactions.

[6] Majumder, M. et al. (2008). Fiber Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. Sensors and Actuators A: Physical. Elesevier.

[7] Inaudi, D., Glisic, B. (2010). Long-term monitoring of structures using fiber optic sensors.

Structural Control and Health Monitoring.
[8] Mobley, R.K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Butterworth-Heinemann.
[9] Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art.
IEEE Transactions on Industrial Informatics
[10] Krausmann, E., Cruz, A.M., Salzano, E. (2017). Natech Risk Assessment
and Management. Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations. Elsevier.
[11] Corritore, D., Paolacci, F., Caprinozzi, S. (2021), A Screening Methodology for the Identification of Critical Units in Major-Hazard Facilities Under Seismic Loading.
Frontiers in Built Environment. DOI: 10.3389/fbuil.2021.780719
[12] Alessandri, S., Caputo, A.C., Corritore, D., Paolacci, F., Phan, H.N. (2017). Probabilistic RIsk Analysis of Process Plants Under Seismic loading based on Monte Carlo Simulations. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.12.013.

Depositi di GPL e direttiva Seveso III: applicazione del metodo ad indici e verifica di compatibilità territoriale

P. Addonizio[2], M. Di Nardo[1], M. Madonna[2], E. Milano[3]

[1]Università Telematica Pegaso
[2]Inail – Uot di Napoli
[3]CNVVF - Direzione Regionale VVF Basilicata

Sommario
La sicurezza negli stabilimenti soggetti alla normativa "Seveso III" (D.Lgs. 105/2015) rappresenta un aspetto cruciale per la prevenzione degli incidenti rilevanti. Il presente studio analizza un centro di stoccaggio di GPL di soglia superiore con capacità complessiva di 3.000 m³, costituito da due serbatoi tumulati, un sistema pompe/compressore e tre baie di carico. L'obiettivo è dimostrare come un approccio metodologico integrato possa garantire elevatilivelli di sicurezza e affidabilità, in linea con i principi di prevenzione e controllo del rischio previsti dalla normativa vigente. La valutazione del rischio è stata condotta applicando il Metodo ad Indici del DM15/05/1996, utilizzato per la prevalutazione delle principali unità d'impianto (stoccaggio, travaso, pompe/compressore). Gli indici di frequenza, contenuto, aggressività e giacenza sono stati corretti in funzione dei fattori di prevenzione e protezione, considerando misure come serbatoi tumulati, sistemi di blocco automatico e rete antincendio. L'analisi ha evidenziato una significativa riduzione dei valori di rischio, con tutte le unità classificate in categoria A e il deposito complessivamente in Classe I, a conferma dell'elevato livello di sicurezza raggiunto. Una successiva analisi strutturata del rischio ha identificato deviazioni operative e modalità di guasto tramite tecniche consolidate di valutazione degli eventi pericolosi. La modellazione numerica degli scenari incidentali, condotta in condizioni meteorologiche conservative, ha permesso di determinare le distanze di danno per rilascio, incendio o esplosione. I risultati confermano che gli effetti potenziali restano confinati all'interno dei limiti aziendali, evidenziando la compatibilità territoriale e l'efficacia delle misure di contenimento adottate.

1. Introduzione

A seguito dell'incidente di Seveso del 10 luglio 1976, l'Unione Europea emanò la Direttiva CEE 82/501 del 24 giugno 1982, finalizzata alla prevenzione dei rischi connessi ad attività industriali che manipolano o detengono sostanze pericolose, potenzialmente in grado di generare gravi conseguenze per l'uomo e l'ambiente [1][2]. Da tale evento deriva la denominazione "Direttiva Seveso", divenuta il riferimento normativo per la disciplina dei grandi rischi industriali. La Seveso I, seguita dalle successive Seveso II e Seveso III, è stata recepita in Italia con il D.P.R. n. 175/1988, integrato dal D.P.C.M. 31 marzo 1989, che ha definito i criteri per l'analisi

del rischio e i contenuti del Rapporto di Sicurezza. Il quadro normativo nazionale è stato completato da provvedimenti specifici tuttora vigenti, tra cui il D.M. 15 maggio 1996 per i depositi di GPL e il D.M. 20 ottobre 1998 per i depositi di liquidi infiammabili e/o tossici. L'attuale riferimento normativo è la Direttiva 2012/18/UE (Seveso III), recepita con il D.Lgs. n. 105/2015, che introduce una classificazione armonizzata delle sostanze pericolose basata sul Regolamento CLP (CE n. 1272/2008). In particolare, l'Allegato I individua le categorie di pericolo e le soglie quantitative (inferiore e superiore) che determinano l'applicazione degli obblighi, inclusa la redazione del Rapporto di Sicurezza per gli stabilimenti di soglia superiore [1][2].

2. Depositi di GPL

I **Gas di Petrolio Liquefatti (GPL)** sono miscele di idrocarburi alifatici, costituite prevalentemente da **propano (C_3H_8)** e **butani (C_4H_{10})**, [3][4] inclusi isomeri e, in alcuni casi, composti non saturi con proprietà chimico-fisiche analoghe. La loro principale caratteristica è la **facile liquefazione a pressioni moderate**, che consente la gestione e lo stoccaggio in fase liquida. Grazie all'elevata densità energetica e alla possibilità di utilizzo di contenitori relativamente leggeri, il GPL può essere trasportato e movimentato in modo efficiente.Una proprietà rilevante è l'elevata **espansione volumetrica in evaporazione**: **1 litro di GPL liquido genera circa 250 litri di vapore** a condizioni standard. Tale caratteristica consente un immagazzinamento compatto e una distribuzione economicamente vantaggiosa, riducendo i costi logistici. Inoltre, la capacità di passare spontaneamente allo stato gassoso e di sviluppare una pressione sufficiente all'alimentazione di apparecchiature termiche rende il GPL idoneo a numerosi impieghi energetici in ambito civile e industriale. La diffusione del GPL nelle aree non servite dalla rete metanifera comporta la presenza sul territorio nazionale di numerosi depositi che **superano le soglie della Direttiva Seveso III**, recepita dal **D.Lgs. n. 105/2015**. Un deposito di GPL rientra nel campo di applicazione della normativa quando la quantità stoccata supera le soglie dell'**Allegato I, Parte 2**:

- **50 t** (soglia inferiore);
- **200 t** (soglia superiore).

Il GPL è classificato come **gas infiammabile** ai sensi del **Regolamento CLP (CE n. 1272/2008) [1]**. In Italia, i depositi di GPL risultano ampiamente diffusi e rappresentano circa **il 25% degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante**. Tale distribuzione è evidenziata dai **dati statistici resi disponibili dal portale ISPRA**, che mostrano il peso dei depositi di GPL sul totale degli stabilimenti RIR presenti sul territorio nazionale (**Figura 1**).



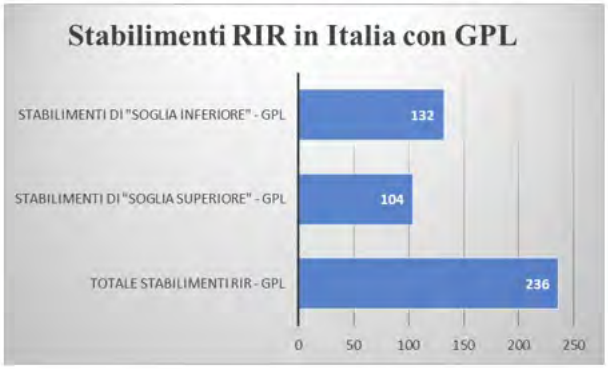


Figura 1-2. Distribuzione stabilimenti GPL (fonte ISPRA)

3. Metodologie di analisi degli eventi incidentali

Nel Rapporto di Sicurezza, la sezione C.4 dell'Allegato C al D.Lgs. n. 105/2015 è dedicata all'Analisi degli eventi incidentali, elemento centrale della dimostrazione di sicurezza. In tale sezione il Gestore riporta i risultati dell'analisi finalizzata all'individuazione e alla caratterizzazione degli scenari di incidente rilevante.

L'analisi prevede la definizione delle ipotesi incidentali e la stima delle frequenze di accadimento, con l'obiettivo di identificare i TOP EVENT, ossia gli eventi rappresentativi e credibili ai fini della sicurezza. Solo per tali eventi si procede alla valutazione delle conseguenze sull'uomo e sull'ambiente, espresse in termini di distanze di danno. Le distanze di danno sono confrontate con le soglie previste dalla normativa vigente, in particolare con il D.M. 9 maggio 2001 in materia di pianificazione territoriale e, per i depositi di GPL, con i criteri specifici del D.M. 15 maggio 1996.

Gli scenari incidentali associati ai TOP EVENT possono determinare:

- irraggiamenti termici (*pool-fire, jet-fire, flash-fire, fireball*);
- sovrapressioni (*VCE, UVCE, BLEVE*);
- effetti tossici dovuti a rilasci e dispersioni di sostanze pericolose.

Gli scenari incidentali costituiscono la sintesi dell'analisi, poiché consentono di valutare l'estensione degli effetti e di formulare considerazioni su effetto domino, misure di protezione e compatibilità urbanistica delle aree limitrofe allo stabilimento (Tabella 1).

Scenario incidentale	Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili	Danni alle strutture / Effetti domino
Incendio *(radiazione termica stazionaria)*	12,5 kW/m²	7 kW/m²	5 kW/m²	3 kW/m²	12,5 kW/m²
BLEVE / Fireball *(radiazione termica variabile)*	raggio fireball 350 kJ/m²	200 kJ/m²	125 kJ/m²	—	100 m da parco bombole 600 m da stoccaggio in sfere 800 m da stoccaggio in cilindri
Flash-fire *(radiazione termica istantanea)*	LFL	1/2 LFL	—	—	—

Scenario incidentale	Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili	Danni alle strutture / Effetti domino
UVCE *(sovrappressione di picco)*	0,6 bar (≈0,3 bar*)	0,14 bar*	0,07 bar	0,03 bar	0,3 bar

Tabella 1. Valori delle soglie di danno per depositi di GPL D.M. 15 Maggio 1996

La fase di analisi degli eventi incidentali si basa sull'applicazione di differenti tecniche ormai consolidate sia di tipo ***deduttivo*** e di tipo ***induttivo*** quantitative e non.
Queste tecniche sono rappresentate da analisi storica, Check-list, What if, HazOp, FMEA, FMECA, Alberi dei guasti, Alberi degli Eventi e dai Metodi ad Indici.
L'applicazione combinata di queste tecniche consente di pervenire, a partire dai TOP EVENT, alla individuazione dei possibili scenari incidentali (incidente 1, incidente 2, etc..) ed alla determinazione delle probabilità di accadimento dell'incidente finale.

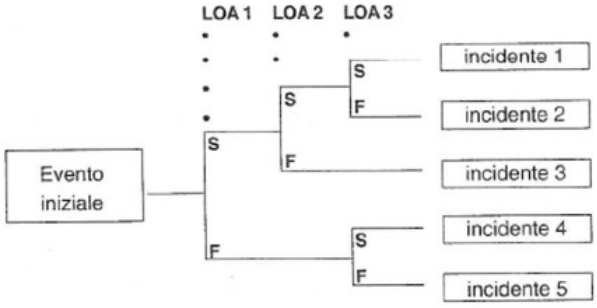


Figura 3. Schema di Albero degli eventi (non quantitativo) con individuazione di possibili incidenti

L'attribuzione delle frequenze di successo o di fallimento ai diversi LOA (Lines of Assurance) consente di svolgere anche una analisi quantitativa dell'evento oggetto di studio al fine di poter pervenire alle frequenze di accadimento dei diversi incidenti.

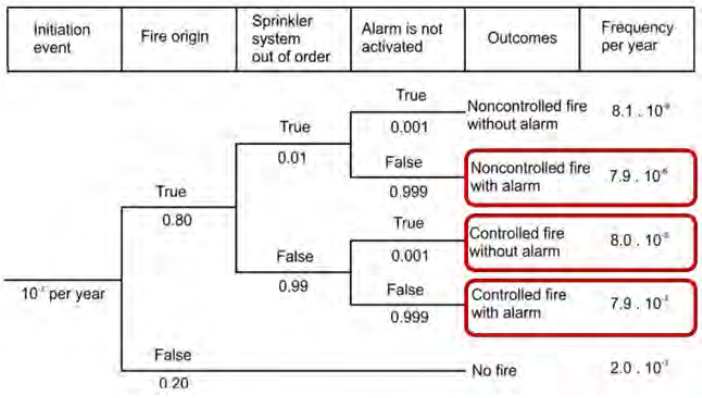


Figura 4. Albero degli eventi (quantitativo) con evidenziati gli incidenti credibili

Per i soli incidenti credibili (caratterizzati da una frequenza di accadimento f $>10^{-7}$ occ/anno) si procederà poi alla successiva modellazione matematica degli effetti ed alla definizione delle aree di danno.

4. Metodo ad Indici di cui al D.M. 15/05/1996

Il **D.M. 15 maggio 1996** (*Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di GPL*) introduce un **metodo indicizzato** per la categorizzazione dei depositi di GPL in funzione dei rischi associati al loro esercizio, basato sul calcolo di un **Indice Generale di rischio** da confrontare con una scala di valori prefissata (D.M. 15/05/1996, Criteri generali). La valutazione è condotta per **unità logiche** ed eventuali sottounità, individuate in base alla configurazione impiantistica e alle modalità operative del deposito (D.M. 15/05/1996, Allegato – Unità logiche). La classificazione numerica di ciascuna unità dipende dalle **proprietà e quantità delle sostanze**, dal **layout e dalle caratteristiche progettuali** e dagli **aspetti gestionali e organizzativi**. Il metodo si articola in **due fasi** (D.M. 15/05/1996, Allegato – Metodo indicizzato). Nella **prima fase** sono definiti i fattori di penalizzazione associati ai rischi di sostanza, di processo, di quantità e di layout (fattori M, P, s, Q, L), e vengono calcolati quattro **indici intrinseci**: incendio (F), esplosione confinata (C), esplosione in aria (A) e rischio generale (G). Per i depositi di GPL non viene calcolato l'indice intrinseco di tossicità. Il valore di G consente di determinare la **categoria intrinseca** dell'unità, secondo le soglie riportate nel decreto (**Tabella di classificazione degli indici generali**) Nella **seconda fase** sono applicati i **fattori di compensazione** (K1–K6), che tengono conto delle misure di prevenzione e mitigazione adottate, portando al calcolo degli **indici compensati** F', C', A' e G' e alla determinazione della **categoria compensata** dell'impianto, come sintetizzato nelle **tabelle di confronto tra indici intrinseci e compensati** del D.M. 15/05/1996. La **Tabella 3**, consente di valutare l'**efficacia delle misure di sicurezza**, di individuare le **categorie più critiche** e di trarre indicazioni per **interventi di miglioramento impiantistico e organizzativo**, fermo restando che i benefici della compensazione dipendono dal mantenimento delle condizioni operative previste, in particolare dalla manutenzione e dal rispetto delle procedure di gestione.

Indice di rischio generale	Categoria
0 – 100	A
101 – 1100	B
1101 – 12 500	C
> 12 500	D

Tabella 2. Categorizzazione delle unità logiche

In funzione della categorizzazione delle diverse unità logiche si determina, la classificazione generale del deposito in una scala che va da **I** (se tutte le unità logiche risultano di categoria A) a **IV** (se due o più unità logiche risultano di categoria D).
Una volta definita la classe del deposito, in relazione agli eventi incidentali ipotizzabili ed alle categorie degli effetti, si stabilisce la **compatibilità territoriale** secondo le categorie territoriali dalla norma ed individuate con delle lettere da A a F.

5. Applicazione del Metodo ad Indici su un deposito

In un deposito di GPL senza imbottigliamento si possono identificare tre unità logiche (anziché cinque del D.M. 15/05/1996): Stoccaggio – Pompe – Travaso. La configurazione tipica comprende un parco serbatoi (uno o più serbatoi cilindrici orizzontali, tumulati o meno), un'unità pompe/compressore per la movimentazione del prodotto e un'area travaso per il carico delle autobotti tramite bracci di carico. Come caso studio si considera un deposito soglia superiore con due serbatoi interrati per circa 1400 t di GPL, progettato secondo il D.M. 13/10/1994 e dotato di misure avanzate di sicurezza (progettazione strutturale conforme, fire-proofing, protezioni primaria/secondaria, sistemi Fire&Gas, ESD, allarmi). L'unità pompe include 2 pompe centrifughe e un compressore (anche per eventuale scarico autobotti), con protezione Fire&Gas. L'area travaso dispone di più bracci di carico, separati da schermatura in c.a., installati all'aperto su piazzola protetta e con dispositivi di blocco/intercettazione. L'applicazione del metodo indicizzato a questa tipologia di deposito evidenzia una riduzione significativa degli indici di rischio, con tutte le unità in Categoria A e il deposito complessivamente in Classe I, confermando l'elevato livello di sicurezza raggiunto.

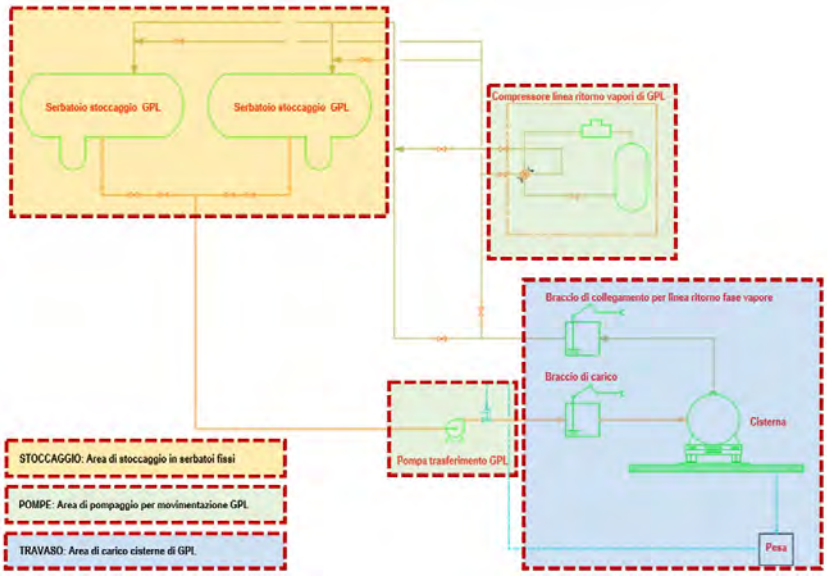


Figura 5. Schema di tipico deposito di GPL costituito da due serbatoi di stoccaggio e baia di carico con individuazione delle unità logiche di cui al D.M. 15 Maggio 1996

Tabelle dei rischi – Unità logiche e indice di rischio

Unità logica	Indice di rischio generale non compensato (G)	Categoria unità logica (iniziale)	Indice di rischio generale compensato (G')	Categoria unità logica (finale)	Classificazione deposito
Stoccaggio	**6000**	**C**	**20**	**A**	**I**
Pompe	**20000**	**D**	**100**	**A**	**I**
Travaso	**250**	**B**	**9**	**A**	

Tabella 3. Sintesi dei risultati dell'applicazione del metodo indicizzato alle unità logiche

6. Gli scenari incidentali e la compatibilità territoriale

Ai fini della verifica di compatibilità territoriale del deposito con l'ambiente circostante occorre individuare gli eventi incidentali e le categorie degli effetti ritenuti credibili. Il metodo indicizzato consente di escludere la possibilità di accadimento di alcuni eventi e precisamente il BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) del serbatoio) del serbatoio (in caso di serbatoi interrati) e della cisterna in fase di carico (unità di categoria A, presenza di dispositivi di sicurezza).

I risultati dell'analisi storica e statistica [2] evidenziano che in queste tipologie di impianti industriali gli eventi incidentali ritenuti credibili possono coinvolgere in genere la fase di carico delle autobotti con possibile sovrapressione e rilascio di GPL in corrispondenza della baia di carico, perdite da flangia nel compressore, rotture casuali in area stoccaggio con rilascio di GPL in fase liquida, rotture casuali in area pompe con rilascio di GPL in fase liquida, rilasci di GPL sia in fase liquida che fase vapore in area travaso. Si riporta di seguito, in tabella, per gli scenari con maggiore frequenza di accadimento e l'estensione approssimata delle aree di danno.

grandezza delle conseguenze espresse come effetti di Jet-Fire e Pool-Fire.

Scenari e distanze di effetto – Jet Fire (foro da 4") e Pool Fire (foro da 1")

Scenario	Jet Fire – 12.5 kW/m²	Jet Fire – 7 kW/m²	Jet Fire – 5 kW/m²	Jet Fire – 3 kW/m²	Pool Fire – 12.5 kW/m²	Pool Fire – 7 kW/m²	Pool Fire – 5 kW/m²	Pool Fire – 3 kW/m²
Rottura casuale area stoccaggio	70	80	85	90	40	45	55	60
Rottura casuale area pompe	70	80	85	90	40	45	55	60
Perdita da flangia compressore	20	23	25	27	–	–	–	–
Rilascio fase liquida per rottura	70	80	85	90	45	50	53	58

Scenario	Jet Fire – 12.5 kW/m²	Jet Fire – 7 kW/m²	Jet Fire – 5 kW/m²	Jet Fire – 3 kW/m²	Pool Fire – 12.5 kW/m²	Pool Fire – 7 kW/m²	Pool Fire – 5 kW/m²	Pool Fire – 3 kW/m²
casuale								
Rilascio fase vapore per rottura casuale	25	30	33	38	–	–	–	–
Sovrappressione autobotte	20	30	35	45	30	35	40	45

Tabella 4. Scenari incidentali da analisi storica e statistica con estensione approssimata aree di danno

Queste informazioni, trasportate nell'elaborato ERIR, consentono all'Ente a cui spetta la pianificazione territoriale di effettuare un corretto controllo dell'urbanizzazione e la verifica della compatibilità territoriale dello stabilimento con il territorio circostante (categorie da A a F).

Classe del deposito	Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili
I	EF	DEF	CDEF	ABCDEF
II	F	EF	DEF	BCDEF
III	F	—	EF	CDEF

Tabella 5. Depositi Nuovi

Classe del deposito	Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili
I	DEF	CDEF	BCDEF	ABCDEF
II	EF	DEF	CDEF	BCDEF
III	F	EF	DEF	CDEF
IV	F	F	EF	DEF

Tabella 6. Depositi vecchi

7. Conclusioni

Per i depositi di GPL in Italia, il quadro normativo della Seveso III stabilisce obblighi in materia di prevenzione degli incidenti rilevanti e di limitazione delle loro conseguenze, mentre le disposizioni nazionali forniscono strumenti operativi per la redazione dei Rapporti di Sicurezza e per la pianificazione territoriale. Il metodo indicizzato introdotto dal Decreto Ministeriale 15 maggio 1996 rimane uno

strumento pragmatico, poiché combina la scomposizione dell'impianto, il calcolo degli indici di rischio e una rappresentazione strutturata delle misure di sicurezza tramite indici intrinseci e compensati [4]. Nel caso di studio di un impianto soggetto alla soglia superiore (circa 1.400 tonnellate, due serbatoi interrati), il metodo evidenzia la criticità relativa delle funzioni di pompaggio/compressione e di trasferimento nella valutazione intrinseca. Mostra inoltre come le misure di protezione riconosciute possano ricondurre le unità logiche in Categoria A dopo l'applicazione dei fattori di compensazione, determinando una classificazione complessiva in Classe I. Gli scenari incidentali credibili sono principalmente associati alle operazioni di trasferimento e alle perdite dalle apparecchiature; le relative distanze di effetto forniscono una base difendibile per le verifiche di compatibilità territoriale, coerente con le linee guida consolidate per la pianificazione dell'uso del suolo nel contesto Seveso [7, 8]. Infine, il significato degli indici compensati dipende dal mantenimento nel tempo delle prestazioni delle salvaguardie. L'integrità meccanica, la disciplina operativa e la verifica delle funzioni di rilevazione e di arresto d'emergenza sono pertanto essenziali per preservare la validità del Rapporto di Sicurezza e delle decisioni di pianificazione che ne derivano [5, 6].

Bibliografia e sitografia

[1] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale: https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it/seveso-query-105/Default.php (ultimo accesso 10/07/2025)

[2] American Petroleum Institute. API RP 581 Risk-Base Inspection Technology. 2008

[3] Health and Safety Executive. (2025). Fireball mathematical models and experimental data: A literature review (Research Report RR1185). https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr1185.htm

[4] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2025). Seveso query database. https://www.rischioindustriale.isprambiente.gov.it/seveso-query-105/

Ministero dell'Interno. (1996). Decreto ministeriale 15 maggio 1996: Criteri per l'analisi e la valutazione dei rapporti di sicurezza relativi agli impianti di deposito di [5] GPL e di oli minerali. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

National Fire Protection Association. (2025). Placing LP-gas containers: Fact sheet (NFPA 58 references). https://www.nfpa.org/downloadable-resources/fact-sheets/placing-lp-gas-containers-fact-sheet

[6] TNO – Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. (1997). Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (Yellow Book / PGS 2). https://resolver.tno.nl/uuid:4928209c-5998-4261-9393-3d55073e6e87

[7] Bellegoni, M., Marroni, G., Mariotti, A., et al. (2024). Application of uncertainty quantification techniques in the framework of process safety studies: Advanced dispersion simulations. Canadian Journal of Chemical Engineering. https://doi.org/10.1002/cjce.25410

Il rischio vento ed il progetto REDUCE METEO HAZARDS

M.A. Zanini[1], L. Hofer[1], E.J. Ude[1], A. Sidhu[1], M. Ciucci[2], A. Marino[2], A. Lumini[3], A. Franco[3], M. Miglietta[4], E. Avolio[4], E. Pons[5], P. Colella[5], F. Domenichini[6]

[1]Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA)
[2]Inail - Dit
[3]Università di Bologna - Dipartimento di Informatica - Scienza e Ingegneria (DISI)
[4]Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)
[5]Politecnico di Torino - Dipartimento ENERGIA (DENERG)
[6]Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto

Sommario
Il rischio vento rappresenta una minaccia crescente per territori e infrastrutture. In particolare, l'aumento di temperature globali e dell'energia disponibile nell'atmosfera, può favorire eventi ventosi più frequenti e talvolta più intensi, soprattutto in associazione a tempeste e fenomeni convettivi severi. Negli ultimi anni, danneggiamenti ad elementi strutturali, non strutturali e di processo hanno evidenziato la necessità di una maggiore attenzione a questi fenomeni naturale, anche per l'incolumità delle persone. In questo contesto si inserisce il progetto REDUCE METEO HAZARDS, per la progettazione, REalizzazione e sperimentazione Di Un prototipo di sistema app web-based per la gestione e mitigazione dei risChi lEgati ai METEOrogical HAZARDS connessi al cambiamento climatico. Il progetto vede coinvolti l'INAIL (Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro Infortuni sul Lavoro), il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Padova, l' L'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), il Dipartimento di Informatica - Scienza e Ingegneria (DISI) dell'Università di Bologna, il Dipartimento ENERGIA (DENERG) del Politecnico di Torino e l'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. Questo contributo vuole quindi presentare le principali danneggiamenti che raffiche forti di vento possono causare in ambito lavorativo-industriale e i principali obiettivi ed organizzazione del progetto REDUCE METEO HAZARDS.

1. Danneggiamenti su stabilimenti e componenti industriali

Nella società moderna gli impianti industriali giocano un ruolo chiave per lo sviluppo economico di un paese e della sua società. Al loro interno sono presenti diverse tipologie di processi produttivi, tra cui anche la produzione o l'utilizzo di sostanze chimiche, combustibili, esplosive o inquinanti. Un loro danneggiamento può innescare una serie di conseguenze impattanti per i lavoratori, ma anche per l'ambiente circostante. In molti casi, anche le strumentazioni e le strutture esterne ad uno stabilimento industriale possono essere soggette danneggiamenti da fenomeni

naturali estremi. L'intersezione tra rischi naturali e incidenti industriali prende il nome di eventi NaTech (Natural events Triggering Technological Disaster), ovvero eventi naturali che innescano incidenti tecnologici. Il verificarsi di questi eventi non è così improbabile; infatti, fino al 74% degli eventi NaTech nell'industria di processo è provocato da eventi meteorologici estremi come le tempeste [1]. In Figura 1 vengono riportati alcuni esempi di eventi NaTech dovuti a diversi eventi naturali.

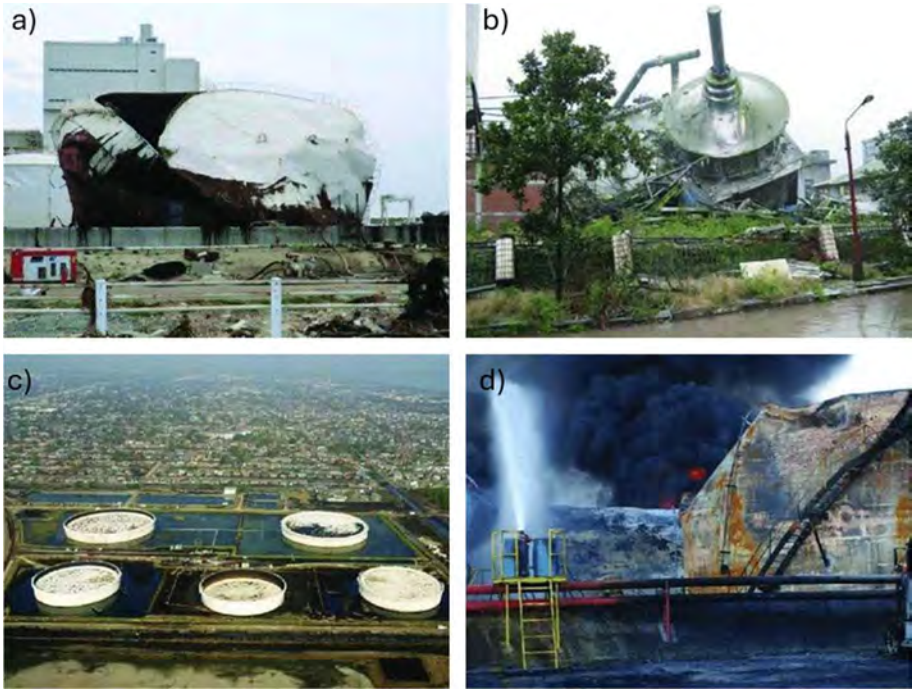


Figura 1. a) Distruzione di un serbatoio di stoccaggio da parte dello tsunami successivo al terremoto di Tōhoku del 2011, Giappone (Foto: A. Kouchiyama); b) crollo di un'unità di processo a seguito del terremoto di Wenchuan del 2008, Cina (Foto: E. Krausmann); c) danneggiamento di serbatoi di idrocarburi e fuoriuscita di petrolio durante la mareggiata dell'uragano Katrina, USA, 2005 (Foto: B. McMillan, FEMA); d) incendio di un serbatoio di carburante per jet a seguito del tifone Pongsona, Guam, 2002 (Foto: A. Booher, FEMA).

Oltre al danneggiamento strutturale, i venti forti possono anche smuovere detriti che sparati a grande velocità su oggetti e persone possono aggravare gli effetti dell'evento straordinario. L'interazione tra le strutture ed il vento è generalmente molto complessa. In generale, quando il vento scorre attorno e sopra un edificio genera un campo di pressione variabile in cui le superfici sopravento sperimentano una pressione positiva, mentre le superfici sottovento, le pareti laterali e le coperture sperimentano una depressione. L'entità di queste pressioni è proporzionale al quadrato della velocità del vento, motivo per cui anche aumenti moderati della velocità del vento possono provocare sollecitazioni significative sugli elementi investiti dal flusso. Inoltre, la sua natura turbolenta e "a raffica" può generare effetti dinamici sulle strutture coinvolte, amplificando quindi le sollecitazioni. In Figura 2 vengono riportati alcuni esempi di rottura di serbatoi a causa venti estremi; in molti casi, la rottura è innescata da fenomeni di instabilità delle pareti, in altri casi dall'urto di oggetti e dalla rimozione del tetto galleggiante.



Figura 2. Danni da vento in serbatoi industriali

Un altro problema è rappresentato dai capannoni industriali con copertura e rivestimenti di parete leggeri. In questo caso può verificarsi la rimozione dei pannelli stessi e talvolta la pressurizzazione dell'edificio con incremento dei danni (Figura 3).

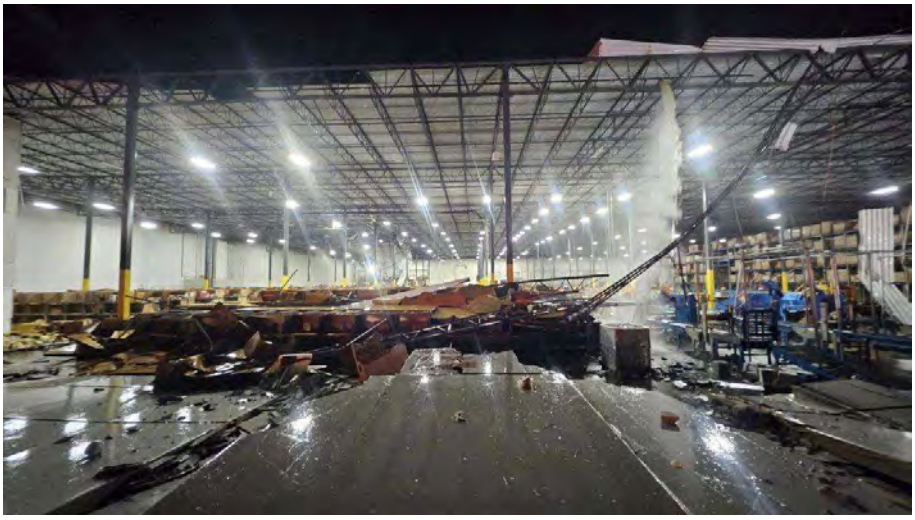


Figura 3. Cedimento del rivestimento di parete indotto dal vento in un magazzino industriale a grande luce, Brownsburg, Indiana, USA, aprile 2025 (Steve Jones).

Sebbene di natura diversa da venti lineari forti, vale la pena ricordare in questo contesto il Tornado della Riviera del Brenta accaduto l'8 luglio 2015. A seguito di tale avvenimento, un gruppo di ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Padova, in collaborazione con la Protezione Civile della Regione Veneto, ha eseguito una estesa attività di rilievo del danno agli edifici che sono stati interessati da danneggiamenti nei Comuni di Pianiga, Dolo e Mira

(Provincia di Venezia), i cui risultati sono stati rielaborati e sintetizzati in [2]. Il tornado è stato stimato di intensità pari a EF4, in accordo con la scala Enhanced-Fujita [3]. Le attività di rilievo hanno evidenziato una serie di peculiarità relative alla propensione al danneggiamento di edifici ordinari soggetti alle pressioni indotte dalle correnti durante il transito di un tornado. Nello specifico si è osservata una certa sequenzialità nel danneggiamento che parte dal manto di copertura, si estende sulla struttura portante del tetto e poi prosegue prima sulle pareti dei piani più alti e poi sui piani inferiori. Nello specifico si è osservata una certa sequenzialità nel danneggiamento, con l'iniziale erosione del manto di copertura con rimozione di coppi, tegole (*DS0-DS1*), successiva asportazione di parti della copertura fino al completo scoperchiamento dei fabbricati (*DS2*), e per eventi molto intensi l'azione di "erosione" da parte delle correnti con danneggiamento dei muri portanti al piano inferiore rispetto al livello di copertura (*DS3*) e via proseguendo ai piani inferiori (DS4), fino alla completa distruzione del fabbricato (DS5).



Figura 4: Rilievo del danno a seguito del tornado della Riviera del Brenta 2015 [2].

La meccanica di danneggiamento è comune a differenti tipologie strutturali, tuttavia si è riscontrata la presenza di alcuni fattori peculiari che sembrerebbero peggiorare la risposta strutturale, accrescendo di fatto la vulnerabilità alle azioni indotte dal tornado. Vista la caratteristica di sequenzialità del danno, l'integrità della copertura gioca ruolo fondamentale nel prevenire lo scoperchiamento dell'edificio e la conseguente pressurizzazione degli ambienti interni. In generale si nota come la tipologia strutturale della copertura influenzi significativamente la vulnerabilità della costruzione. I tetti in calcestruzzo armato, più pesanti di quelli in legno e meglio ancorati, raramente hanno portato ad un completo collasso della struttura sottostante, evidenziando solo una parziale o totale rimozione delle tegole. Viceversa, coperture in legno risultano più vulnerabili, anche per venti di intensità media. Per quest'ultime, in particolare, la resistenza allo scoperchiamento viene spesso a mancare vista l'assenza di ancoraggi specifici di tipo meccanico alle murature portanti. Un comportamento analogo viene evidenziato anche nelle coperture di

edifici industriali, composte in molti casi da lamiere o pannelli sandwich, per cui venti di intensità media hanno causato lo scoperchiamento del fabbricato.



Figura 5. Rimozione della copertura leggera in capannoni industriali [2].

La presenza di sporgenze quali camini rappresenta un ulteriore elemento di debolezza, in quanto va ad interrompere la continuità della copertura, e in caso di crollo può danneggiare la copertura stessa favorendone l'ingresso delle correnti. La presenza di coperture a falde inclinate disallineate rappresenta un'altra configurazione vulnerabile, in quanto la falda alla quota maggiore risulta più esposta allo scoperchiamento; in generale, tutte le linee di discontinuità nel profilo di un fabbricato possono essere punti di potenziale partenza del danneggiamento (ad esempio la linea di colmo della copertura) specie se i dettagli costruttivi non sono adeguatamente curati. Infine, da menzionare tra i fattori di vulnerabilità la presenza di porticati e aperture che possono favorire fenomeni di pressurizzazione.

2. Il progetto REDUCE METEO HAZARDS

Il progetto REDUCE METEO HAZARDS si inserisce nel contesto delle crescenti criticità legate agli eventi Natech, su cui INAIL sta portando avanti da molti anni progetti di ricerca finalizzati alla gestione del rischio Natech [4]. Nel caso specifico del progetto REDUCE METEO HAZARDS la tipologia di evento naturale oggetto di approfondimento sono gli eventi meteorologici estremi, che negli ultimi anni stanno mostrando una frequenza e un'intensità sempre maggiori, con impatti rilevanti sia sulla sicurezza dei lavoratori sia sulla resilienza delle infrastrutture. In questo scenario, il progetto si propone di sviluppare strumenti avanzati e metodologie innovative per migliorare la comprensione, la previsione e la gestione del rischio associato ai fenomeni meteo più pericolosi.

In particolare, uno degli obiettivi principali è quello di approfondire la conoscenza dei meccanismi meteorologici che sono alla base degli eventi di convezione intensa. Tali fenomeni includono tempeste di vento, tornado, precipitazioni intense e attività ceraunica, tutti caratterizzati da elevata variabilità spazio-temporale e da una complessa predicibilità. Migliorare la capacità di analisi e previsione di questi eventi

rappresenta un passaggio fondamentale per ridurre i danni e aumentare la sicurezza operativa nei contesti lavorativi esposti.
Un ulteriore obiettivo del progetto consiste nell'integrazione di modelli analitici e statistici per la valutazione del rischio con strumenti tecnologici avanzati per la gestione delle emergenze. Tra questi rientrano, ad esempio, sistemi di localizzazione dei lavoratori e dispositivi per il monitoraggio in tempo reale degli ambienti di lavoro. Questa integrazione consente di superare l'approccio tradizionale, basato su scenari statici definiti a priori, introducendo invece una valutazione dinamica del rischio che si aggiorna continuamente in funzione delle condizioni meteorologiche e operative effettive.
Il progetto mira inoltre allo sviluppo di un sistema di allertamento evoluto, basato su tecniche di apprendimento automatico proprie dell'intelligenza artificiale. Tale sistema sarà progettato per operare su più canali di comunicazione (multicanale), garantendo non solo la diffusione tempestiva delle notifiche di allerta, ma anche la loro effettiva ricezione e comprensione da parte dei destinatari. Questo aspetto è cruciale per assicurare una risposta rapida ed efficace nelle situazioni di emergenza.Per il raggiungimento di questi obiettivi, il progetto è articolato in una serie strutturata di Work Package (WP), il cui diagramma logico relazionale è riportato in Figura 6.

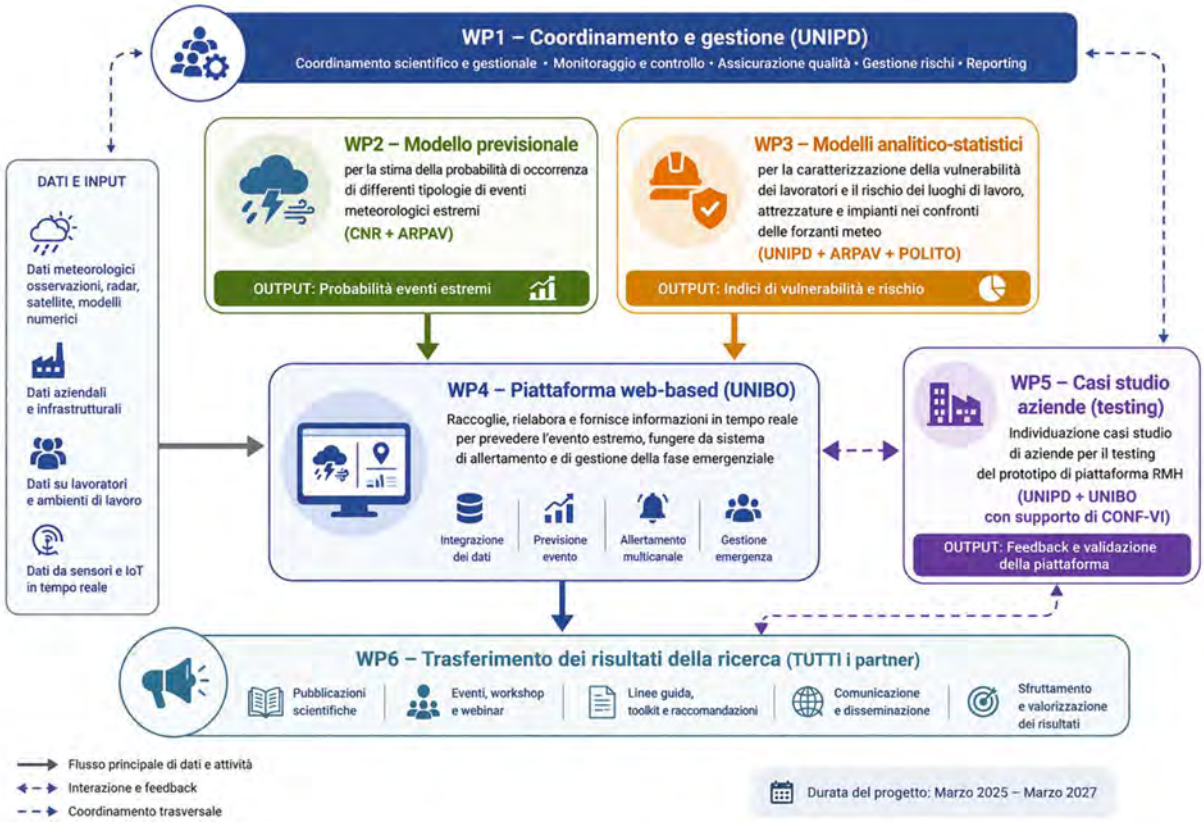


Figura 6. Struttura del Progetto BRIC2024 INAIL Reduce Meteo Hazards.

Ciascuno dei WP contribuisce in modo specifico allo sviluppo complessivo della soluzione:

1. **Sviluppo di modelli previsionali**: realizzazione di un sistema in grado di stimare la probabilità di occorrenza di diverse tipologie di eventi meteorologici estremi, attraverso l'analisi di dati storici, osservazioni in tempo reale e modelli numerici avanzati.
2. **Analisi della vulnerabilità e del rischio**: sviluppo di modelli analitico-statistici finalizzati a caratterizzare la vulnerabilità dei lavoratori e a valutare il rischio associato a luoghi di lavoro, attrezzature e impianti rispetto alle forzanti meteorologiche.
3. **Sviluppo della piattaforma digitale**: progettazione e implementazione di una piattaforma applicativa web-based in grado di raccogliere, integrare ed elaborare dati in tempo reale. La piattaforma sarà utilizzata sia per la previsione degli eventi estremi sia come sistema di allertamento e supporto alla gestione delle emergenze.
4. **Validazione tramite caso studio**: applicazione e test delle soluzioni sviluppate in un contesto reale, al fine di verificarne l'efficacia, l'affidabilità e la trasferibilità operativa.

Il progetto si sviluppa nell'arco temporale compreso tra marzo 2025 e marzo 2027, periodo durante il quale verranno progressivamente implementate, integrate e validate tutte le componenti previste.

3. Risultati preliminari

Le attività previste dal progetto sono in corso di sviluppo ed attualmente sono stati ottenuti nei vari WP alcuni risultati preliminari di seguito brevemente descritti. Per quanto riguarda lo sviluppo di modelli previsionali, considerando come area geografica di interesse i territori del Veneto, Trentino Alto-Adige e Friuli-Venezia Giulia, è stata svolta una preliminare ricerca storica per la finestra temporale 2015-2025, al fine di ottenere informazioni sulla distribuzione geografica e frequenza di accadimento di eventi metereologici estremi. Nello specifico, sono stati individuati 225 fenomeni estremi classificabili come tornado, e 1199 eventi riconducibili a raffiche lineari di vento. È stato poi sviluppato un preliminare modello di simulazione a scala locale, e sono stati effettuati alcuni preliminari test sulla sua capacità previsionale a livello di direzionalità e profilo verticale della velocità del vento. È stato altresì sviluppato il diagramma logico del flusso informativo di dati da utilizzare per lo svolgimento delle simulazioni modellistiche. In Figura 7 vengono riportati alcune elaborazioni preliminari ottenute come output del WP2.

Relativamente alle attività del WP3, è stata svolta un'estesa campagna di simulazioni numeriche con l'obiettivo di quantificare la probabilità di osservare scenari di danneggiamento ad elementi strutturali, non strutturali, impianti. E' stata inizialmente svolta una revisione di letteratura dei modelli utilizzati nel settore

dell'ingegneria civile per la valutazione dei carichi indotti da vento e scenari meteorologici eccezionali, e successivamente si è focalizzata l'attenzione sulle evidenze di danno riscontrate in occasione di recenti eventi meteorologici, in maniera tale da poter individuare le componenti strutturali, non strutturali e impiantistiche più vulnerabili, e poter definire una tassonomia di componenti e sistemi strutturali comunemente riscontrabili all'interno di siti produttivi e aziende, da analizzare numericamente, basata su criteri di tipo *evidence-based*.

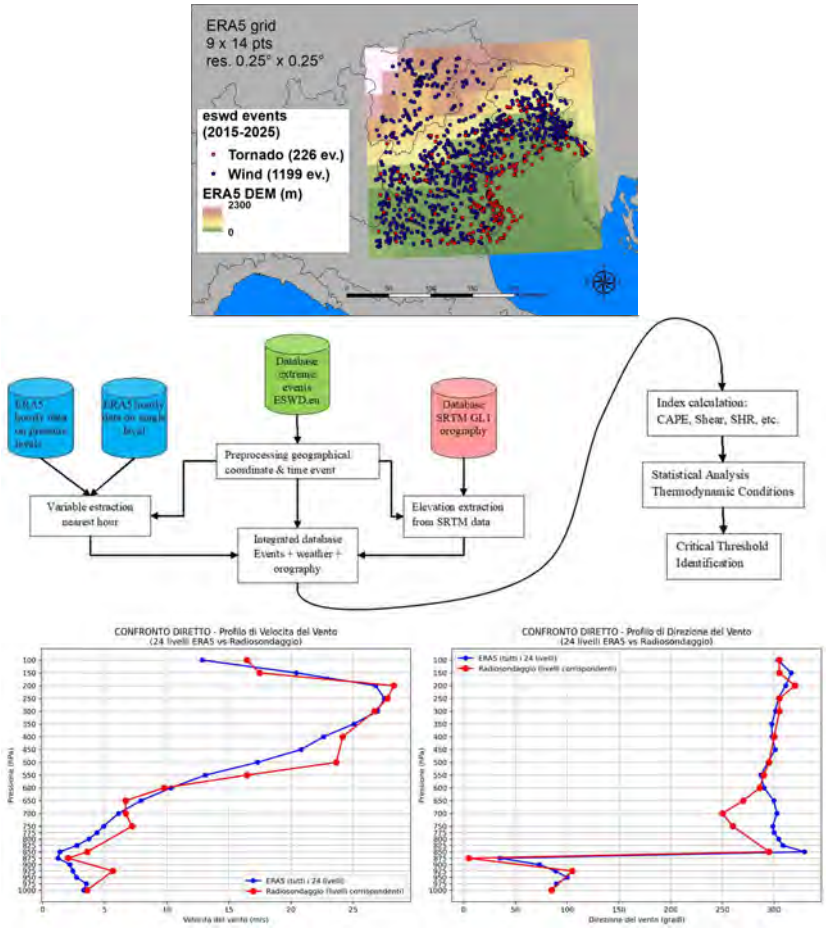


Figura 7. Risultati preliminari relativi allo sviluppo del modello meteorologico previsionale a scala locale.

Per quanto riguarda gli edifici industriali, si è focalizzata l'attenzione sulle coperture leggere in acciaio, che hanno evidenziato in molti casi elevata vulnerabilità strutturale e propensione allo scoperchiamento in caso di forti raffiche di vento. E' stata pertanto eseguita un'ampia campagna di analisi di affidabilità strutturale mirata a valutare su base parametrica la probabilità di danneggiamento di tale tipologia di coperture al variare delle caratteristiche geometrico-strutturali della stessa. I risultati ottenuti hanno permesso di ottenere delle librerie di curve di fragilità utili per valutare la probabilità di collasso (con meccanismo di danno relativo allo scoperchiamento) della copertura in funzione della velocità di picco del vento. In Figura 8 vengono riportati alcuni esempi di curve di fragilità ottenute nell'ambito delle attività del WP3.

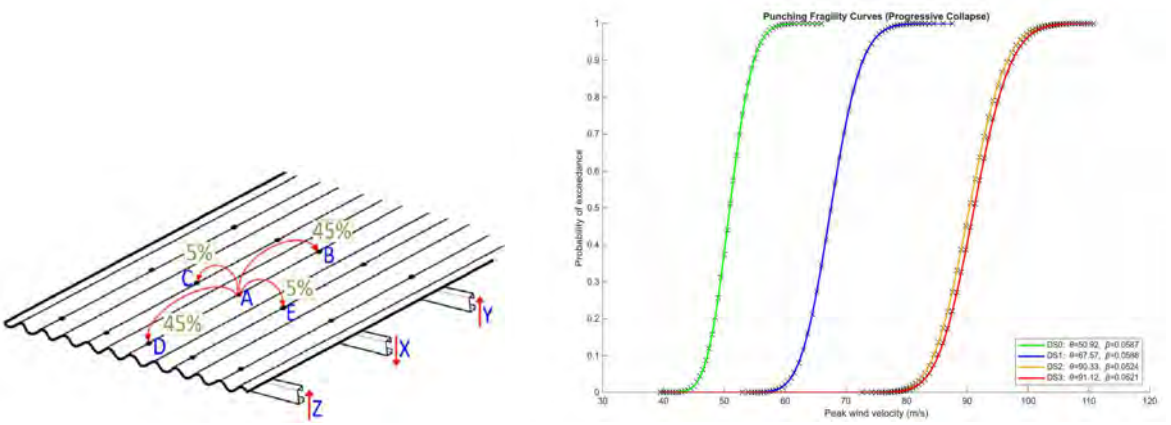


Figura 8. Risultati preliminari relativi allo sviluppo di curve di fragilità per eventi meteorologici estremi.

Relativamente alle attività previste nel WP4, sono invece stati definiti gli obiettivi e le caratteristiche operative del sistema di app web-based per la gestione intelligente delle emergenze meteorologiche. Nello specifico, il sistema in corso di sviluppo sarà in grado di ricevere in tempo reale informazioni su allerte meteo, localizzare i lavoratori all'interno e all'esterno degli edifici nel perimetro dello stabilimento aziendale, calcolare il percorso di evacuazione ottimale in relazione alla vulnerabilità strutturale di edifici, elementi non strutturali e impianti, e valutare la vulnerabilità dei lavoratori esposti in ambiente esterno. L'architettura informatica permetterà di collegare la struttura aziendale preposta alla gestione della salute e sicurezza sul luogo di lavoro con i lavoratori, fornendo in maniera automatica istruzioni personalizzate tramite dispositivi aziendali, al contempo garantendo la privacy dei lavoratori. In Figura 9 viene riportata l'architettura informatica individuata per lo sviluppo del app web-based.

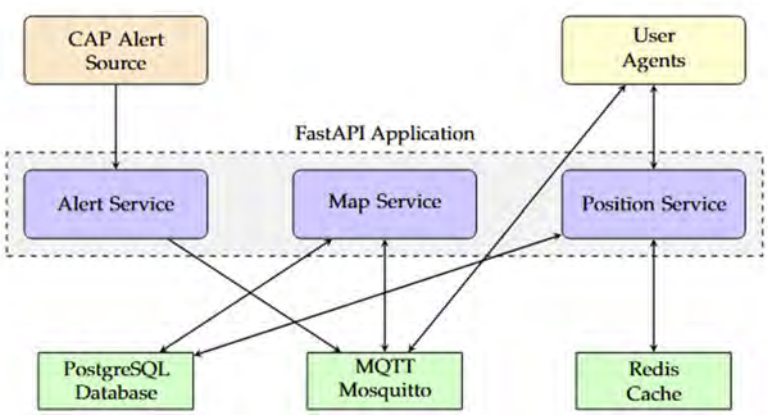


Figura 9. Architettura informatica del prototipo di app web-based per la gestione in tempo reale delle emergenze meteorogiche.

4. Conclusioni

In conclusione, l'analisi dei danneggiamenti indotti dal vento su strutture e impianti industriali evidenzia come gli eventi meteorologici estremi rappresentino una criticità sempre più rilevante, amplificata dagli effetti del cambiamento climatico. Le evidenze raccolte mostrano chiaramente la vulnerabilità di specifici elementi costruttivi, in particolare delle coperture leggere e dei componenti non strutturali, nonché il ruolo determinante della sequenzialità del danno nei meccanismi di collasso. In questo contesto, il progetto REDUCE METEO HAZARDS si configura come un'iniziativa strategica per il miglioramento della conoscenza e della gestione del rischio, grazie all'integrazione di modelli previsionali, analisi di vulnerabilità e strumenti digitali avanzati. I risultati preliminari ottenuti confermano il potenziale dell'approccio proposto, sia in termini di capacità predittiva sia di supporto alle decisioni in tempo reale. Le attività in corso e i futuri sviluppi contribuiranno a rafforzare la resilienza dei sistemi produttivi e la sicurezza dei lavoratori, promuovendo al contempo l'adozione di metodologie innovative per la prevenzione e la mitigazione dei rischi naturali in ambito industriale.

Bibliografia

[1] Trávníček P., Junga P., Kotek L., Industrial emergencies caused by extreme wind, *Process Safety Progress*, 2025. DOI: 10.1002/prs.12689.

[2] Zanini, M.A., Hofer, L., Faleschini, F., Pellegrino, C. (2017) Building damage assessment after the Riviera del Brenta tornado, northeast Italy. *Natural Hazards*, Vol. 86(3), pp. 1247-1273.

[3] ARPAV (2015) Temporali intensi di martedì 8 luglio 2015 sul Veneto, ARPAV-Agenzia Regionale per la Prevenzione e protezione Ambientale del Veneto.

[4] O'Reilly G. J., Ciucci M., Marino A., Risk-aware navigation in industrial plants at risk of NaTech accidents. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023, Volume 88,1 April 2023, 103620.

Studio dei fenomeni di incendio in ambiente confinato tramite software di simulazione

F. Manuguerra[1], M. Vitale[2], B. Basso[1]

[1]Arpa Piemonte - Struttura “Impianti industriali ed energia”
[2]Politecnico di Torino - Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT)

Sommario
ARPA Piemonte, tra le attività istituzionali di cui alla l.reg. 18/2016, è chiamata ad intervenire al verificarsi di situazioni emergenziali, effettuando campionamenti delle matrici ambientali (aria, acqua e suolo).
Il progetto, svolto in collaborazione con il Politecnico di Torino, si è focalizzato sullo studio dei fenomeni di incendio di origine antropica, e in particolare nelle attività di stoccaggio dei rifiuti, che oltre all’effetto energetico, determinano scenari di tipo tossico dovuti alla dispersione in atmosfera dei fumi di combustione; tale interesse nasce anche in riferimento all’emanazione delle Linee guida di cui al d.p.c.m. del 27/08/2021, che propongono un Metodo ad Indici per la determinazione di una “distanza di attenzione”, utile ai fini della Pianificazione di Emergenza Esterna.
Il presente lavoro si propone di confrontare i risultati di tale metodo speditivo con la stima delle aree di ricaduta dei principali inquinanti che si generano in caso di incendio, effettuate attraverso l’utilizzo di software specialistici; in particolare, sono stati simulati scenari di incendio in ambiente confinato, quali possono essere i magazzini di stoccaggio di rifiuti, considerando differenti tipologie di materiali stoccati.
I risultati delle simulazioni modellistiche mostrano che i software specialistici si rivelano utili nell’analizzare la dinamica degli incendi, e in particolare la valutazione delle conseguenze in termini di dispersione dei fumi tossici di combustione, sebbene non siano completamente risolutivi quando applicati al contesto dei rifiuti, pur offrendo risultati confrontabili con quelli del metodo ad indici, di cui al d.p.c.m. del 27/08/2021.

1. Introduzione

L’Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) Piemonte, istituita con la l.reg. n. 60 del 13/04/1995, sostituita dalla l.reg. n. 18 del 26/09/2016, “*svolge le attività di controllo, di supporto e di consulenza tecnico-scientifica e le altre funzioni ad essa attribuite dalla normativa vigente, fornendo supporto alla Regione, agli enti locali, anche in forma associata, e alle aziende sanitarie*” [1]; oltre alle attività ordinarie, l’Agenzia assume un ruolo operativo nella gestione delle emergenze ambientali di origine antropica e naturale attraverso un servizio di pronta disponibilità che consente interventi tempestivi sul territorio.

A tale scopo ARPA si è dotata di una procedura tecnica interna, codificata nel Sistema di Gestione Qualità con U.RP.T170 [2], che disciplina le attività di campionamento delle principali matrici ambientali (aria, acqua e suolo), con l'obiettivo di acquisire dati utili alla valutazione dell'impatto degli eventi e alla definizione di misure di mitigazione; in particolare, nell'ambito degli incendi, tale procedura prevede analisi mirate all'identificazione di specifici "traccianti" atmosferici, tra cui monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NOx), particolato (PM2.5 e PM10) e composti organici volatili (COV).
Nell'ambito di un progetto di collaborazione con il Politecnico di Torino sono state indagate le dinamiche degli incendi di origine antropica, con particolare attenzione agli scenari connessi alla gestione e allo stoccaggio dei rifiuti. Questi eventi, infatti, non si esauriscono nella sola componente termica, che ne determina la propagazione, ma comportano anche conseguenze tossicologiche, strettamente legate alla dispersione in atmosfera dei prodotti di combustione, la cui caratterizzazione risulta utile sia per la valutazione degli effetti sull'ambiente e sulla salute umana, sia per orientare gli interventi del personale in campo. L'interesse ad approfondire tali fenomeni si inserisce anche alla luce dell'emanazione delle Linee guida, di cui al d.p.c.m. del 27/08/2021 [3], che propongono un approccio metodologico basato su indici per la determinazione di una "distanza di attenzione", parametro utile ai fini della pianificazione dell'emergenza esterna.
Un primo contributo è stato sviluppato nel 2022 mediante un'attività di modellazione del termine sorgente di un incendio, finalizzata alla stima di parametri chiave quali la potenza termica, la temperatura media, l'altezza della fiamma e la composizione dei fumi [4].
Nel 2023 l'approfondimento è proseguito attraverso sopralluoghi presso impianti di trattamento e stoccaggio di rifiuti nelle province di Torino, Alessandria e Cuneo, con l'obiettivo di raccogliere evidenze sull'applicazione del Metodo ad indici, di cui al d.p.c.m. del 27/08/2021, e di analizzare la documentazione tecnica relativa alla classificazione del rischio incendio.
Nel 2024 lo studio è stato ulteriormente esteso, conducendo un'analisi storica degli incendi di origine antropica occorsi in Piemonte attraverso l'esame del database gestito da ARPA - nell'ambito del servizio di pronta disponibilità – in cui sono registrate segnalazioni di cittadini, operatori ed enti di soccorso riguardanti diverse tipologie di inquinamento (idrico, atmosferico e suolo), radiazioni ionizzanti, rumore, incendi, abbandono di rifiuti e spandimento di liquami. In parallelo è stato condotto un approfondimento metodologico sulle Linee guida [3], attraverso un'analisi di sensitività applicata a un caso studio in ambiente confinato, quali i magazzini di stoccaggio di rifiuti, con l'obiettivo di valutare la versatilità e i limiti del Metodo ad indici in tali contesti specifici [5].
A conclusione di tale percorso metodologico, il presente lavoro mira a confrontare i risultati ottenuti mediante il sopracitato Metodo con quelli derivanti dalla modellazione numerica delle aree di ricaduta degli inquinanti atmosferici generati in

caso di incendio, impiegando il software specialistico PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool). Le simulazioni hanno riguardato scenari di incendio in ambienti confinati di differenti tipologie di materiali combustibili, al fine di esaminare come la natura del combustibile influenzi le dinamiche di combustione. Tale confronto ha avuto l'obiettivo di valutare la consistenza tra i due approcci (software PHAST e Metodo ad Indici) rispetto alla stima della ricaduta degli inquinanti, indagando l'affidabilità di "strumenti" operativi semplificati per una valutazione preliminare delle conseguenze in termini di dispersione dei fumi tossici, con particolare riferimento al loro potenziale impiego a supporto della pianificazione dell'emergenza esterna.

2. Strumenti e metodi

Il presente capitolo descrive in modo sintetico gli strumenti e le metodologie adottate per l'analisi degli incendi in ambienti confinati, con particolare riferimento agli impianti di gestione rifiuti. Lo studio si è basato sull'impiego del software PHAST, per la modellazione degli scenari d'incendio e la stima delle ricadute degli inquinanti, integrato con il Metodo ad Indici, di cui al d.p.c.m. del 27/08/2021, utilizzato per la redazione dei Piani di Emergenza Esterna in tali contesti.

Il software PHAST [6] è uno strumento avanzato per la modellazione e valutazione dei rischi associati agli incidenti in ambito industriale, in grado di simulare fenomeni complessi quali la dispersione di sostanze pericolose, incendi ed esplosioni, considerando variabili ambientali come condizioni meteorologiche e caratteristiche del sito. Nel contesto del presente studio è stato utilizzato il modulo "Warehouse" del software, specificamente progettato per la simulazione di incendi in ambienti confinati, come magazzini e depositi. Il modulo richiede l'inserimento di parametri geometrici della struttura (dimensioni, aperture, sistemi antincendio, ecc…) e delle proprietà dei materiali stoccati, inclusa la composizione chimica (formula bruta), la quantità e la percentuale di massa coinvolta nella combustione. Il software consente inoltre di integrare valori di tossicità, come l'IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health), cioè la concentrazione massima di una sostanza tossica alla quale un individuo sano può essere esposto per un periodo di 30 minuti senza subire danni irreversibili alla salute. Una volta inseriti i sopra citati parametri, il software genera output dettagliati, tra cui l'andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio e la variazione dell'altezza della nube, utili per la valutazione quantitativa del rischio.

Per quanto riguarda i criteri di applicazione e la struttura del Metodo ad Indici, che consente di effettuare una valutazione semi-quantitativa del rischio di incendio attraverso l'assegnazione di punteggi ai fattori di rischio e alle misure di prevenzione e protezione presenti nell'impianto, essi sono dettagliatamente descritti in [5], a cui si rimanda per gli aspetti metodologici e normativi di riferimento.

Ai fini di una corretta interpretazione dei risultati, dettagliati nel capitolo 4 del presente articolo, si riporta di seguito la tabella di correlazione contenuta in [3], che mette in relazione il valore dell'indice di rischio (IR), basato principalmente sul carico

di incendio specifico (q_f) del combustibile, con il corrispondente livello qualitativo di rischio e la relativa "distanza di attenzione", definita come la distanza massima dal perimetro dell'impianto entro la quale possono manifestarsi gli effetti di un incendio.

Indice di Rischio (IR)	Livello di rischio	Distanza di attenzione [m]
0 - 400	Basso	100
401 - 700	Medio – Basso	200
701 - 1100	Medio	300
1101 - 1500	Medio - Alto	400
> 1500	Alto	500

Tabella 1. Correlazione tra Indice e livello di rischio e distanza di attenzione (d.p.c.m. 27/08/2021).

3. Casi studio

Lo studio ha considerato un magazzino di stoccaggio con superficie di 108 m², altezza di 7 m e capacità di 200 pallet. Sono stati analizzati due scenari: uno reale, caratterizzato dalla presenza di misure di prevenzione e protezione come impianti sprinkler, e uno semplificato, privo di tali misure. L'obiettivo è stato valutare le differenze nella dinamica dell'incendio e nella dispersione degli inquinanti in funzione del materiale immagazzinato, mantenendo costanti le dimensioni e la capacità del magazzino. Si precisa che, per consentire l'applicazione e il confronto dei risultati con il Metodo ad Indici, i materiali sono stati considerati come esausti e quindi assimilati a rifiuti solidi, così da rappresentare in modo più realistico la configurazione effettiva dello stoccaggio.

Sono stati selezionati due materiali con caratteristiche combustive differenti: pneumatici e cartone. Nelle simulazioni condotte con il modulo "Warehouse" del software PHAST sono state utilizzate le formule empiriche rappresentative delle strutture chimiche di riferimento: $C_9H_{12}N_2O_3$ [7], indicativa di un'unità ripetitiva del poliuretano assimilato alla gomma vulcanizzata, e $C_6H_{10}O_5$ [8], rappresentativa della cellulosa, componente principale del cartone.

Considerato che, dai dati di letteratura relativi alla combustione di pneumatici e cartone, si sviluppano composti tossici, rispettivamente acido cianidrico (HCN) e benzene, nelle impostazioni del software sono stati adottati inizialmente come parametri di riferimento i rispettivi valori di IDLH, indicati dal NIOSH, pari rispettivamente a 50 ppm e 500 ppm; successivamente, al fine di rendere confrontabili i risultati delle simulazioni, a prescindere dalle differenti caratteristiche di tossicità acuta intrinseca delle sostanze considerate, in entrambi i casi è stata adottata una soglia di concentrazione di IDLH uniforme pari a 50 ppm.

Nel software PHAST, le condizioni di simulazione sono state impostate secondo i valori di default, con durata dell'incendio pari a 1800 s, velocità del vento di 1,5 m/s e due classi di *stabilità atmosferica*: F (molto stabile, con dispersione lenta) e D (neutra, con maggiore turbolenza) [9].

Sono stati inoltre assunti nel Metodo ad Indici i poteri calorifici inferiori pari a 25 MJ/kg [10] per gli pneumatici e 16,1 MJ/kg [8] per il cartone.

4. Risultati

Nel seguente capitolo sono illustrati gli esiti delle simulazioni condotte, finalizzate a valutare l'impatto degli incendi in ambienti confinati in funzione della natura del materiale combustibile (pneumatici e cartone) e delle caratteristiche impiantistiche del magazzino (presenza o assenza di sistemi antincendio).
Si precisa che, sebbene le simulazioni e le valutazioni effettuate rispettivamente con il modulo "Warehouse" del software e con il Metodo ad Indici siano state condotte considerando la presenza e l'assenza di sistemi antincendio (caso reale e semplificato), le simulazioni ottenute con il software specialistico presentano valori sovrapponibili per entrambi gli scenari, sia in termini di concentrazioni che di dispersione. Dal punto di vista teorico, la presenza di misure di prevenzione e protezione, come nel caso reale, dovrebbero influire sulla dinamica dell'incendio e, conseguentemente, sulla generazione e dispersione degli inquinanti; tuttavia, nei casi in esame, tale influenza non è stata riscontrata, ed è verosimilmente ascrivile ad una gestione delle impostazioni del modulo "Warehouse" del software meritevoli di ulteriori approfondimenti.

4.1 Incendio di magazzino contenente pneumatici

Nel caso studio relativo all'incendio di un magazzino destinato allo stoccaggio di pneumatici, è stata considerata una massa complessiva di 72000 kg, determinata sulla base di 200 pallet contenenti ciascuno 36 pneumatici, con un peso medio di circa 10 kg per unità.

Simulazione mediante PHAST

Nel Grafico 1a è riportata la massima concentrazione della nube tossica all'esterno del magazzino (in scala logaritmica), in funzione della distanza sottovento a 30 minuti dall'innesco, per il caso semplificato. I profili risultano simili nelle due condizioni atmosferiche raggiungendo all'incirca lo stesso valore di picco, circa 700 ppm, sia in classe F (bassa turbolenza) che in classe D (maggiore turbolenza); tuttavia, in quest'ultima la curva decresce più rapidamente, indicando una dispersione più efficace e confermando il ruolo della *stabilità atmosferica* nella distribuzione delle sostanze tossiche.
In Figura 1b è rappresentata l'altezza della nube alla concentrazione di 50 ppm, evidenziando l'influenza della *stabilità atmosferica* sulla distribuzione verticale e orizzontale. In entrambe le condizioni la nube raggiunge circa 13 m di altezza, ma in classe F si estende fino a circa 420 m oltre il capannone, mentre in classe D si limita a

circa 140 m, a causa della maggiore turbolenza che favorisce una dispersione più rapida.
Analogamente è stata ripetuta la simulazione considerando le stesse due classi di *stabilità atmosferica* nel caso reale osservando che il profilo di concentrazione al di fuori del magazzino non subisce variazioni rispetto al caso semplificato.

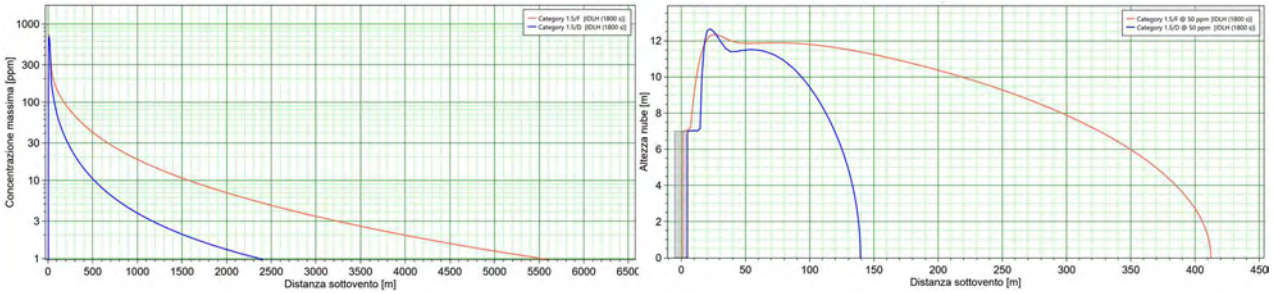


Figura 1. a) Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite ai primi 30 minuti di incendio) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte).
b) Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 50 ppm) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte). In nero è rappresentato il profilo del magazzino.

Applicazione del Metodo ad Indici (d.p.c.m. 27/08/2021)
Il Metodo ad indici è stato applicato al caso degli pneumatici nell'ipotesi di assumerli come materiale esausto; tali rifiuti solidi sono costituiti da una miscela di gomma naturale e sintetica, nero di carbonio, acciaio, zolfo, oli aromatici e diversi additivi chimici, al fine di verificarne la coerenza con i risultati ottenuti dal software.
Per il caso in esame sono stati analizzati due scenari applicando le formule descritte in [5] e nel seguito sono riportati i valori dei parametri considerati nei due casi studio (reale e semplificato):

Parametri	Caso reale	Caso semplificato
q_f [MJ/m2]	12972	12972
P_r	1500	1500
P_t	-	-
FC = Pre + Proa + Prop + Sec	475 = 175+200+30+70	300 = 100+100+30+70
FD	20	20
Indice di Rischio (IR)	**1045**	**1220**
Livello di rischio	**Medio**	**Medio – Alto**
Distanza di attenzione	**300 m**	**400 m**

Tabella 2. Dati input e output Metodo ad Indici (d.p.c.m. 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente pneumatici.

4.2 Incendio di magazzino contenente cartone
Per il caso studio relativo all'incendio di un magazzino destinato allo stoccaggio di materiali in cartone, è stata mantenuta la stessa superficie del magazzino di

pneumatici, variando la configurazione di stoccaggio: su un totale di 200 pallet, sono stati inizialmente considerati ciascuno contenente 250 cartoni standard da 1 kg ciascuno. Nel caso specifico, assumendo i cartoni come rifiuti accatastati in modo disordinato, è stato applicato un fattore di riduzione pari a un terzo della massa teorica, ottenendo una massa complessiva pari a circa 16667 kg.

Simulazione mediante PHAST

La Figura 2a riporta l'evoluzione della concentrazione massima della nube tossica all'esterno del magazzino (in scala logaritmica) lungo la direttrice sottovento, a 30 minuti dall'innesco, nel caso semplificato. Anche in questo caso, nelle due classi di stabilità atmosferica (classe F e D) viene raggiunto lo stesso valore di picco, circa 800 ppm, in corrispondenza dell'uscita del capannone; si osserva tuttavia che nella classe D la curva decresce più rapidamente, circa della metà rispetto all'altra classe, indicando una dispersione più veloce della nube tossica.
La Figura 2b descrive l'altezza della nube alla soglia di 50 ppm: in entrambe le classi la nube mantiene un'altezza inferiore ai 13 m, ma mentre in classe F, caratterizzata da una turbolenza ridotta, la dispersione avviene con maggiore difficoltà, determinando un'estensione orizzontale più ampia della nube fino a circa 425 m oltre il capannone, in classe D, dove la turbolenza risulta più intensa, la nube si disperde più rapidamente, con una riduzione della distanza orizzontale fino a circa 140 m dal capannone.

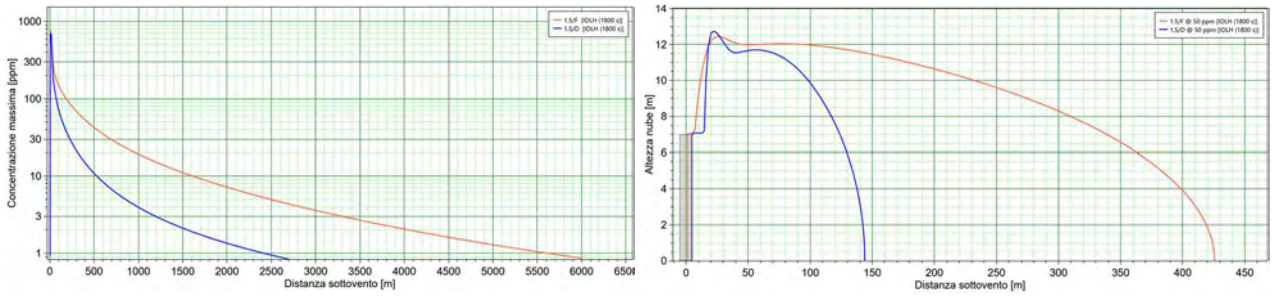


Figura 2: a) Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite ai primi 30 minuti dell'incendio) – caso reale e semplificato materiali in cartone (le curve sono sovrapposte).
b) Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 50 ppm) – caso reale e semplificato materiali in cartone (le curve sono sovrapposte). In nero è rappresentato il profilo del magazzino.

Applicazione del Metodo ad Indici (d.p.c.m. 27/08/2021)

Anche in questo scenario, il Metodo a Indici è stato applicato al caso studio relativo ai materiali in cartone nell'ipotesi di assumerli come materiali esausti.
Nel seguito sono riportati i valori dei parametri considerati nei due casi studio (reale e semplificato):

Parametri	Caso reale	Caso semplificato
q_f [MJ/m2]	2485	2485
Pr	1500	1500
Pt	-	-
FC = Pre + Proa + Prop + Sec	475 = 175+200+30+70	300 = 100+100+30+70
FD	20	20
Indice di Rischio (IR)	**1045**	**1220**
Livello di rischio	**Medio**	**Medio – Alto**
Distanza di attenzione	**300 m**	**400 m**

Tabella 3. Dati input e output Metodo ad Indici (d.p.c.m. 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente materiali in cartone.

5. Conclusioni

L'obiettivo del presente studio è stato confrontare gli esiti del Metodo a indici, di cui al d.p.c.m. del 27/08/2021 per la classificazione del rischio incendio negli impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti, applicato a due differenti tipologie di materiali, con i risultati ottenuti dalle simulazioni di incendio degli stessi condotte mediante il modulo "Warehouse" del software PHAST. Il confronto è stato sviluppato in quanto le Linee guida al d.p.c.m., oltre a proporre il Metodo ad Indici, ammettono in alternativa una valutazione di tipo ingegneristico, realizzabile attraverso l'impiego di modelli numerici di simulazione.

Per l'analisi dei fenomeni di incendio in ambiente confinato è stato selezionato, come caso studio, un magazzino di stoccaggio nel quale sono state mantenute invariate le caratteristiche geometriche e strutturali (superficie, altezza e aperture) nonché la capacità di stoccaggio pari a 200 pallet, variando esclusivamente la tipologia di materiali presenti al suo interno (pneumatici e cartone) e le condizioni impiantistiche (presenza o assenza di sistemi antincendio, identificati rispettivamente come caso reale e semplificato).

Nel caso delle simulazioni condotte con il modulo "Warehouse" del citato software, per ciascun materiale sono stati individuati i prodotti di combustione più tossici (acido cianidrico per gli pneumatici e benzene per il cartone), ai quali è stata associata inizialmente una concentrazione di riferimento pari al relativo valore di IDLH e successivamente, al fine di consentire un confronto tra i risultati delle simulazioni, è stata adottata una soglia di IDLH uniforme pari a 50 ppm, modellando la dispersione in funzione della distanza dal magazzino. Tra gli esiti delle simulazioni, quelli più rappresentativi, ai fini del presente studio, sono quelli espressi in termini di massima concentrazione dell'inquinante in funzione della distanza dalla sorgente di emissione (assumendo come tempo di riferimento i primi 30 minuti dell'incendio).

È stato infine adottato un metodo speditivo, di cui al d.p.c.m. del 27/08/2021, per la classificazione del rischio incendio negli impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti, finalizzato alla determinazione della "distanza di attenzione".

È stato quindi effettuato un confronto tra i risultati ottenuti con il metodo speditivo, applicato ai due materiali in esame (pneumatici e cartone), e quelli derivanti dalle simulazioni di un incendio degli stessi effettuate con il modulo "Warehouse" del software PHAST. Per entrambe le metodologie si sono considerate le distanze relative al solo caso semplificato, ritenuto rappresentativo dello scenario più gravoso e meno conservativo, considerando per il software PHAST la sola classe di stabilità atmosferica F, caratterizzata da una bassa turbolenza e conseguente dispersione più lenta.
I risultati, pur evidenziando una sostanziale coerenza tra i due approcci per entrambi gli scenari analizzati, relativi allo stoccaggio di pneumatici e di materiali in cartone, hanno messo in luce alcune specifiche criticità, che vengono di seguito elencate.
In particolare, il modello implementato nel modulo "Warehouse" integra parametri fisici e chimici del materiale coinvolto, quali il potere calorifico inferiore, che influisce direttamente sulla dinamica di propagazione dell'incendio e sui meccanismi di dispersione degli inquinanti.
Al contrario, il Metodo ad Indici si basa principalmente sul carico di incendio (qf) e su criteri cautelativi uniformi. Infatti, il valore dell'indice di rischio (IR) dato dal suddetto Metodo, che determina la "distanza di attenzione", varia sensibilmente in funzione del carico di incendio e rimane pressoché invariato rispetto alla configurazione del magazzino (aperto o chiuso) o alla tipologia di sistemi di estinzione automatici (a base d'acqua o a base schiuma), differenze che potrebbero influenzare la propagazione dell'incendio. Ne consegue che non vengono considerate variabili dinamiche quali la tossicità specifica dei prodotti di combustione, le condizioni meteorologiche, la geometria del rilascio, la struttura del sito o la tipologia dei sistemi estinguenti, adottando invece margini di sicurezza uniformi per garantire una valutazione cautelativa.
Un'ulteriore criticità emersa dall'applicazione del Metodo ad Indici riguarda la "distanza di attenzione", calcolata a partire dal perimetro dello stabilimento, che non coincide con quella determinata dal software specialistico, il quale misura la distanza di pericolo dal punto di origine dell'incendio, ossia dal magazzino situato all'interno dello stabilimento, che non necessariamente corrisponde al confine perimetrale.
In conclusione, il Metodo ad Indici si conferma uno strumento speditivo, di semplice e immediata applicazione, in grado di fornire un output di facile comprensione, risultando pertanto adeguato a una prima stima preliminare dell'area di pianificazione; il modulo "Warehouse", invece, risulta maggiormente indicato per analisi di livello superiore, finalizzate alla valutazione approfondita dei fenomeni di dispersione degli inquinanti e alla determinazione delle aree potenzialmente interessate dall'evento incidentale.
In tale ottica, l'analisi condotta si configura come un primo step all'interno di una prospettiva più ampia di approfondimento dei fenomeni di incendio applicati agli impianti di gestione dei rifiuti, che potrà essere estesa in futuro a scenari di maggiore complessità, quali, ad esempio, quelli relativi alle discariche.

Bibliografia e sitografia

[1] Presidente della Giunta Regionale, (2016) Legge 26 settembre 2016, n. 18 “Nuova disciplina dell’Agenzia regionale per la protezione ambientale del Piemonte (ARPA)”.

[2] ARPA Piemonte, (2023). “Gestione delle emergenze ambientali (U.RP.T170)”. Rev. 4.

[3] Presidente del Consiglio dei Ministri (2021) Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 27 agosto 2021 “Approvazione delle linee guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna e per la relativa informazione della popolazione per gli impianti di stoccaggio e trattamento dei rifiuti”. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 204, 30 agosto 2021.

[4] Puliga, R. (2022). “Studio della dispersione dei fumi tossici da incendi in impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti”. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino.

[5] Manuguerra, F., Vitale, M., Carpegna, C. e Basso, B. (2025). “Fire in waste treatment plants in Piedmont Region: case studies and comparison”. ICSI 2025 International Conference on Safety & Innovation” (pp. 670-681), Roma, 11-13/03/2025.

[6] DNV (2025) “PHAST and PHAST LITE: Tutorial Manual”. URL: www.dnvgl.com/software (accesso: 11/2025).

[7] Gustin D., Colbassi M., Lepre E., Anastasio A., Contus D. e Pitacco D. (2017). “Chimica delle Macromolecole Introduzione ai polimeri Breve introduzione alla caratterizzazione, polimerizzazione e alle proprietà dei polimeri”. Moodle2 units. URL: https://moodle2.units.it/pluginfile.php/112553/mod_resource/content/1/l%20relaz%20blended.pdf (accesso: 11/2025).

[8] Quintiere, James G. (1998). “Principles of fire behavior”. CRC Press.

[9] Kahl, J. D. W., and Chapman, H. L. (2018). Atmospheric stability characterization using the Pasquill method: A critical evaluation. Atmospheric Environment, 187, 196–209. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.058

[10] Certifico Srl (2021). “Potere calorifico materiali (Hi) [MJ/kg]”. URL: https://www.certifico.com/id/14854 (accesso: 11/2025).

Intossicazione da monossido di carbonio causata da un impianto di riscaldamento in un'attività produttiva

R. Rolle[1], W. Laiolo[1]

[1] Struttura "Impianti industriali ed energia", Arpa Piemonte Torino

Sommario

Arpa Piemonte esercita attività di controllo, di supporto e di consulenza tecnico scientifica e altre attività utili alla Regione, alle Province e ai Comuni, nonché alle Aziende Sanitarie del Piemonte per lo svolgimento dei compiti loro attribuiti dalla legge nel campo della prevenzione e tutela ambientale.

Su richiesta dell'ASL, secondo quanto previsto dalla d.g.r. del 3 ottobre 2016, n. 7-4000, l'Agenzia ha proceduto ad effettuare, nell'inverno del 2024, un sopralluogo presso un'azienda piemontese in cui si è verificata un'*intossicazione* da *monossido di carbonio* (CO) derivante dall'impianto di *riscaldamento* e che ha coinvolto diversi addetti al lavoro.

Al fine di determinare le cause dell'incidente, sono state effettuate analisi di combustione dei fumi del generatore di calore, e misurazioni delle concentrazioni di *monossido di carbonio* (CO) presenti negli ambienti di lavoro, utilizzando strumenti portatili con rivelatori a celle elettrochimiche.

Durante il funzionamento del generatore di calore si sono osservati una cattiva combustione nel generatore con elevata concentrazione di CO, ed un progressivo incremento del CO rilevato nel locale tecnico e in cascata negli ambienti di lavoro.

La causa dell'*intossicazione* del *monossido di carbonio* nei locali produttivi dell'azienda è stata associata a problematiche strutturali e di funzionamento del sistema di generazione di calore, concatenate tra loro: in particolare sono state riscontrate delle criticità nella combustione incompleta del generatore di calore alimentato a gas naturale, nel sistema di evacuazione dei fumi e nel sistema di canalizzazione dell'aria che riscalda gli ambienti produttivi.

1. Introduzione

Gli impianti termici utilizzati per il comfort abitativo, sia nell'ambito delle civili abitazioni e sia nei contesti di attività lavorative (imprese manufatturiere, servizi, terziario, ecc…) sono disciplinati da una normativa a livello nazionale sull'efficienza energetica che fa capo al d.lgs. 192/2005 e decreti successivi.

A livello regionale, le singole Regioni hanno la facoltà di legiferare richiedendo procedure e limiti più restrittivi rispetto a quanto prevede la normativa nazionale.

In particolare, Regione Piemonte ha imposto valori di rendimento di combustione dei generatori di calore più performanti e limiti di emissione ossidi di azoto (NOx) più restrittivi.
Fra le attività svolte dall'Agenzia nell'ambito dei controlli sugli impianti termici vi rientrano le ispezioni nelle centrali termiche programmate in base ad un piano regionale e le attività di supporto tecnico ad Enti esterni come, ad esempio, alle ASL in caso di incidenti.
Il caso analizzato nel presente articolo illustra le problematiche che si devono affrontare per garantire condizioni di sicurezza adeguate all'interno di una centrale termica in presenza di impianti diversi collocati nel medesimo locale. Esso mostra inoltre come la mancanza di un'approfondita analisi dei rischi possa favorire il verificarsi di eventi estremamente pericolosi, con conseguenze potenzialmente letali.

1.1. Legislazione e normativa vigente

L'installazione, la conduzione e la manutenzione degli impianti termici sono regolati da un insieme di leggi, decreti e norme tecniche finalizzati a garantire sicurezza, efficienza energetica e tutela ambientale. Queste disposizioni disciplinano le diverse fasi del ciclo di vita degli impianti, definendo requisiti tecnici, obblighi di manutenzione e modalità di controllo da parte degli enti competenti. Di seguito sono riportati i principali riferimenti normativi applicabili alla materia.

- Decreto ministeriale 22/01/2008 n. 37 "Regolamento concernente l'attuazione dell'articolo 11-quaterdecies, comma 13, lettera a) della legge n. 248 del 2 dicembre 2005, recante riordino delle disposizioni in materia di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici" (ha sostituito la legge 5/03/1990 n. 46);
- Decreto legislativo 19/08/2005 n. 192 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia";
- Decreto del Presidente della Repubblica 16 aprile 2013 n. 74 "Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del d.lgs. 19 agosto 2005, n. 192";
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale;
- Deliberazione della Giunta Regionale 21 maggio 2021, n. 10-3262: Legge regionale 11 marzo 2015, n. 3 e s.m.i., articoli 39, comma 1, lettere c), g) e l) e 40. Approvazione delle nuove disposizioni in materia di catasto, accertamenti e ispezioni degli impianti termici e obblighi di comunicazione in capo ai distributori di combustibile per gli impianti termici. Revoca della deliberazione della Giunta regionale 28 settembre 2018, n. 32- 7605;
- Decreto ministeriale 1/12/1975 "Norme di sicurezza per apparecchi contenenti liquidi caldi sotto pressione";

- Deliberazione della Giunta Regionale 4 agosto 2009, n. 46-11968 Aggiornamento del Piano regionale per il risanamento e la tutela della qualità dell'aria - Stralcio di piano per il riscaldamento ambientale e il condizionamento e disposizioni attuative in materia di rendimento energetico nell'edilizia ai sensi dell'articolo 21, comma 1, lettere a) b) e q) della legge regionale 28 maggio 2007, n. 13 "Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia";
- Legge 6 dicembre 1971, n. 1083: Norme per la sicurezza dell'impiego del gas combustibile;
- Decreto ministeriale 08/11/2019 "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la realizzazione e l'esercizio degli impianti per la produzione di calore alimentati da combustibili gassosi;
- Decreto del Presidente della Repubblica "Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4-quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122";
- UNI 10389-1:2019 "Misurazioni in campo - Generatori di calore - Parte 1: Apparecchi alimentati a combustibile liquido e/o gassoso";

1.2. La pericolosità del monossido di carbonio

Nelle righe seguenti è sinteticamente descritta la formazione del monossido di carbonio (nel seguito indicato nella sua formula bruta come CO) nella combustione che avviene negli impianti termici.
In generale, in un impianto termico a gas la combustione è ottimale quando l'aria ricca di ossigeno O_2 si combina completamente con il carbonio C presente nel combustibile formando anidride carbonica CO_2.
A livello chimico si ha la seguente reazione:

$$C + O_2 \Rightarrow CO_2$$

Viceversa, quando la combustione avviene in difetto d'aria – e quindi di ossigeno – vi è produzione di monossido di carbonio CO e la reazione chimica di combustione diventa la seguente:

$$2C + O_2 \Rightarrow 2CO$$

Per le sue caratteristiche chimico-fisiche il monossido di carbonio rappresenta un inquinante molto insidioso, soprattutto nei luoghi confinati dove la sua concentrazione può, nel tempo, arrivare a livelli anche letali.
Essendo il CO incolore, insapore, inodore e non irritante, può causare morti accidentali senza che le vittime si rendano conto di quel che sta loro succedendo [1].

Una volta respirato, il CO si lega all'emoglobina con un'affinità che è 220 volte superiore a quella dell'ossigeno, formando un composto inattivo fisiologicamente che è chiamato carbossiemoglobina. Questa sostanza, al contrario dell'emoglobina, non è in grado di garantire l'ossigenazione ai tessuti, in particolare al cervello ed al cuore. La morte sopravviene pertanto per asfissia. Tali situazioni sono purtroppo frequenti, e innumerevoli sono i casi di avvelenamento e gli incidenti anche mortali imputabili alle caldaie, stufe e agli scaldacqua difettosi o non controllati [2,3].

Il monossido di carbonio forma, inoltre, con l'aria una miscela infiammabile quando si trova in concentrazione percentuale compresa tra il 12,5 % ed il 74,2 %. [4]
Si riporta una tabella riepilogativa della relazione tra concentrazioni di CO e le conseguenze sulle persone [5].

Concentrazione CO		*Tempo di inalazione e conseguenze*
100 ppm	0,02 %	Leggera cefalea 2 o 3 ore
400 ppm	0,04 %	Cefalea frontale in 1 o 2 ore tendente ad aumentare nelle ore successive
800 ppm	0,08 %	Vertigini, nausea e convulsioni in 45 minuti, insensibilità in 2 ore
1600 ppm	0,16 %	Cefalea, vertigini e nausea in 20 minuti. Morte entro 2 ore
3200 ppm	0,32 %	Cefalea, vertigini e nausea entro 5 - 10 minuti. Morte entro 30 minuti
6400 ppm	0,64 %	Cefalea, vertigini in 1 - 2 minuti. Morte entro 10 - 15 minuti
12800 ppm	1,28 %	Morte entro 1 - 3 minuti

Tabella 1 Conseguenze per la salute dell'uomo in funzione del tempo di esposizione a diverse concentrazioni di monossido di carbonio.

2. Evento incidentale dell'inverno 2024

L'azienda è riscaldata tramite impianto ad aria calda; i due generatori di calore e l'unità di trattamento dell'aria (UTA) per lo scambio termico sono collocati nel medesimo locale, ovvero in centrale termica.
Durante il sopralluogo effettuato dopo l'incidente, congiuntamente con il servizio S.Pre.S.a.L e i VVF, presso i locali dell'azienda, nel locale centrale termica si è accertato uno scollegamento nel canale da fumo in un tratto orizzontale posizionato a ridosso dell'intradosso della soletta, in un particolare punto ovvero tra la sezione in materiale plastico e la sezione in acciaio. Tale criticità era già stata notata dal personale dei Vigili del Fuoco e del S.Pre.S.a.L durante l'intervento in urgenza, avvenuto il giorno dell'incidente.

Questo scollegamento ha fatto sì che i prodotti della combustione rifluissero all'interno del locale centrale termica invece di essere espulsi - tramite il camino - verso l'esterno oltre il colmo del tetto.
Sebbene l'unità di trattamento aria presente in centrale termica prelevi l'aria da riscaldare dal reparto produttivo tramite ricircolo, si è supposto che, durante l'evento incidentale, questa – non essendo ermetica - possa avere parzialmente aspirato la miscela di aria ricca di monossido di carbonio presente in centrale ed emessa dai due generatori di calore convogliandola nei reparti produttivi dove erano presenti i lavoratori.
Infatti, durante i test di accensione dei generatori eseguiti in fase di sopralluogo gli strumenti a celle elettrochimiche rilevatori di monossido di carbonio in aria ambiente (utilizzati dai tecnici Arpa e dai Vigili del Fuoco) ne hanno immediatamente segnalato la presenza, sia in centrale termica che all'interno del reparto produttivo.
Si è tentato di eseguire anche un'analisi di combustione del generatore, ma - non appena è stata inserita la sonda dello strumento nel foro di prelievo dei prodotti della combustione - è stato osservato un repentino incremento di monossido di carbonio che ha portato lo strumento alla soglia di blocco (funzione automatica per la sua protezione), ovvero pari ad una concentrazione di oltre 40.000 ppm.
Se si considera che la norma UNI 10389-1:2019 indica già per valori di concentrazione superiori a 300 ppm una condizione di combustione incompleta, il valore misurato in campo ha confermato la combustione incompleta dell'impianto con eccessiva formazione di monossido di carbonio.
Inoltre, si suppone che, durante l'evento occorso, con il trascorrere del tempo la quantità di monossido di carbonio all'interno del locale caldaia sia aumentata gradualmente causando ulteriore sofferenza nei generatori di calore, i quali, aspirando aria comburente proprio dall'interno della centrale termica, hanno ridotto progressivamente l'efficienza della reazione di combustione e aumentato ulteriormente il contenuto di monossido di carbonio nei prodotti di combustione, creando un circolo vizioso all'interno del locale.
Si è osservato, infine, che una parte di monossido di carbonio potrebbe essere passata dal locale caldaia verso il reparto produttivo anche attraverso alcune aperture non adeguatamente compartimentate in corrispondenza delle tubazioni.

2.1. Caratteristiche dell'impianto termico

L'impianto che provvede al riscaldamento invernale dei reparti produttivi dell'azienda è stato installato due anni prima del verificarsi dell'incidente. Esso è composto da due generatori di calore murali a condensazione con fluido termovettore acqua ed avente temperatura del fluido T< 100°C e con sistema di espansione a vaso chiuso.
Ciascuno dei due generatori ha una potenza al focolare pari a 150 kW e utilizzano come combustibile il gas naturale.
I prodotti della combustione vengono inviati al camino tramite un canale da fumo, al quale sono raccordati entrambi gli scarichi dei due generatori.

All'interno della centrale termica in cui sono installati tali apparecchi a gas, è inoltre presente un'UTA dotata di un ventilatore avente una portata di mandata e ripresa pari a 3.200 l/s. Lo scambio termico nell'UTA è del tipo acqua-aria. L'aria riscaldata viene poi immessa nei reparti produttivi tramite delle condotte aerotermiche che si snodano a vista lungo la parte alta dello stabilimento.

2.2. Verifica documentale

Dichiarazione di conformità d.m. 22/01/2008 n. 37 e Legge 5/03/1990 n. 46

L'impianto termico non è risultato corredato della Dichiarazione di conformità alla regola dell'arte secondo d.m. 37/08 e Legge 46/90 relativamente all'installazione dei generatori di calore e dell'unità di trattamento aria (completa quindi di progetto, relazione materiali utilizzati, schema impianto e certificato di riconoscimento dei requisiti tecnico professionali).

Normativa prevenzione incendi per impianti di produzione del calore

La potenza totale della centrale è superiore a 116 kW e quindi soggetta alla normativa di prevenzione incendi d.p.r. 151/2011. La centrale termica è situata in apposito locale fuori terra inserito nella volumetria del fabbricato servito, con accesso dall'esterno.
Durante il sopralluogo si è riscontrata l'irregolarità dell'apertura di aereazione che risulta essere circa 0,28 m^2 – data dalla somma delle superfici dell'apertura superiore e dell'area libera delle due aperture inferiori – ossia inferiore a quanto richiesto dal d.m. 08/11/2019 all'allegato 1 punto 3.3.4 ovvero maggiore o uguale a 0,3 m^2. Assieme al personale dei Vigili del Fuoco si è anche verificata la mancanza di compartimentazione con i reparti confinanti nei punti di passaggio delle tubazioni e del camino.

Sicurezza circuito idraulico secondo d.m. 1/12/1975

Al momento del sopralluogo non è stato fornito il libretto matricolare ISPESL/INAIL, né la denuncia dell'impianto termico inviata all'ISPESL/INAIL, così come previsto dall'art. 18 del d.m. 1/12/1975, e dalla Specifica Tecnica "Raccolta R" ed in particolare:
- modello "RD" di denuncia;
- modello "RR" contenente la relazione tecnica;
- lo schema di progetto;

L'impianto è corredato sul collettore del fluido termovettore a valle dei due generatori dei seguenti dispositivi di sicurezza:
N. 1 valvola di sicurezza tarata in data 23/09/2020 (certificato presente sulla valvola)
N. 1 valvola di intercettazione combustibile non corredata del certificato di taratura.

Manutenzione impianto termico secondo d.lgs. 192/2005 e d.p.r. 74/2013

È presente il libretto di impianto che è stato caricato sul catasto informatico CIT della Regione Piemonte in data 19/02/2024.

Sul portale si trova inserito un unico intervento di manutenzione datato il 04/10/2023. Non è presente alcun rapporto di efficienza energetica REE come previsto dal d.lgs. 192/2005. In sintesi, non sono state effettuate tutte le operazioni di controllo e manutenzione previste dalla normativa vigente.

3. Conclusioni

Nel presente articolo è stato affrontato un evento incidentale che ha riguardato l'intossicazione da monossido di carbonio in ambito industriale. L'evento qui discusso ha avuto origine nel locale centrale termica, ove sono presenti i generatori di calore e l'UTA, ed è riconducibile a due diverse cause: da un lato la combustione incompleta del gas metano con produzione di monossido di carbonio derivante dai generatori di calore e dall'altro la presenza di un guasto strutturale sul canale da fumo per l'evacuazione dei prodotti di combustione. Il gas tossico fuoriuscito dal canale da fumo è passato attraverso l'UTA presente nel locale. La compresenza nello stesso locale sia dei generatori di calore sia dell'unità di trattamento aria ha consentito la diffusione del gas tossico nei reparti produttivi e la conseguente intossicazione dei lavoratori. Sotto il profilo amministrativo, l'impianto ha mostrato alcune carenze per quanto riguarda la documentazione relativa alla corretta installazione, tuttavia non si rileva una connessione diretta tra l'evento e la scorretta gestione degli aspetti documentali. Da un punto di vista tecnico le aperture di areazione sono di poco inferiori rispetto a quanto richiesto dalla normativa tecnica, e gli aspetti legati al circuito idraulico non sono correlabili all'evento incidentale.

Si è rilevata una concentrazione di monossido di carbonio nei fumi in uscita dal generatore eccessivamente elevata, tanto da non permettere la misura strumentale di tale parametro, che potrebbe essere riferibile ad una non sufficientemente adeguata manutenzione dell'impianto.

D'altro canto, l'installazione dei generatori di calore e dell'unità di trattamento dell'aria all'interno dello stesso locale, trattandosi di impianto maggiormente complesso, favorisce un aumento dei rischi per la sicurezza. Appare evidente come non solo le corrette gestione e manutenzione dell'impianto siano fondamentali per la prevenzione della sicurezza, ma anche una corretta progettazione degli impianti e della loro compatibilità, che tenga conto delle condizioni al contorno (come, ad esempio, il locale di installazione) e l'analisi dei rischi con la valutazione dei possibili scenari e l'attuazione di misure preventive e mitigative.

Laddove si ha la compresenza di generatori di calore ed unità di trattamento dell'aria, si potrebbero implementare delle azioni volte alla messa in sicurezza di tali impianti; ad esempio, considerando la facilità con la quale il monossido di carbonio viene diffuso nei locali situati al di fuori della centrale termica tramite la canalizzazione dell'aria, un sistema di rilevazione di tale gas tossico potrebbe evitare eventi incidentali come quello riportato in questo articolo (azione mitigativa).

Un intervento che attua una misura preventiva potrebbe materializzarsi attraverso la separazione dei locali in cui sono installati i generatori di calore e le unità di trattamento dell'aria evitando il diffondersi di gas pericolosi negli ambienti riscaldati. In sintesi, in presenza di canalizzazioni d'aria è opportuno prevedere una valutazione approfondita sull'interazione tra i vari impianti al fine di garantire la sicurezza degli utenti finali.

Bibliografia

[1] *Istituto Superiore di Sanità. Monossido di carbonio: un gas silenzioso, invisibile e mortale. Un opuscolo ISS per imparare ad evitarlo* [Internet]. Roma: ISS; 2025. Da: https://www.iss.it/-/monossido-di-carbonio-un-gas-silenzioso-invisibile-e-mortale-un-opuscolo-iss-per-imparare-ad-evitarlo

[2] Ministero della Salute - Direzione generale della prevenzione sanitaria - Direzione generale della comunicazione e dei rapporti europei e internazionali - Opuscolo *Monossido di carbonio (CO)* – Anno 2015. Da: https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulteriorallegati_ulteriorealleg ato_2_alleg.pdf

[3] Quotidiano on-line Alto Adige. *In Italia a causa del monossido di carbonio fino a 600 vittime ogni anno*. Articolo del 05 febbraio 2026 Da: https://www.altoadige.it/salute-e-benessere/in-italia-a-causa-del-monossido-di-carbonio-fino-a-600-vittime-ogni-anno-1.4285089?utm_source=chatgpt.com

[4] Paolo Cardillo. Stazione sperimentale per i Combustibili Viale Alcide De Gasperi 320097 San Donato Milanese (MI). Da: *Le esplosioni di gas, vapori e polveri*. https://www.researchgate.net/publication/265276333_LE_ESPLOSIONI_DI_GAS_VAPORI_E_POLVERI

[5] Alfredo Marrocchelli. *Manuale per il verificatore di impianti termici in edilizia*. ENEA. Roma, 1995, p.90

Procedura per il revamping di un serbatoio con accesso in ambiente confinato e controlli non distruttivi: il caso del Centro Italiano di Ricerche Aerospaziali

F. Petrosino[1], F. Losco[1], G. Marino[1], I. Campitelli[2], F. Viola[2]

[1]CIRA - Centro Italiano Ricerche Aerospaziali
[2]Inail – Uot di Avellino

Sommario
Questo lavoro si propone di portare all'attenzione il caso di rinnovamento di un serbatoio di olio diatermico, posto in vasca di contenimento ed a servizio della centrale termofrigo del Centro Italiano di Ricerche Aerospaziali, composta da 7 caldaie alimentate a metano e olio diatermico come fluido tecnico. Si mostrano le specifiche di lavoro effettuate nel rispetto delle norme di sicurezza per gli spazi confinati o sospetti ad inquinamento – Art. 66 D.L.gs 81/08 – con adozione di protocolli e procedure ai sensi del DPR 177/2011 per il personale altamente specializzato coinvolto.

1. Introduzione

Il Centro Italiano di Ricerche Aerospaziali (CIRA) possiede diversi impianti ad uso ricerca, soggetti ad attività di monitoraggio, ispezione e verifica in accordo alle normative di legge. Gli impianti di servizio del CIRA stanno attraversando un periodo di intenso revamping dovuto alla vetustà di alcune componenti, come i serbatoi per il contenimento dell'olio diatermico.
In questo lavoro viene presentato il piano operativo redatto per l'intervento tecnico-specialistico di manutenzione straordinaria di un serbatoio interrato da 50000 litri, visibile in Figura 1, con accesso in ambiente confinato e controlli non distruttivi.



Figura 1. Serbatoio di olio diatermico da riqualificare

Le attività che sono state svolte possono essere sintetizzate nei punti seguenti:

1. Imbracatura, sollevamento e movimentazione del serbatoio
2. Posizionamento del serbatoio in sicurezza per le operazioni di manutenzione
3. Svuotamento e pulizia del serbatoio, con accesso del personale specializzato all'interno dello stesso
4. Controllo e verifica di tutte le componenti con esecuzione di prove non distruttive
5. Prova idraulica finale
6. Riposizionamento del serbatoio nella sede originale, con fissaggio e ripristino dei collegamenti.

La lavorazione ha visto l'interfacciarsi di diverse ditte specializzate, con la supervisione ed il coordinamento del personale del CIRA.

2. Metodologia

Questa procedura vuole essere finalizzata a stabilire le fasi propedeutiche necessarie per eseguire il ripristino del serbatoio installato all'interno di una vasca di contenimento.

a. Movimentazione del serbatoio

Nella prima fase del lavoro, il serbatoio è stato scollegato dal resto dell'impianto, ed estratto dalla baia di contenimento, per essere posizionato in un luogo adatto alla sua manutenzione, come è visibile in Figura 2. Anche la procedura di spostamento del serbatoio è stata oggetto di un piano di sicurezza apposito, per evitare interferenze con gli impianti circostanti e ridurre al minimo il rischio per gli operatori. In particolare, è prescritto agli operatori di movimentare il serbatoio soltanto a vuoto, dopo aver connesso e collaudato i vari allacciamenti assicurandosi che lo sfiato sia libero per evitare che il serbatoio vada in depressione. Il serbatoio non presenta golfari di sollevamento, per cui sono state utilizzate apposite fasce collegate nei punti individuati in fase di preparazione dell'intervento, per evitare movimenti incontrollati.



Figura 2. Sollevamento e posizionamento del serbatoio per la manutenzione

b. Accesso in spazio confinato

La successiva parte delle attività di manutenzione si svolgerà all'interno del serbatoio, dove gli operatori specializzati effettueranno le necessarie lavorazioni, per cui si è preparata una procedura conforme alle modalità operative per interventi effettuati in zone "Spazi Confinati/Ambiente ASIC" D.Lgs. 81/08 e s.m.i.- D.P.R. 177/11.
Il serbatoio è stato posizionato in orizzontale, per facilitare il tiraggio verso l'esterno in caso di pericolo dell'operatore interno, e bloccato a terra tramite split per cemento armato. Sono stati poi aperti 2 passi d'uomo per permettere agli operatori di accedere, ispezionare l'interno, e consentire una areazione del serbatoio prima dell'ingresso degli operatori, operazione della durata di 48 ore. Per migliorare l'aerazione interna, sono state aperte anche tutte le bocchette e le prese d'aria presenti nel serbatoio. Uno schema degli ingressi/uscite del serbatoio è visibile in Figura 3. La misurazione della percentuale di ossigeno e della concentrazione di CO prima dell'inizio delle attività ha mostrato valori tali da non necessitare di ventilazione meccanica.



Figura 3. Accesso in spazio confinato, sorveglianza esterna in continuo di due operatori. Interno serbatoio pre-pulizia (sinistra) e post-pulizia (destra)

L'operatore addetto all'ingresso è provvisto dei seguenti dispositivi di protezione individuale:

- Tuta di protezione CE-CAT III
- Guanti protettivi, elmetto, scarpe antifortunistiche
- Lampada 24V per illuminare l'interno, certificata ATEX
- Kit corda e imbracatura per eventuale estrazione
- Autorespiratore omologato e certificato, munito di tubo per presa aria diretta all'esterno

- Misuratore multigas per la verifica continua di 0_2 e gas inerti, con analizzatore certificato per la combustione

L'operatore interno era singolo, mentre all'esterno erano presenti due operatori. In loro possesso c'era una ulteriore sonda per la misura di O_2 e gas inerti, con la quale monitoravano le concentrazioni di gas attraverso i due passi d'uomo. Inoltre, una sonda di temperatura misurava la temperatura interna del serbatoio prima e durante le operazioni di manutenzione.
L'olio contenuto all'interno del serbatoio era olio diatermico Therminol 66, inquadrato come liquido infiammabile categoria E2 a temperatura ambiente, con punto di infiammabilità a 184°C e temperatura di ebollizione a 359°C, pressione di vapore a 20°C pari a 0,00174 mbar. Il fluido è progettato per sistemi non pressurizzati, con una volatilità molto ridotta fino a temperature elevate, non ponendo particolari rischi per gli operatori della manutenzione.
La manutenzione all'interno del serbatoio prevedeva la pulizia meccanica e manuale con detergenti per olio diatermico, con un tempo medio di lavoro di 20 minuti in continuo all'interno, seguito da 10 minuti di recupero all'esterno.
La procedura di emergenza nel caso dovessero emergere complicanze fisiche o malori dell'operatore interno, seguendo le direttive aziendali e le modalità operative stabilite precedentemente, prevedono che gli operatori esterni procedano con l'estrazione del collega tramite tiraggio orizzontale della corda legata alla sua imbracatura, ed eventualmente ingresso per facilitare l'estrazione in sicurezza utilizzando un secondo kit autorespiratore a disposizione degli operatori esterni. Proseguiranno poi con manovre di primo soccorso, mentre viene contattato il numero di emergenza e pronto soccorso secondo le modalità indicate nei documenti di valutazione dei rischi aziendali.

c. Controlli non distruttivi

Il serbatoio è risalente al 1998, per cui dopo la manutenzione sono stati effettuati una serie di controlli non distruttivi per verificare lo stato operativo dello stesso. In particolare, sono stati eseguiti controlli con metodo visivo, con strumentazioni di rilievo spessimetrico ad ultrasuoni e con metodo dei liquidi penetranti, da personale certificato in accordo allo standard UNI EN ISO 9712. I risultati delle indagini condotte applicando tali metodologie, sono necessari alla valutazione della qualità del prodotto, in riconferma o meno dell'integrità in fase di utilizzo, con la conseguente diagnosi e ricerca delle cause che hanno originato anomalie, usura o malfunzionamento dell'impianto.
Nel controllo non distruttivo con esame visivo, l'interpretazione e la valutazione dei risultati è stata effettuata dall'operatore in base a specifici parametri di accettabilità della particolare difettologia del componente in esame. La competenza dell'operatore incaricato del controllo rappresenta il punto essenziale di tale metodologia. Al fine di assicurare la giusta sensibilità e affidabilità del risultato, le superfici da controllare sono state spazzolate fino ad eliminare la vernice, così come visibile in Figura 4.



Figura 4. Controllo visivo su giunzioni e saldature

Il rilievo spessimetrico ad ultrasuoni si basa sul fenomeno della propagazione di onde ultrasonore generate da un trasduttore e trasmesse nel materiale. L'onda attraversa lo spessore e viene riflessa dalla superficie opposta, ritornando al sensore. Misurando il tempo di volo dell'eco e conoscendo la velocità del suono nel materiale, è possibile calcolare lo spessore con elevata precisione. La sonda utilizzata è del tipo a doppio elemento da 5 MHz, ed offre un campo di misura da circa 1 mm a 200 mm, ideale per la misurazione di pareti di tubazioni e serbatoi.
Nella Figura 5 è possibile vedere l'operatore specializzato che effettua il controllo ad ultrasuoni per valutare lo spessore del serbatoio, in modo da confermare o meno l'entità di una variazione dello stesso dovuta all'utilizzo.



Figura 5. Controllo spessimetrico ad ultrasuoni

Il controllo con liquidi penetranti sfrutta la capacità di alcuni liquidi di penetrare, per capillarità e non per gravità, all'interno dei difetti superficiali (cricche, cavità, ecc) presenti su una superficie da analizzare. La bassa tensione superficiale e la buona bagnabilità di questi liquidi, ne assicurano la penetrazione anche all'interno di

discontinuità sottilissime. Dopo aver rimosso l'eccesso di liquido, viene applicato un rivelatore che consente di evidenziare gli eventuali difetti.



Figura 6. Controllo con liquidi penetranti

Nella Figura 6 sono esposti i risultati dell'indagine coi liquidi penetranti sulle saldature del serbatoio, e sulle giunzioni con le tubazioni di collegamento.

d. Prova idraulica

Prima di essere riposizionato nel suo alloggio originale, il serbatoio è stato sottoposto ad una prova idraulica per verificarne la tenuta. In conformità con le norme di riferimento, sono state chiuse le aperture e i collegamenti, ed installati dei manometri per verificare il valore della pressione raggiunto all'interno del serbatoio, ed evidenziare eventuali perdite.

3. Risultati

Il serbatoio da riqualificare al CIRA risale al 1998, progettato per contenere olio diatermico a temperature fino a 50°C. Questa tipologia di recipienti a pressione secondo le attuali norme vigenti in materia è soggetta a verifiche periodiche da parte degli enti preposti, come INAIL (ex ISPESL), ARPA ed ASL competenti per territorio. Il CIRA ha richiesto però una manutenzione approfondita a ditte specializzate, con esami integrativi rispetto alle verifiche degli enti preposti, in modo da ottemperare alle specifiche tecniche applicative dei regolamenti e decreti di riferimento.
Il serbatoio è stato spostato dalla sua sede iniziale, per poter essere posizionato in sicurezza. La manutenzione ha previsto uno svuotamento ed una pulizia approfondita, e la successiva riverniciatura di tutte le superfici. Diverse ditte specializzate hanno quindi verificato tutte le componenti dell'insieme, tramite controlli non distruttivi, certificando l'integrità dello stesso.
Dal controllo con metodo visivo, eseguito sulle lamiere circolari, le giunzioni saldate e sui fondi bombati, così come mostrato in Figura 4, non sono state evidenziati difetti degni di nota. Il rilievo spessimetrico, effettuato su 24 posizioni diverse del serbatoio, ha evidenziato spessori delle superfici dai 10,02 mm ai 10,56 mm, conformi allo spessore

nominale dichiarato dal costruttore di 10 mm. Le posizioni di rilievo sono state individuate dal personale certificato livello 3 UNI EN ISO 9712, formando un reticolo sulla virola, e sui fondi bombati del serbatoio. Il controllo coi liquidi penetranti sulle giunzioni delle saldature nelle parti strutturali non hanno evidenziati anomalie degne di nota, dimostrando che il serbatoio per l'olio diatermico non ha subito un deterioramento invalidante durante la sua vita lavorativa.
Ultimo test a cui è stato sottoposto il serbatoio è stata una prova idraulica. Durante tale attività il serbatoio ha raggiunto una pressione di 12 bar, mantenendo tale valore per circa 15 minuti. La prova non ha evidenziato cali di pressione durante tutto il tempo di mantenimento e non sono state rilevate perdite o trafilamenti né tantomeno deformazioni permanenti.
Dopo la prova idraulica finale, il serbatoio è stato riposizionato nella sede originale, come mostrato in Figura 7, con il fissaggio ed il ripristino della copertura e dei collegamenti con la rete idraulica del CIRA.

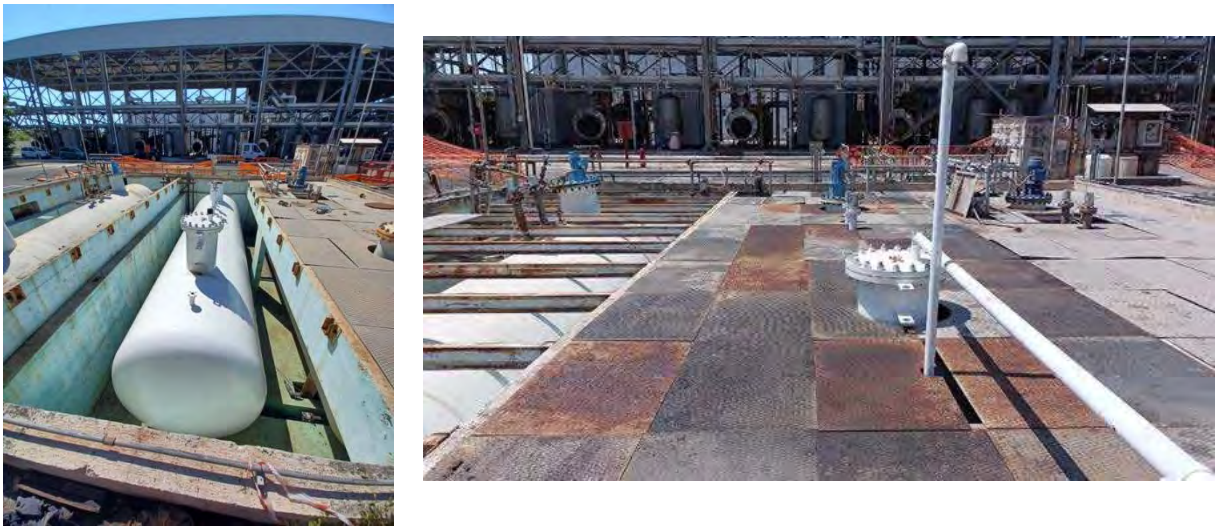


Figura 7. Riposizionamento del serbatoio nella baia originale e ripristino della copertura e dei collegamenti

4. Conclusioni

La procedura implementata per il revamping dell'attrezzatura del CIRA pone l'accento sulla gestione e sul controllo di tutte le fasi delle procedure di sicurezza adottate. Dalla verifica degli standard di formazione degli operatori specializzati coinvolti, nel rispetto della UNI 11958:2024, alla procedura di lavoro vera e propria per le azioni di manutenzione e rinnovamento. Processo che ha rappresentato un miglioramento delle prestazioni di impianto con lodevole economicità per il Centro Ricerche. Inoltre, la procedura ha riprodotto un modello tecnico procedimento che evidenzia come, anche il committente affidatario dell'incarico a terzi per la gestione della manutenzione, è parte responsabile del coordinamento delle operazioni di lavoro e della valutazione di tutti i rischi interferenti presenti, al fine di generare buone prassi – linee guida – per successive ed analoghe attività di ulteriori parti d'impianto.

Bibliografia e sitografia

[1] Regolamento recante norme per la qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in ambienti sospetti di inquinamento o confinanti, dPR n.177/2011

[2] Controllo non distruttivo delle saldature - Esame visivo di giunti saldati per fusione, UNI EN ISO 17637:2017

[3] Saldatura - Giunti saldati per fusione di acciaio, nichel, titanio e loro leghe (esclusa la saldatura a fascio di energia) - Livelli di qualità delle imperfezioni, UNI EN ISO 5817:2008

[4] Prove Non Distruttive – Misurazione dello spessore mediante ultrasuoni, UNI EN 16809:2019

[5] Controllo non distruttivo delle saldature – Controllo mediante liquidi penetranti - Livelli di accettabilità, UNI EN ISO 23277

Addestramento ibrido per operatori in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento: un caso studio in ambito aeroportuale

L. Di Donato[1], L. Ricciardi[1], M. Pirozzi[1], M. Spagnuolo[1], P. Aricò[2], S. Papa[3], G. Di Gironimo[4], F. Massa[4]

[1]Inail - Dit
[2]Università "La Sapienza" di Roma.
[3]Università degli Studi "Niccolò Cusano"
[4]Università "Federico II" di Napoli

Sommario
Il laboratorio "Sicurezza degli impianti di trasformazione e produzione" dell'Inail ha maturato negli anni un'esperienza innovativa nel settore della formazione e dell'addestramento dei lavoratori che operano in ambienti confinati, contesti caratterizzati da elevati livelli di rischio.
L'attività si avvale di un simulatore brevettato, in grado di riprodurre, in condizioni di sicurezza, le dinamiche operative tipiche di tali ambienti, consentendo agli operatori di acquisire competenze pratiche fondamentali per lo svolgimento dei compiti che sono tenuti ad eseguire. In una prospettiva di ulteriore innovazione, i ricercatori del laboratorio stanno sviluppando strumenti di realtà virtuale per affiancare e potenziare le esperienze formative sul campo.
Un caso concreto riguarda la ricostruzione virtuale di un pozzetto situato sulla pista dell'aeroporto di Fiumicino, destinato all'alloggiamento di condotte per l'immissione di aria calda o fredda negli aeromobili in sosta. Tale ambiente, classificabile a tutti gli effetti come confinato, richiede l'accesso periodico di operatori per interventi di manutenzione. La definizione accurata della procedura da eseguire ha permesso di riprodurre in realtà virtuale tutte le fasi operative, offrendo agli addetti l'opportunità di esercitarsi preventivamente in un contesto immersivo e sicuro, prima dell'ingresso fisico nel pozzetto.
L'integrazione di diverse metodologie di addestramento consente di migliorare la qualità e l'efficienza dei percorsi formativi, in modo da ridurre le situazioni di rischio che possono verificarsi nel contesto operativo reale. In prospettiva, l'attività di ricerca intende estendere tali applicazioni, includendo l'analisi delle tipologie di near miss più frequenti e l'addestramento mirato anche alle dinamiche di mancato infortunio, al fine di rafforzare ulteriormente la cultura della sicurezza.

1. Introduzione

Uno spazio confinato e/o sospetto di inquinamento è un luogo in cui possono essere svolte attività di manutenzione, regolazione, installazione di componenti meccaniche, pulizia e altre operazioni, ma non è progettato per lo svolgimento continuativo

dell'attività lavorativa. Fino a poco tempo fa, la legislazione italiana non definiva chiaramente cosa si intendesse per spazio confinato. Soltanto di recente, nel novembre 2024, è stata pubblicata in Italia la nuova norma tecnica UNI 11958:2024 – *Ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento – Criteri per l'identificazione dei pericoli e la valutazione dei rischi*, che fornisce una prima definizione ufficiale di cosa sia un ambiente confinato e/o sospetto di inquinamento.
Sebbene una norma tecnica non abbia lo stesso valore vincolante di una legge, la definizione contenuta al suo interno rappresenta un passo fondamentale, perché per la prima volta mette a disposizione di aziende e lavoratori un riferimento chiaro per identificare questo tipo di ambienti. La norma, inoltre, definisce i criteri per una valutazione dei pericoli e conseguenti rischi per gli operatori nonché le responsabilità di questi ultimi, compreso un importante riferimento alla sorveglianza sanitaria e alla relazione tra il datore di lavoro e il medico competente, tenuto a verificare l'idoneità alla mansione specifica dei lavoratori.
Secondo tale norma tecnica, l'ambiente confinato e/o sospetto di inquinamento è definito come "uno spazio circoscritto, non progettato e costruito per la presenza continuativa di un lavoratore, ma di dimensioni tali da consentire l'ingresso e l'esecuzione dell'attività assegnata, caratterizzato da vie di accesso o uscita limitate e/o difficoltose, e da ventilazione sfavorevole, all'interno del quale non è possibile escludere la presenza o lo sviluppo di condizioni pericolose per la salute o la sicurezza dei lavoratori."
In sintesi, un ambiente confinato e/o sospetto di inquinamento presenta le seguenti caratteristiche (non sempre necessariamente tutte contemporaneamente):

- limitato e non progettato o costruito per la presenza continuativa di un lavoratore;
- caratterizzato da accessi e/o uscite limitati o difficoltosi;
- caratterizzato da ventilazione sfavorevole e dalla possibile presenza di agenti chimici pericolosi (gas, vapori, polveri, nebbie).

Il numero di decessi che avviene in questi ambienti è spesso superiore al numero di incidenti, poiché gli eventi mortali coinvolgono non solo i lavoratori direttamente interessati dall'incidente primario, ma anche coloro che intervengono nel tentativo di soccorrerli. Per questo motivo, la formazione e l'addestramento, espressamente richiesti dal nuovo Accordo Stato-Regioni del 17 aprile 2025 "finalizzato alla individuazione della durata e dei contenuti minimi dei percorsi formativi in materia di salute e sicurezza" di chi opera in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento, rivestono un'importanza fondamentale.

2. Il modello formativo Inail

In questa ottica, i ricercatori Inail hanno messo a punto un percorso di formazione e addestramento che si svolge in un arco temporale di 12 ore, e si avvale anche dell'uso a fini addestrativi di un simulatore fisico in grado di replicare in modo protetto ed efficace tutte le tipologie di pericolo e conseguente rischio per i lavoratori operanti in

questi ambienti. La lezione frontale svolta in aula è principalmente incentrata sul fornire informazioni riguardanti:

- i criteri di qualificazione delle imprese e dei lavoratori autonomi destinati a operare in ambienti confinati e/o sospetti di inquinamento, secondo quanto previsto dalla normativa vigente;
- una panoramica generale delle tipologie di rischio che i lavoratori possono incontrare in tali ambienti;
- la definizione di una procedura di lavoro e di emergenza efficace per fronteggiare tali rischi;
- i principali dispositivi di protezione individuale (DPI) e gli strumenti che i lavoratori devono utilizzare.

In questa fase sono previsti anche casi studio e video dimostrativi.
La parte addestrativa, come detto, si avvale dell'utilizzo di un simulatore (fig. 1). Esso è stato progettato per alterare le condizioni cognitive di chi lo utilizza, facendogli sperimentare situazioni di pericolo e, conseguentemente, rischi estremamente realistici, tipici degli ambienti confinati (scarsa visibilità, spazi angusti, difficoltà di comunicazione, scarsa ventilazione, difficoltà nelle operazioni di soccorso, ecc.).



Figura 1. Il simulatore Inail per ambienti confinati

Il simulatore è trasportabile, può essere collegato alla rete elettrica dell'azienda o dell'organizzazione ospitante ed è dotato di strutture e sistemi che ne consentono l'uso in sicurezza. La parte superiore del simulatore è realizzata in modo da poter svolgere in sicurezza l'attività di esercitazione relativa all'accesso in un ambiente confinato attraverso un passo d'uomo verticale, essendo protetta contro le possibili cadute dall'alto mediante un parapetto metallico posto lungo tutto il perimetro del tetto del simulatore. L'accesso avviene tramite una scala ancorabile ad una delle pareti esterne laterali del simulatore. Il simulatore è inoltre dotato di:

- una sala di controllo con sistema di monitoraggio per registrare gli eventi dell'attività formativa;
- un passo d'uomo orizzontale;
- tubazioni e valvole colorate, oltre a quattro diverse serrature (ognuna con la propria chiave) per simulare condizioni LOTO (Lock-Out Tag-Out);
- pareti interne mobili;

- sistemi che influenzano le capacità sensoriali, come diversi tipi di rumori riprodotti tramite altoparlante, fumi innocui di vari colori, ecc;
- sistemi di videocamere per registrare le operazioni svolte, analizzare e correggere eventuali criticità.

Un indubbio vantaggio nell'uso del simulatore fisico è la possibilità di aumentare la consapevolezza della difficoltà di recupero di emergenza di personale non collaborante, sensibilizzando i lavoratori all'importanza di applicare correttamente le procedure di lavoro per facilitare l'intervento dei soccorritori.
Il simulatore Inail ha ricevuto finora il brevetto EPO (Ufficio Europeo dei Brevetti) ed è stato inoltre brevettato in Paesi quali USA, Cina, Canada, Brasile, India, UK e Svizzera. Finora, dati aggiornati a novembre 2025, sono stati formati oltre 1100 lavoratori, circa 900 dei quali sono stati anche addestrati, svolgendo quindi il percorso completo di formazione e addestramento. Anche più di 200 studenti di alcuni Istituti superiori ed universitari hanno usufruito del percorso di formazione.

3. Caso studio: attività di ricostruzione virtuale di un ambiente in ambito aeroportuale

Per ridurre ulteriormente i rischi che i lavoratori possono incontrare negli spazi confinati, la formazione sulle azioni da svolgere tramite realtà virtuale può essere molto utile. A tal fine, nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato da Inail, al quale partecipano il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università "Federico II" di Napoli e il Dipartimento di Ingegneria Informatica dell'Università "La Sapienza" di Roma, si sta lavorando alla ricostruzione virtuale di ambienti sospetti di inquinamento o confinati. L'obiettivo è integrare quanto più possibile l'addestramento fisico sul campo con le attività in realtà virtuale, affinché le due modalità possano coesistere e supportare il lavoratore sia nelle normali attività lavorative sia nelle attività formative.
A questo scopo, è stata realizzata la ricostruzione virtuale di un pozzetto sotterraneo situato vicino alle piste dell'aeroporto di Fiumicino a Roma. Il pozzetto contiene una tubazione per il pre-condizionamento che viene collegata ad un aeromobile nelle vicinanze per fornire aria calda o fredda agli ambienti interni, consentendo così al velivolo di mantenere la climatizzazione interna senza dover accendere i motori, riducendo il consumo di carburante ed evitando i rischi derivanti dalla presenza di un motore acceso in prossimità dei lavoratori che devono svolgere le diverse operazioni sulla pista. Il pozzetto corrisponde pienamente alla descrizione di uno spazio confinato: è infatti caratterizzato da uno spazio ristretto, con vie di accesso e uscita limitate, non destinato alla presenza continuativa di lavoratori, ma utilizzato occasionalmente per manutenzione o controlli. L'accesso al suo interno avviene sporadicamente, per effettuare qualche operazione di manutenzione o semplicemente per un controllo visivo. In fig. 2 sono riportate una foto dello spazio esterno e una dell'interno del pozzetto. Il tubo giallo che si nota nell'immagine a

destra è quello che viene estratto e collegato all'aereo per immettere aria calda o fredda.




Figura 2. Esterno ed interno del pozzetto

Il primo passo è consistito nella ricostruzione dell'ambiente reale, realizzata mediante un laser scanner, con cui sono state effettuate 4 scansioni dello spazio interno e 2 scansioni dell'ambiente esterno, ottenendo la cosiddetta "nuvola di punti". Quest'ultima ha permesso di generare un modello "mesh" del pozzetto, utilizzato come base per la successiva modellazione tridimensionale dell'ambiente e dell'infrastruttura esistente.
Alcune immagini risultanti da questa ricostruzione, relative all'interno e all'esterno del pozzetto, sono mostrate di seguito. In particolare, in fig. 3 l'immagine dell'ambiente di lavoro esterno ricostruito virtualmente.



Figura 3. Ricostruzione virtuale dell'ambiente esterno del pozzetto

In figura 4 è mostrata la ricostruzione virtuale dell'interno del pozzetto con gli elementi in esso presenti.



Figura 4. Interno del pozzetto ricostruito virtualmente

In figura 5 è riportata la sequenza di campionamento della qualità dell'aria effettuata tramite rilevatore multigas.

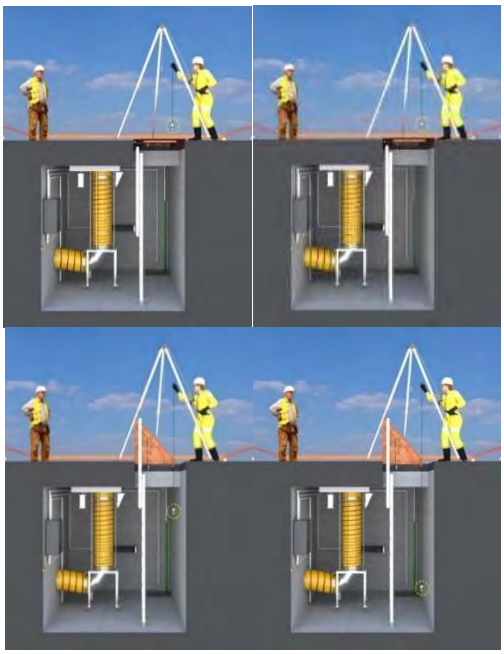


Figura 5. Ricostruzione della sequenza di campionamento della qualità dell'aria con multigas.

A proposito delle immagini in fig. 5, va sottolineato come l'accesso ad un ambiente confinato e/o sospetto di inquinamento debba sempre essere preceduto da un campionamento della qualità dell'aria. Lo strumento utilizzato a questo scopo è il rilevatore multigas, che oltre a misurare la percentuale di ossigeno presente in atmosfera (che in condizioni normali è 20,8%), permette di rilevare la eventuale presenza di gas nocivi, quali idrogeno solforato, monossido di carbonio, atmosfere esplosive, ecc. La procedura corretta prevede che si faccia dapprima una verifica esterna sul bordo del portellone di accesso all'ambiente, e poi, a portellone aperto, che si facciano almeno 3 verifiche all'interno del pozzetto: a livello superficiale, intermedio e sul fondo. Questo perché i gas stratificano e una sola misurazione potrebbe essere non in grado di rilevare la presenza di un eventuale gas pericoloso.

4. La definizione della procedura di lavoro e l'implementazione in realtà virtuale

La ricostruzione realizzata, di cui le immagini riportate in precedenza sono un esempio non esaustivo, è stata preliminare alla riproduzione in realtà virtuale dell'ambiente di lavoro: infatti, come già detto, l'obiettivo primario del progetto è quello di consentire agli operatori di eseguire in realtà virtuale, attraverso visori o altri strumenti, esattamente le stesse operazioni che dovranno effettivamente svolgere quando opereranno fisicamente in questi ambienti, in modo che prima dell'accesso fisico possano familiarizzare con il tipo di ambiente con cui avranno a che fare attraverso la sua ricostruzione virtuale.

Ovviamente è stato dapprima necessario individuare una specifica operazione da ricostruire e implementare in VR. Una delle attività che deve essere eseguita dall'operatore che accede all'interno del pozzetto è quella di verificare il corretto

fissaggio del morsetto (indicato dalla freccia in fig. 6) che stabilizza il tubo nel suo alloggiamento.

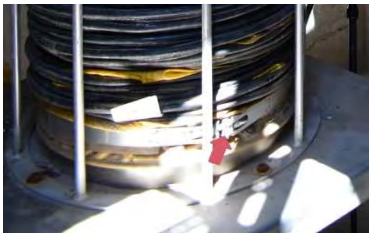


Figura 6. Immagine del morsetto che fissa il tubo

In caso di risultato negativo, ovvero di instabilità del tubo, è necessario stringere il morsetto che lo tiene in posizione. Questa specifica operazione fa parte di una procedura molto più complessa che prevede alcuni passaggi prima di entrare nel pozzetto e successivi all'operazione da eseguire all'interno dello stesso. La procedura, definita dai ricercatori Inail, si articola in 20 passi ed è la seguente:
1° passo: i lavoratori delimitano l'area di accesso al pozzetto, rappresentata esternamente dal portellone superficiale. La delimitazione può essere fatta con coni o altri dispositivi quali paletti o colonnine bicolori;
2° passo: preliminarmente all'apertura del portellone, si procede ad effettuare una verifica della qualità dell'aria in corrispondenza del contorno perimetrale dello stesso mediante rilevatore multigas;
3° passo: in assenza di segnalazioni di pericolo da parte del multigas, si procede all'apertura del portellone (che si apre verso l'esterno);
4° passo: si procede alla rilevazione dell'aria interna al pozzetto mediante il multigas; la rilevazione deve essere fatta a tre (3) livelli: in corrispondenza del piano orizzontale di accesso del portellone, a mezza altezza e sul fondo del pozzetto, per accertarsi dell'assenza di eventuali gas stratificatisi a livello superficiale (gas leggeri) o sul fondo (gas pesanti);
5° passo: si procede al montaggio e all'installazione in corrispondenza dell'apertura del pozzetto del tripode cevedale o di un altro dispositivo idoneo per la movimentazione del lavoratore che, opportunamente imbracato, deve essere calato dall'apertura del pozzetto;
6° passo: il lavoratore che deve entrare fisicamente nel pozzetto indossa un'imbracatura dotata di gancio sternale e dorsale, un caschetto protettivo per il capo, guanti idonei all'attività e scarpe antiinfortunistiche;
7° passo: il lavoratore che entra nel pozzetto posiziona il rilevatore multigas all'altezza del petto in modo tale che possa essere segnalata la presenza di gas pericolosi o carenze di ossigeno mentre egli si muove all'interno dell'ambiente;
8° passo: il lavoratore imbracato si siede sul bordo superiore del pozzetto e si aggancia alla fune dell'argano del tripode cevedale mediante il gancio sternale dell'imbracatura;

9° passo: il lavoratore imbracato e agganciato all'argano del tripode è calato lentamente all'interno del pozzetto. L'operazione è effettuata da un altro lavoratore che mediante una manovella agisce sull'argano del tripode per facilitare la discesa del collega;
10° passo: il lavoratore arriva sul fondo del pozzetto e si sgancia dalla fune del tripode;
11° passo: il lavoratore procede ad effettuare il task che ha richiesto la sua presenza all'interno del pozzetto; nel caso specifico supponiamo che egli debba effettuare un controllo visivo della fascetta (figura 6) che stabilizza il tubo giallo nel suo alloggiamento, per verificarne la presenza in loco;
12° passo: il lavoratore, oltre al controllo visivo, prova a muovere il tubo per verificare che esso sia stabile nella sua posizione e che quindi la fascetta metallica sia sufficientemente stretta;
13° passo: ipotizzando che il tubo si muova leggermente, e quindi che la fascetta non sia fissata in modo stretto, il lavoratore provvede a fissarla mediante una chiave inglese, stringendo il bullone che si trova all'estremità della fascetta. Ovviamente ipotizziamo che egli abbia la chiave inglese con sé e la tenga in una tasca laterale della tuta di lavoro;
14° passo: il lavoratore, eseguito il task per il quale è stato richiesto il suo ingresso nel pozzetto, si aggancia da solo nuovamente alla fune del tripode, sempre mediante il gancio sternale, e viene sollevato all'esterno dal collega che "manovra" l'argano del tripode;
15° passo: arrivato in corrispondenza del bordo esterno dell'apertura del pozzetto, il lavoratore siede su tale bordo ed è aiutato a sganciare la fune e a mettersi in piedi;
16° passo: viene chiuso il portellone del pozzetto;
17° passo: il lavoratore si toglie l'imbracatura;
18° passo: il tripode cevedale viene smontato;
19° passo: la delimitazione con i coni è rimossa. Il lavoro è terminato.
La procedura descritta è stata interamente implementata all'interno di un'applicazione di Realtà Virtuale sviluppata utilizzando il motore grafico Unreal Engine, scelto per la sua capacità di garantire un'elevata qualità grafica, un realismo fisico accurato e una gestione efficace delle interazioni in ambienti immersivi complessi. L'obiettivo dell'implementazione è stato quello di riprodurre fedelmente non solo l'ambiente fisico del pozzetto, ma anche la sequenza operativa, le azioni manuali e le condizioni contestuali che caratterizzano l'attività reale.
L'ambiente virtuale è stato ricostruito a partire dal modello geometrico, realizzato attraverso le tecniche descritte nel paragrafo 3 con l'ausilio di materiale fotografico e documentazione tecnica forniti, modellando in modo dettagliato il pozzetto, il portellone di accesso, il tripode cevedale, il tubo, nonché tutti gli strumenti e i dispositivi di sicurezza coinvolti nella procedura (rilevatore multigas, imbracatura, chiave inglese e coni di delimitazione). Particolare attenzione è stata dedicata alle

proporzioni spaziali e alle distanze, al fine di garantire una percezione realistica degli ingombri e dei vincoli di movimento tipici di un ambiente confinato.
L'applicazione è eseguibile in modalità stand-alone su visore Meta Quest 3, senza la necessità di collegamento a un computer esterno. Questa scelta consente agli operatori di svolgere l'addestramento in qualsiasi luogo reale idoneo, riducendo i vincoli logistici e aumentando la flessibilità della formazione.
L'interazione con l'ambiente virtuale avviene tramite hand-tracking, ovvero a mano libera, senza l'utilizzo di tool manuali fisici o controller fisici. Questa modalità di interazione consente di simulare in modo naturale le azioni operative previste dalla procedura, favorendo una maggiore coerenza tra i gesti eseguiti in ambiente virtuale e quelli richiesti nello scenario reale. Gli strumenti necessari all'esecuzione dei task sono riprodotti come oggetti virtuali interattivi e manipolabili direttamente tramite hand-tracking.
Dal punto di vista strutturale, l'esperienza in Realtà Virtuale è stata organizzata come una sequenza di task successivi, ciascuno dei quali corrisponde a uno specifico passo della procedura reale precedentemente descritta. L'utente viene guidato attraverso le diverse fasi operative in ordine cronologico mediante pannelli informativi che indicano le azioni da compiere per ciascun task. Questa suddivisione consente di riprodurre fedelmente la logica procedurale dell'attività, facilitando l'apprendimento corretto della sequenza operativa e riducendo il rischio di omissioni o errori.
Le figure da 7 a 10 che seguono, riportano alcuni screenshot tratti dal video completo della ricostruzione in VR della procedura, che dovrà poi essere eseguita in addestramento dal/dagli operatori che dovranno fisicamente accedere al pozzetto.

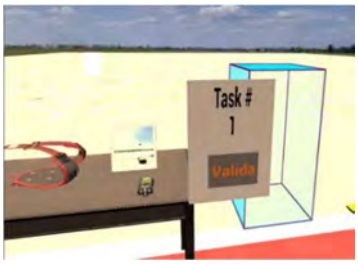
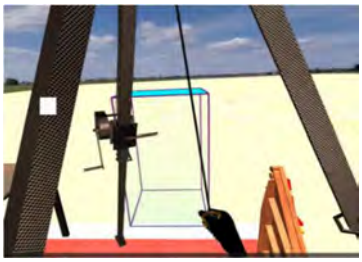
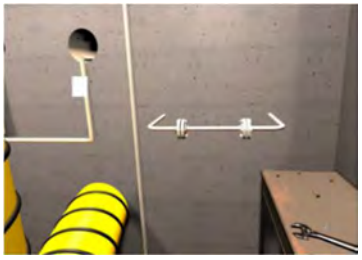


Figura 7. Evidenza del task da eseguire


Figura 8. Campionamento della qualità dell'aria


Figura 9. L'operatore si aggancia al tripode per la discesa


Figura 10. Scorcio dell'interno del pozzetto

5. Conclusioni e sviluppi futuri

In conclusione, l'utilizzo della Realtà Virtuale si configura come un supporto efficace per l'addestramento degli operatori, permettendo loro di familiarizzare con l'ambiente, gli strumenti e le azioni da compiere prima dell'accesso fisico reale al pozzetto, aumentando la consapevolezza dei rischi e il livello complessivo di sicurezza operativa. A dimostrazione di come l'utilizzo di queste nuove tecnologie anche in ambito formazione sia in forte ascesa, vanno segnalate due novità molto recenti:

- il nuovo Accordo Stato-Regioni in materia di Formazione alla Salute e Sicurezza sul lavoro, entrato in vigore nel maggio 2025, che ha praticamente "sdoganato" il loro utilizzo nei percorsi formativi e/o di addestramento;
- la proposta di realizzazione e successiva adozione di una Prassi di Riferimento (PdR) UNI per disciplinare l'utilizzo della realtà virtuale ed aumentata con o senza simulatori nei percorsi formativi e/o di addestramento in materia di salute e sicurezza sul lavoro, anche in applicazione dell'accordo di cui al punto precedente. L'Inail, e in particolare il laboratorio di "Sicurezza degli impianti di trasformazione e produzione", rappresentato in seno al gruppo di lavoro Uni dal suo direttore, avrà la responsabilità scientifica del suddetto PdR.

I prossimi passi a cui i ricercatori Inail stanno lavorando riguardano la virtualizzazione di altri scenari di lavoro, caratteristici di ambienti sospetti di inquinamento e/o confinati di diversi settori produttivi, soprattutto di quelli in cui le statistiche evidenziano una certa incidenza in termini di infortuni e/o near-miss, nonché l'introduzione di elementi di Augmented Reality (AR), ovvero di informazioni digitali sovrapposte al mondo reale, durante la fase di addestramento dei lavoratori al simulatore. Quest'ultimo aspetto permetterà di arricchire l'esperienza addestrativa e formativa di ogni singolo lavoratore formato, poiché si potranno inserire nello scenario della simulazione fisica elementi specifici e di dettaglio propri delle attività da svolgere nel contesto lavorativo d'interesse del lavoratore.

Bibliografia

[1] Di Donato, L., Longo, F., Ferraro, A., Pirozzi. An advanced solution for operators' training working in confined and/or pollution suspected space. Procedia Manufacturing 42. 2020; 254–258.

[2] Landucci, G., Ricciardi, L., Rossi, L., Ovidia, F., Di Donato, L. Quantitative methodology to support the hazard assessment of confined space operations in the process industry. Chemical Engineering Transactions. 2020; Volume 82, Pages 1 – 6.

[3] Longo, F., Padovano, A., Gazzaneo, L., Mirabelli, G., Pirozzi, M., Di Donato, L. Integrating physical and virtual game-based simulation for operators' training to enhance learning effectiveness: an application in hazardous industrial spaces. International Journal of Simulation and Process Modelling. 2021; Vol. 16, Issue 2, Pages 130– 146.

[4] Zhuo, X., Xu, M., Dong, Q., Zhang, H., Chen, Y. Design and Development of Digital Teaching Resources for HSE Training on Safety Management of Confined Space Operations Based on VR Technology. Proceedings of the International Conference on Industrial Design and Environmental Engineering, IDEE. November 24–26, 2023, Zhengzhou, China.

[5] Lanzotti, A., Vanacore, A., Tarallo, A., Nathan-Roberts, D., Coccorese, D., Minopoli, V., ... & Papa, S. (2020). Interactive tools for safety 4.0: virtual ergonomics and serious games in real working contexts. Ergonomics. 2020; 63(3), 324-333. https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1683603.

[6] Lanzotti, A., Carbone, F., Di Gironimo, G., Papa, S., Renno, F., Tarallo, A., D'Angelo, R., On the usability of augmented reality devices for interactive risk assessment, International Journal of Safety and Safety Engineering, vol. 8, p. 132-138, ISSN: 2041-9031, https://doi.org/10.2495/SAFE-V8-N1-132-138.

[7] Renno, F., Papa, S., Polichetti, R., Coccorese, D., D'Angelo, R., Grasso, C., Tarallo, A.,Lanzotti, A., Development of a Parametric Scene Editor of Serious Games for Safety in Workplaces. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023; pp. 1448-1459, https://doi.org/10.1007/978-3-031-15928-2_126.

[8] Di Donato, L., Pirozzi, M., Cordisco, A., Spagnuolo, M., Freda, D., Biagi, A., Ricciardi, L. Prevention Through Innovation: Innovative methods and tools for the effectiveness of experiential training for workers working in confined spaces. Conference Proceedings AHFE International Conference on Human Factors in Design, Engineering, and Computing, Honolulu (Hawaii) 8-10 dicembre 2024. ISBN: 978-1-964867-35-9; DOI: 10.54941/ahfe1005802 (https://doi.org/10.54941/ahfe1005802).

[9] Di Donato, L., Ricciardi, L., Di Ferdinando, G., Biagi A., Papa S., Tarallo A., De Amicis R., Buonocore S., Massa F., Aricò P., Palermo E., Di Gironimo G., Spagnuolo M. Virtual reality in the training of workers in confined spaces: a concrete experience. ICSI 2 International Conference on Safety & Innovation. 2025. ISBN: 978-88-7484-915-4.

[10] Di Donato L., Spagnuolo M., Pirozzi M., Freda D., Biagi A., Di Ferdinando G., Papa S., Ricciardi L. Application of innovative methods and tools in experiential training of workers in confined spaces. Conference Proceedings della 35th European Safety and Reliability Conference and 33rd Society for Risk Analysis Europe Conference. 2025. ISBN: 978-981-94-3281-3; doi: 10.3850/978-981-94-3281-3_ESREL-SRA-E2025-P3255-cd.

Sicurezza dei processi nei siti di digestione anaerobica degli impianti di trattamento delle acque reflue

M.P. Gatto[1], N. L'Episcopo[2], A. De Cristofaro[1], F. Rossetti[3]

[1]Inail - Uot di Avellino.
[2]Inail - Uot di Catania.
[3]Inail - Uot di Brescia.

Sommario
La digestione anaerobica (DA), processo multistadio per la decomposizione e la stabilizzazione della materia organica in assenza di O_2, si prefigge il duplice obiettivo di ridurre la quantità di rifiuti da conferire in discarica e la dipendenza dai combustibili fossili. Attualmente l'Italia conta una produzione annua di biogas stimata di 572 milioni di metri cubi, puntando a decuplicarla entro il 2030. L'analisi ivi presentata si propone come obiettivo quello di valutare i pericoli occupazionali nei siti di produzione di biogas, tra cui l'esposizione a sostanze tossiche e gli incidenti dovuti a guasti nei controlli meccanici e di processo, con particolare attenzione alla sicurezza delle attrezzature a pressione degli impianti di trattamento delle acque reflue. Sono state esaminate specifiche aree di interesse che possono orientare la gestione del rischio, valutando i pericoli, gli eventi precursori, gli indicatori di processo, nonché i recenti progressi relativi agli indicatori di allerta precoce. Studi sottoposti a revisione paritaria hanno descritto chiaramente i pericoli all'interno del processo di DA, tra cui esplosioni, incendi e rilascio di gas asfissianti/tossici, con le misure preventive e di mitigazione del rischio che possono contribuire a controllarli. Gli incidenti legati al funzionamento degli impianti di DA sono spesso evitabili attraverso una migliore comprensione dei meccanismi alla base dell'instabilità della digestione anaerobica. I rapidi progressi nelle tecnologie di monitoraggio, tra cui l'uso di sensori in tempo reale e controlli software basati sull'intelligenza artificiale (IA), possono altresì contribuire al rapido rilevamento di guasti alle apparecchiature e all'attivazione tempestiva di interventi di controllo, migliorando l'affidabilità degli impianti di DA.

1. Introduzione

Una combinazione di fattori economici e sociali, come il progressivo esaurimento della disponibilità dei combustibili fossili, la dipendenza dagli esportatori di energia e le preoccupazioni ambientali legate al riscaldamento globale, impone una rapida e profonda decarbonizzazione sia delle economie sviluppate sia di quelle in via di sviluppo nei prossimi decenni [1]. Diverse economie hanno di conseguenza definito piani e strategie per perseguire e raggiungere questo obiettivo. Entro il 2030, la quantità minima di energia rinnovabile in economie come UE, USA, Cina, India e Giappone varierà tra il 25 e il 50%, secondo i piani governativi. Il biogas è una promettente fonte di energia rinnovabile e la sua produzione da rifiuti organici,

prodotti da varie fonti, contribuisce già e contribuirà ulteriormente al raggiungimento di questi obiettivi.
La DA è costituita da una serie di processi biologici in cui i microrganismi digeriscono materiale vegetale e/o animale in contenitori sigillati, producendo biogas, una miscela di metano, anidride carbonica e altri gas. Il biogas generato può essere utilizzato come fonte di energia, sia tramite combustione locale, solitamente tramite l'uso di motori a cogenerazione, *Combined Heat and Power* (CHP), sia in digestori su larga scala con impianto di *upgrading* del biogas in biometano; anche il digestato, ricco di sostanza organica e nutrienti come azoto, fosfati e potassio, è considerato di per sé un prodotto finale utile. La Figura 1 mostra il quadro generale del processo tipico.

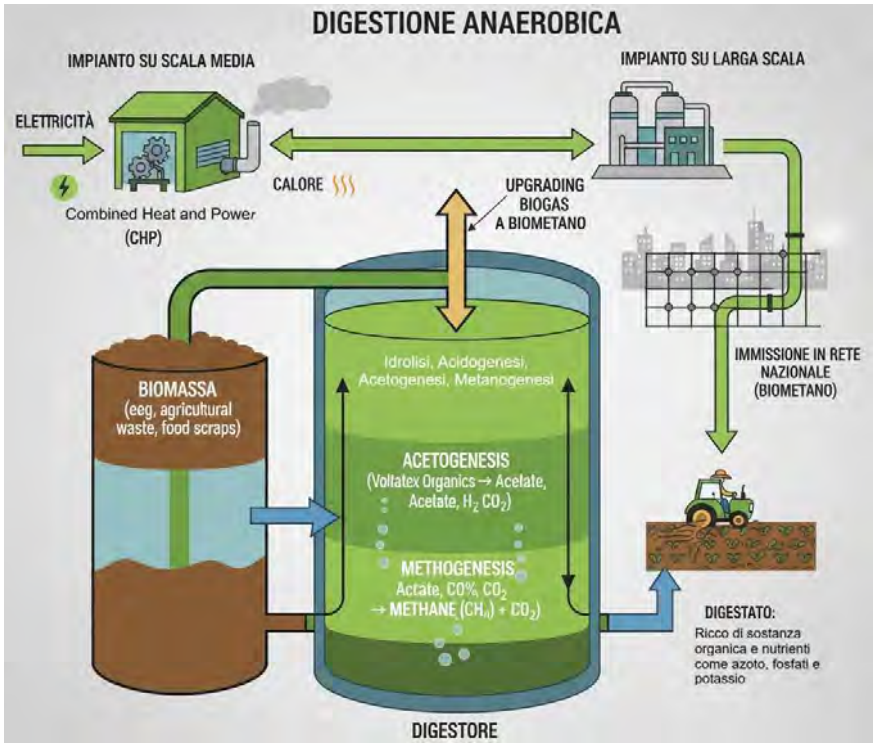


Figura 1. Il processo di digestione anaerobica (immagine creata con Gemini, assistente AI di Google).

Nonostante la diffusione degli impianti a biogas, la sicurezza di tale fornitura energetica non è stata finora affrontata in modo specifico e mancano standard di sicurezza dedicati al controllo dei pericoli e dei rischi associati alla produzione e all'*upgrading* del biogas. Recenti studi in letteratura, volti ad esplorare le problematiche di sicurezza del biogas, suggeriscono la necessità di standard internazionali specifici e armonizzati. Diversi autori hanno sottolineato i progressi che la sicurezza di processo nel settore del biogas potrebbe raggiungere grazie alla condivisione di esperienze, *feedback* e risultati delle indagini sugli incidenti [2]; ciò potrebbe anche contribuire a migliorare la cultura della sicurezza del settore, attualmente limitata. Studi pubblicati sul controllo dei processi di DA spesso

riconoscono l'esistenza di potenziali pericoli dovuti a sostanze e processi pericolosi, ma questi non vengono sempre considerati in termini di salute e sicurezza occupazionale; più spesso, infatti, i pericoli vengono presentati nel contesto del rischio ambientale, dell'efficienza del controllo di processo o del loro potenziale impatto economico sui costi di gestione dell'impianto [3-7]. In questa revisione, l'attenzione si è concentrata sul potenziale di esposizione dei lavoratori ai pericoli derivanti dai siti di DA, con particolare interesse al rischio di infortuni da apparecchiature a pressione dovuti a guasti nei controlli meccanici e di processo, con conseguenze addizionali sulla salute occupazionale associate al rischio da esposizione a sostanze chimiche pericolose o microrganismi nocivi.

2. Metodi

L'analisi è stata effettuata attraverso una ricerca sistematica della letteratura attraverso la consultazione delle banche dati PubMed, Web of Science, Scopus, utilizzando parole chiave quali "*biogas explosion*"*, "*precursor*"*, "*control system indicator*"*, "*process management*", "*anaerobic digestion*" "*wastewater*"* e operatori booleani. Sono state identificate pubblicazioni relative ai fattori che contribuiscono a infortuni, decessi o malattie tra i lavoratori degli impianti di DA a seguito di operazioni non sicure. Sono stati inoltre presi in considerazione studi che consideravano interventi di sicurezza nel controllo dei processi per prevenire l'esposizione nociva dei dipendenti. Per rispondere in modo specifico al quesito oggetto di indagine e guidare il processo di ricerca, sono stati definiti i diversi criteri di esclusione come area tematica (per esempio sono stati esclusi studi che affrontavano il tema della formazione di schiuma solo in termini di efficienza del processo di DA e non sotto il profilo della sicurezza), tipo di documento, lingua (sono stati presi esclusi studi che non fossero in lingua inglese o italiana) e periodo temporale (sono stati esaminati articoli pubblicati tra il 2005 e il 2025) ha ridotto l'iniziale selezione di 45 articoli. Inoltre, una valutazione qualitativa degli *abstract* e dei testi completi ha portato a una selezione finale di 22 articoli. Sono stati utilizzati, infine, moduli di estrazione dati per raccogliere informazioni tecniche in modo coerente da ogni articolo revisionato, utilizzando revisori duplicati, includendo una valutazione della qualità.

3. Risultati e discussione

I risultati dello studio sono stati strutturati classificando i pericoli in quattro sottocategorie, secondo l'elenco in seguito sintetizzato.

1) Accumulo di pressione. Le componenti del biogas, tra cui CH_4, H_2, CO_2, H_2S, così come una miscela di questi, possono accumularsi e sovra pressurizzare i contenitori del digestore, le tubazioni e altre strutture di contenimento del gas. Ciò può causare guasti al contenimento con perdite, incendi ed esplosioni. L'accumulo di pressione può essere aggravato da eventi precursori o guasti tecnici, come l'ostruzione della

valvola di rilascio della pressione o delle tubazioni. Uno scarso controllo del processo di DA che causa eventi di schiuma contribuisce a questi rischi [8-11].
2) Atmosfere esplosive. Condizioni a rischio esplosione possono verificarsi con il rilascio incontrollato, lo stoccaggio inappropriato o la manipolazione impropria di biogas infiammabile, che comporta gravi rischi di incendio, esplosione, tossicità e asfissia. Il rilascio di grandi quantità di biogas dall'impianto di DA e il metano (CH_4) che fuoriesce è spesso relazionato all'impatto ambientale o alla perdita economica del biogas. Tuttavia, se non monitorate, le perdite di biogas presentano anche un rischio di esplosione o incendio improvviso [12-14]. Ruolo fondamentale ed insostituibile nella sicurezza attiva è svolto dagli arrestatori di fiamma, che consiste nel prevenire che un ritorno di fiamma (*flashback*), causato ad esempio da una torcia o da un CHP, si propaghi all'interno delle linee di trasporto del gas, arrivando a causare l'esplosione dei digestori o dei gasometri.
3) Altri guasti tecnici. Guasti meccanici o deterioramenti di pompe, valvole, meccanismi di miscelazione e altri componenti critici richiedono frequenti interventi di manutenzione. Esempi di tali guasti includono la corrosione delle apparecchiature metalliche causata da H_2S, malfunzionamenti delle apparecchiature causati da residui schiumogeni o prodotti di combustione dei silossani depositati all'interno dei macchinari del cogeneratore, con conseguente aumento dell'usura. Quando si verificano questi guasti, le attività di manutenzione possono esporre i dipendenti a rischi chimici o microbiologici (punto 4.). Tali guasti sono anche collegati a scarsi livelli di affidabilità e controllo del processo [15-18].
4) Esposizione a sostanze chimiche pericolose o microrganismi nocivi. La esposizione a composti tossici provenienti dalle materie prime, in particolare negli impianti di trattamento delle acque reflue, o dai processi di DA può causare problemi di salute, asfissia e morte. L'idrogeno solforato (H_2S), ad esempio, la cui concentrazione nel biogas varia, in base alla matrice organica, da poche centinaia fino a diverse migliaia di parti per milione (ppm), è un potente tossico per le vie respiratorie e neurologiche, che agisce come irritante e asfissiante polmonare. I valori limite di esposizione fissati dall'ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) sono pari a 1 e 5 ppm, rispettivamente per il TLV-TWA (*Threshold Limit Value – Time-Weighted Average*) e il TLV-STEL (*Threshold Limit Value – Short-Term Exposure Limit*), riferiti il primo a una concentrazione media di H_2S su una giornata lavorativa di 8 ore e il secondo alla concentrazione a cui un lavoratore può essere esposto per un breve periodo di tempo (generalmente 15 minuti) senza subire effetti nocivi. La maggior parte degli studi sulle unità di digestione anaerobica si è concentrata sul ruolo dell'H_2S come inibitore del processo metanogenico o sui suoi effetti corrosivi sulle tubazioni metalliche e sui motori di cogenerazione. I composti organici volatili (COV) possono anch'essi causare irritazione alle vie respiratorie, alla gola, al naso e agli occhi, oltre a mal di testa, vertigini e nausea. L'esposizione a lungo termine ai COV può compromettere le funzioni del sistema nervoso centrale, causare danni agli organi e alcuni COV possono causare il cancro [19]. La Tabella 1 riporta un quadro riassuntivo

dei principali agenti cancerogeni volatili negli ambienti di lavoro, la relativa classificazione di cancerogenicità attribuita dall'UE e/o dalla IARC e alcune lavorazioni in cui è possibile l'esposizione.

COV	Classificazione	Esposizione occupazionale
Benzene	UE: Carc. Cat.1A IARC: Gruppo 1	Lavorazioni che implicano combustioni in generale, raffinerie, solvente per la produzione di farmaci, cosmetici, coloranti, etc.
Cloruro di vinile	UE: Carc. Cat. 1A IARC: Gruppo 1	Produzione di materie plastiche (PVC)
1,3 Butadiene	UE: Carc. Cat. 1A IARC: Gruppo 1	Raffinazione petrolifera, produzione di gomma
Bis-clorometiletere	UE: Carc. Cat. 1A IARC: Gruppo 1	Intermedio per la produzione di materie plastiche e resine
Ossido di etilene	UE: Carc. Cat. 1B IARC: Gruppo 1	Intermedio per la produzione di tensioattivi, sterilizzazione, disinfezione
Formaldeide	UE: Carc. Cat. 1B IARC: Gruppo 1	Produzione di resine, collanti, mobili, conservazione di campioni di anatomia patologica
Tricloroetilene	UE: Carc. Cat. 1B IARC: Gruppo 1	Sgrassaggio metalli, lavaggio a secco
Cloruro di metilene	UE: Carc. Cat. 2 IARC: Gruppo 2A	Utilizzo come solvente

Tabella 1. Alcuni dei principali COV cancerogeni negli ambienti di lavoro.

I COV microbici sono spesso collegati a problemi di odore piuttosto che a un impatto negativo sulla salute respiratoria [20, 21]. Infine, la esposizione a diversi microrganismi presenti nelle materie prime, sia prima della lavorazione (stoccaggio e manipolazione) sia durante il processo di DA stesso, può essere pericolosa per la salute umana. Alcuni di questi microrganismi sono patogeni e causano infezioni, infiammazioni o tossicità. L'esposizione può essere dovuta al contatto diretto o all'inalazione. Alcuni microrganismi causano malattie allergiche, in particolare le spore fungine o batteriche trasportate dall'aria. Queste sono spesso presenti in gran numero quando vengono manipolate materie prime organiche in decomposizione [22-25].

Tendenze, cause degli incidenti, scenari e conseguenze sono stati analizzati anche utilizzando l'analisi delle corrispondenze multiple per ottenere correlazioni tra cause degli incidenti e scenari. Da diverse fonti bibliografiche sono stati identificati indicatori di processo relativi alla sicurezza e alla valutazione di possibili azioni di mitigazione per il settore della digestione anaerobica, sintetizzati in Tabella 2, che fornisce alcuni esempi pertinenti, con la descrizione di una varietà di indicatori di eventi di rilascio/esplosione/combustione di biogas.

Indicatori relativi alla sicurezza del processo	Azioni di mitigazione	Fonte
Lo studio su un totale di 169 incidenti includeva l'esposizione al gas H_2S dovuta all'apertura dei portelli dei serbatoi, nonché una esplosione in un impianto di trattamento delle acque reflue con la mancanza di sistemi di monitoraggio del biogas.	Quasi un incidente su cinque avrebbe potuto essere controllato con interventi di base. La mancanza di sistemi di controllo è in contrasto con quelli richiesti nel settore petrolifero e del gas, dove i sensori di gas infiammabili e tossici sono installati in conformità alle norme.	[2]
I gas combustibili e tossici presentano rischi di incendio ed esplosione, in particolare quando errori di progettazione aumentano il rischio di sovra pressurizzazione, accumulo di biogas e potenziale accensione accidentale.	Il monitoraggio della pressione all'interno dei serbatoi di stoccaggio del biogas può essere collegato a valvole di rilascio della sovrapressione per controllare il sistema. Il mantenimento di una piccola sovrapressione impedisce l'ingresso di aria, riducendo il rischio di combustione e può anche prevenire la sovrapressione. Le torce di emergenza possono ridurre il rischio di sovrapressione nel gasometro, ma richiedono un funzionamento sicuro, affidabile e idealmente automatizzato.	[26]
La produzione di biogas mediante digestione anaerobica in una vasca di raccolta delle acque piovane e la sua infiltrazione e accumulo in un edificio tecnico attraverso un raccordo di tubazione sono causa dell'esplosione dell'edificio stesso.	L'aggiornamento della classificazione ATEX delle sale di controllo tecnico potrebbe prevenire future esplosioni di biogas. Inoltre, una migliore ventilazione nei locali di servizio sotterranei ridurrebbe il rischio di accumulo di biogas, nel caso specifico, l'adozione di un tombino grigliato anziché di uno sigillato avrebbe impedito la formazione anaerobica di biogas, consentendone al contempo la diluizione e la dispersione in atmosfera.	[27]
Dai risultati dello studio, l'85% dei 964 impianti esaminati nel Regno Unito e in Germania presentava	Sono stati descritti metodi di monitoraggio del processo, inclusi sensori a infrarossi per il CH_4. Le	[28]

perdite di biogas. Il 25% è stato segnalato come superiore a un m^3/h di CH_4, con problemi di sicurezza e perdite finanziarie.	ispezioni dovrebbero includere tutti i serbatoi di stoccaggio, i cogeneratori, gli *scrubber*, le membrane del tetto del digestore, le tubazioni e le flange.	

Tabella 2. Esempi di possibili azioni di mitigazione da mettere in atto per una migliore e tempestiva gestione della sicurezza e salute occupazionale negli impianti di DA.

Nel complesso, nel corso di questa revisione, diversi studi hanno riflettuto sull'evoluzione delle tecnologie di DA e su come queste potrebbero modificare i futuri rischi per la salute e la sicurezza per i dipendenti. I rapidi progressi nelle tecnologie di monitoraggio, tra cui l'uso di sensori in tempo reale e controlli *software* basati sull'intelligenza artificiale (IA), possono contribuire al rapido rilevamento di guasti alle apparecchiature e all'attivazione tempestiva di interventi di controllo, migliorando l'affidabilità e il funzionamento sicuro degli impianti di digestione anaerobica. Tecnologie migliorate per la lavorazione delle materie prime possono, altresì, contribuire a ridurre alcuni rischi di esposizione. Metodi di pretrattamento avanzati delle acque reflue possono fornire ai microrganismi una maggiore accessibilità alle materie prime, migliorando l'efficienza del processo di metabolismo e digestione microbica. Questo non solo promuove un'efficiente produzione di biogas, ma può anche limitare l'accumulo di gas nocivi come l'H_2S. Diversi metodi di pretrattamento includono ultrasuoni, riscaldamento e tecnologie di cavitazione a microbolle, che migliorano l'omogeneizzazione delle materie prime rispetto ai tradizionali metodi di macerazione e miscelazione. C'è un crescente interesse nella generazione di gas H_2 come fonte di energia verde, e questo richiederà un'idrolisi più completa delle materie prime per migliorare l'efficienza del processo. Metodi di pretrattamento come la cottura a microonde, la lavorazione enzimatica, il pretrattamento chimico, la macinazione meccanica, l'utilizzo dell'O_3 e il trattamento termico delle materie prime sono opzioni che non vengono sempre utilizzate nei tradizionali impianti di digestione anaerobica che generano CH_2. La produzione di biogas H_2 comporta, infine, rischi di combustione ed esplosioni energetiche e dannose, con caratteristiche energetiche di innesco diverse da quelle del metano.

Sono state presentate linee guida pubblicate da governi, industrie e *peer-reviewed* in merito ai requisiti tecnici per la progettazione, la messa in servizio, il funzionamento e la manutenzione in sicurezza degli impianti di DA. Queste pubblicazioni descrivevano anche metodi di valutazione del rischio, controllo/monitoraggio del processo, influenza delle materie prime, gestione sicura del biogas, affidabilità e prestazioni delle apparecchiature dell'impianto (inclusa la cogenerazione) e la necessità di una manutenzione continua del sito.

L'elevato numero di rapporti pubblicati sulle emissioni di biogas suggerisce, infatti, che gli impianti di DA subiscono ancora eventi critici per la sicurezza simili a quelli descritti negli anni '90. Pubblicazioni suggeriscono che controlli più frequenti per le emissioni di biogas potrebbero contribuire a prevenire perdite che altrimenti

porterebbero a incidenti gravi. È evidente, dunque, la necessità di implementare e migliorare le pratiche di controllo, ottenuto grazie all'introduzione di sensori di monitoraggio continuo e dispositivi di sicurezza automatizzati. I sensori possono essere utilizzati per monitorare il pH, il potenziale di riduzione dell'ossigeno, la qualità del gas, la pressione del gas, i gas nocivi e la temperatura e sono stati integrati nei processi di controllo, avvisando gli operatori dell'impianto di eventuali emissioni di gas fuggitive e consentendo interventi tempestivi per controllarle, in particolare nelle cupole del digestore, in prossimità dei collegamenti delle tubazioni e nei motori di cogenerazione. Esaminando le segnalazioni di incidenti, diversi errori di manutenzione sembrano essere associati a saldature o ad altre operazioni di manutenzione eseguite durante il funzionamento dell'impianto e senza alcuna misura per evitare l'innesco di miscele esplosive. Analogamente, per una serie di eventi in cui è stata segnalata l'inalazione di acido solfidrico presente nel gas grezzo, le cause possono essere individuate in errori degli operatori (coperchi lasciati aperti, accesso a spazi confinati senza alcun dispositivo di protezione o precedente valutazione della presenza di gas infiammabile/tossico). Questo tipo di incidenti è ben noto, ad esempio, nell'industria chimica, dove vengono emanati protocolli di sicurezza per consentire la manutenzione e, in particolare, le operazioni di saldatura e l'accesso a spazi confinati. Le prove esaminate indicano che la cultura della sicurezza nei processi di DA non è sufficientemente coerente o rigorosa per controllare appieno i pericoli in questo settore: più in generale, per prevenire tali incidenti è necessario un livello più elevato di formazione degli operatori e di consapevolezza dei pericoli e dei rischi da parte della direzione dell'impianto. Il numero di incidenti segnalati a livello internazionale indica, infatti, che i dipendenti di alcuni siti di DA potrebbero ancora non avere un accesso sufficiente alle informazioni sui seguenti aspetti della gestione della sicurezza degli impianti:

a) buone pratiche nell'installazione e nella messa in servizio dell’impianto, inclusa la progettazione e la scelta dei materiali;

b) identificazione corretta dei principali pericoli;

c) esecuzione di una valutazione dei rischi adeguata e sufficiente dell'intero processo di DA;

d) applicazione di controlli di processo e metodi di monitoraggio appropriati per garantire l'efficacia dei controlli;

e) gestione della qualità delle materie prime e del loro stoccaggio, movimentazione, pretrattamento e velocità di carico;

f) controllo della produzione e dello stoccaggio del biogas;

g) monitoraggio dell'affidabilità e delle prestazioni delle apparecchiature dell'impianto (inclusa la cogenerazione) e della manutenzione continua del sito;

h) corretta valutazione dell'esposizione al biogas e ai rischi biologici come i microrganismi patogeni per limitare i rischi per la salute.

È necessario, dunque, migliorare la condivisione delle informazioni sugli incidenti e sui *near misses* negli impianti di DA. In tutta Europa, i documenti pubblicati suggeriscono che queste informazioni potrebbero essere acquisite da diversi organismi di regolamentazione, ma poiché alcuni incidenti sono meno comuni, sarebbe utile condividere queste conoscenze per assistere il settore e i suoi enti di regolamentazione.
In sintesi, i risultati ottenuti dall'analisi di linee guida e documenti sottoposti a revisione paritaria confermano che la DA produce miscele complesse di biogas, che richiedono controlli ingegneristici efficaci e procedure sicure per la movimentazione e lo stoccaggio. Le miscele di biogas hanno causato gravi esplosioni in Europa e altrove negli ultimi decenni. Il mancato contenimento e utilizzo sicuro del biogas negli impianti di DA può provocare incendi, esplosioni e rilascio di gas asfissianti/tossici, con conseguenze per la salute e sicurezza dei lavoratori addetti. Sulla base dei suddetti risultati, appare necessario implementare i sistemi di controllo di sicurezza, integrati e automatizzati, per il controllo dell'intero processo di DA e, altresì, monitorare i pericoli comuni di processo, come pressioni, temperature e concentrazioni, per agevolare le azioni di prevenzione dei rischi; e, infine, fornire adeguata formazione ai dipendenti su come riconoscere, segnalare e controllare i pericoli di inquinamento atmosferico. L'industria petrolchimica, che gestisce pericoli simili da più tempo, potrebbe fornire preziosi insegnamenti sulle misure preventive.

4. Conclusioni

Diversi fattori di rischio sono stati descritti negli articoli sottoposti a revisione paritaria, alcuni dei quali fornivano descrizioni dettagliate delle circostanze di incidenti, in cui situazioni comuni agiscono da precursori di eventi pericolosi che possono potenzialmente arrecare danno alla salute e sicurezza del personale nei siti di DA. La lezione appresa dall'analisi degli incidenti passati nella produzione e nell'*upgrading* del biogas è in qualche modo limitata dalla scarsità di dettagli disponibili sulla sequenza e sulle cause dell'incidente. Il presente contributo è uno dei pochi studi ad affrontare il tema degli incidenti e della sicurezza nella produzione di biogas e i dati disponibili in letteratura sono pochi. Pertanto, anche a causa della specificità degli impianti di biogas, la creazione di un distinto sistema di segnalazione degli incidenti sarebbe di fondamentale importanza per raccogliere dati utili a migliorare la sicurezza e la progettazione di barriere di sicurezza efficaci negli impianti di biogas. Si evidenzia, da un lato, che la carenza di norme e regolamenti tecnici internazionali specifici è una delle prime cause alla base dell'elevato numero di incidenti registrati nella produzione e nell'*upgrading* del biogas; dall'altro, che l'assenza di procedure di sicurezza e degli standard richiesti per la formazione degli operatori, nonché la scarsa consapevolezza e la bassa percezione del rischio da parte dei gestori degli impianti a biogas, rappresentano un'ulteriore importante causa alla base degli incidenti registrati. Bioprocessi come la produzione di biogas sono spesso erroneamente percepiti come più sicuri e a minore impatto rispetto ai processi

chimici convenzionali. Tuttavia, i risultati della presente indagine rappresentano un campanello d'allarme per quanto riguarda il rischio di incidenti rilevanti nel settore del biogas e hanno confermato la necessità di migliorare la cultura della sicurezza e la consapevolezza dei rischi in questo settore, anche attraverso lo sviluppo e l'adozione di standard di sicurezza appropriati e specifici. Come considerazione finale, l'identificazione e l'applicazione di soluzioni tecnologiche intrinsecamente più sicure è ancora ampiamente inesplorata, sebbene rappresenti una strada fondamentale per migliorare la sicurezza del comparto della produzione del biogas.

Bibliografia

[1] Pahunang RR, Buonerba A, Senatore V, Oliva G, Ouda M, Zarra T, Muñoz R, Puig S, Ballesteros FC Jr, Li CW, Hasan SW, Belgiorno V, Naddeo V. Advances in technological control of greenhouse gas emissions from wastewater in the context of circular economy. *Sci Total Environ*. 2021; 792:148479.

[2] Moreno VC, Papasidero S, Scarponi GE, Guglielmi D, Cozzani V. Analysis of accidents in biogas production and upgrading. *Renew Energy.* 2016; 96:1127-1134

[3] Paolini V, Petracchini F, Segreto M, Tomassetti L, Naja N, Cecinato A. Environmental impact of biogas: a short review of current knowledge. *J Environ Sci Health A*. 2018; 53(10):899-906.

[4] Nguyen LN, Johir MA, Commault A, et al. Impacts of mixing on foaming, methane production, stratification and microbial community in full-scale anaerobic co-digestion process. *Bioresour Technol*. 2019; 281:226-233.

[5] Vu HP, Nguyen LN, Wang Q, et al. Hydrogen sulphide management in anaerobic digestion: a critical review on input control, process regulation, and post-treatment. *Bioresour Technol*. 2022; 346:126634.

[6] Nyamukamba P, Mukumba P, Chikukwa ES, Makaka G. Hydrogen Sulphide removal from biogas: a review of the upgrading techniques and mechanisms involved. *Intern J Renew Energy Res*. 2022; 12(1):557-568.

[7] Yang P, Peng Y, Liu H, et al. Multi-scale analysis of the foaming mechanism in anaerobic digestion of food waste: from physicochemical parameter, microbial community to metabolite response. *Water Res*. 2022; 218:118482.

[8] Reinelt T, Liebetrau J. Monitoring and mitigation of methane emissions from pressure relief valves of a biogas plant. *Chem Eng Technol*. 2019; 43(1):7-18.

[9] Boe K, Kougias PG, Pacheco F, O-Thong S, Angelidaki I. Effect of substrates and intermediate compounds on foaming in manure digestion systems. *Water Sci Technol.* 2012; 66(10):2146-2154.

[10] Alfaro N, Cano R, Fdz-Polanco F. Effect of thermal hydrolysis and ultrasounds pretreatments on foaming in anaerobic digesters. *Bioresour Technol*. 2014; 170:477-482.

[11] Reinelt T, McCabe BK, Hill A, Harris P, Baillie C, Liebetrau J. Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities. *Waste Manag*. 2022; 137:294-303.

[12] Salvi O, Delsinne S, Evanno S. Biogas-a European perspective on safety and regulation. *J Risk Anal Crisis Resp.* 2011; 1(1):1-20.
[13] Salvi O, Chaubet C, Evanno S. Biogas: opportunities to improve safety and safety regulation. *Trans VSB Tech Univ Ostrava Saf Eng Ser.* 2012; 7(2):36-43.
[14] Chen Q, Wu W, Qi D, Ding Y, Zhao Z. Review on microaeration-based anaerobic digestion: state of the art, challenges, and prospectives. *Sci Total Environ*. 2020; 710:136388.
[15] Ganidi N, Tyrrel S, Cartmell E. Anaerobic digestion foaming causes – a review. *Bioresour Technol*. 2009; 100:5546-5554.
[16] Jenkins A, Gornall L, Cripps H. Lessons for safe design and operation of anaerobic digesters. *Loss Prev Bull Sympos Series 158*. 2013; 229:514-519.
[17] Schröder V, Schalau B, Molnarne M. Explosion protection in biogas and hybrid power plants. *Procedia Eng.* 2014; 84:259-272.
[18] Tayou LN, Lauri R, Incocciati E, et al. Acidogenic fermentation of food waste and sewage sludge mixture: effect of operating parameters on process performance and safety aspects. *Process Safety Environ Protect*. 2022; 163:158-166.
[19] Zhou X, Zhou X, Wang C, Zhou H. Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. *Chemosphere*. 2023; 313: 137489.
[20] Vu HP, Nguyen LN, Wang Q, et al. Hydrogen sulphide management in anaerobic digestion: a critical review on input control, process regulation, and post-treatment. *Bioresour Technol*. 2022; 346:126634.
[21] Zheng G, Liu J, Shao Z, Chen T. Emission characteristics and health risk assessment of VOCs from a food waste anaerobic digestion plant: a case study of Suzhou, China. *Environ Pollut.* 2020; 257:113546.
[22] Fröschle B, Heiermann M, Lebuhn M, Messelhäusser U, Plöchl M. Hygiene and sanitation in biogas plants. *Biogas Sci Technol.* 2015; 151:63-99.
[23] Giorni P, Pietri A, Bertuzzi T, et al. Fate of mycotoxins and related fungi in the anaerobic digestion process. *Bioresour Technol.* 2018; 265:554-557.
[24] M'bareche H, Veillette M, Dubuis MÈ, et al. Fungal bioaerosols in biomethanization facilities. *J Air Waste Manage Assoc*. 2018;68(11): 1198-1210.
[25] Pascale E, Franchitti E, Caredda C, et al. Bioaerosol emissions during organic waste treatment for biopolymer production: a case study. *Atmosphere.* 2021;12(8):1069.
[26] Pietrangeli R, Lauri PB, Bragatto PA. Safe operation of biogas plants in Italy. *Chem Eng Trans*. 2013; 32:199-204.
[27] Boscolo M, Bregant L, Miani S, Padoano E, Piller M. An enquiry into the causes of an explosion accident occurred in a biogas plant. *Process Safety Prog.* 2020; 39(1):e12063.
[28] Beswick A, Evans G, Crook B, et al. Process safety at anaerobic digestion sites and its workplace impact: A rapid review. *Process Saf Prog.* 2025; 44(3): 359-367.

Strategie innovative di prevenzione e mitigazione dei rischi derivanti dalle polveri combustibili nell'industria alimentare

M.P. Gatto[1], N. L'Episcopo[2], E. Spagnuolo[1], M.M. La Veglia[3]

[1]Inail - Uot di Avellino
[2]Inail - Uot di Catania
[3]Direzione Regionale VVF Campania

Sommario
Sostanze alimentari comuni quali farine, zucchero, spezie, quando trattate in processi di macinazione, trasporto, separazione, essiccamento, possono formare atmosfere esplosive. Efficaci strategie di gestione sono essenziali per garantire un ambiente di lavoro sano e sicuro e prevenire gli incidenti. Scopo dello studio è stato quello di fornire un approfondimento sulla gestione del rischio esplosioni da polveri alimentari infiammabili e di valutare le potenzialità delle tecnologie emergenti nello sviluppo di strategie di prevenzione e protezione efficaci.
Attraverso una revisione sistematica della letteratura del decennio 2016-2025, vengono presentate le potenzialità legate all'impiego di tecnologie avanzate, i limiti del loro utilizzo e le tendenze per gli sviluppi futuri in materia di prevenzione e mitigazione del rischio incendi ed esplosioni di polveri alimentari combustibili. Strategie emergenti, quali l'utilizzo di precipitatori elettrostatici (ESP), filtri dell'aria ad alta efficienza (HEPA) e sistemi autopulenti di raccolta delle polveri, mostrano promettenti risultati per la gestione futura del rischio polveri esplosive. Altro approccio innovativo prevede l'integrazione della nanotecnologia; l'applicazione di nanofibre nella filtrazione dell'aria mostra, infatti, efficacia nel catturare ed eliminare le particelle di polveri alimentari, migliorando la qualità dell'aria e mitigando i rischi. Svariate operazioni di lavorazione alimentare generano polvere, creando le condizioni necessarie per una deflagrazione. L'applicazione della robotica e dell'automazione, nonché l'utilizzo della nanotecnologia, possono contribuire alla riduzione delle concentrazioni di polveri alimentari negli impianti.

1. Introduzione

Le polveri alimentari presentano un pericolo d'esplosione; la possibilità di formare atmosfere esplosive e la sensibilità a fonti di accensione è tanto maggiore quanto è minore la grandezza media delle particelle (granulometria). Il cosiddetto "pentagono dell'esplosione" rappresenta una sorta di evoluzione del triangolo del fuoco utilizzato per illustrare le problematiche di prevenzione incendi in presenza di polveri infiammabili (figura 1). Una esplosione di polvere combustibile avviene se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni [1]:

1. *Presenza di polvere combustibile*: tali materiali, ridotti in polvere a causa dei processi industriali subiti, con frazioni granulometriche non trascurabili con diametri inferiori a circa 500 µm, possiedono la capacità di bruciare in aria;
2. *Presenza di un comburente nell'ambiente*: generalmente il comburente presente negli impianti di lavorazione polveri è l'ossigeno dell'aria, la concentrazione d'ossigeno inferiore al 7% non alimenta l'esplosione;
3. *La polvere deve essere confinata*: la polvere deve essere contenuta entro un volume confinato, ad esempio una attrezzatura industriale. Il confinamento permette alle polveri di accrescere la loro concentrazione e, al contempo, ne permette il sostentamento per tempi lunghi;
4. *Particelle in sospensione*: le polveri manifesteranno la tendenza a rimanere in sospensione a causa della presenza di velocita residue di circolazione all'interno dello spazio confinato. In particolare, il tempo di persistenza in sospensione risulterà strettamente collegato alla granulometria; polveri con densità in volume di circa 2 g/cm^3 possiedono una velocita di sedimentazione pari a 1 m/s se di granulometria pari a 150 µm; tale velocita si riduce di 100 volte (1 cm/s) per le frazioni granulometriche inferiore a 10 µm;
5. *Presenza di una sorgente di accensione efficace*: naturalmente l'innesco della nube di polveri avviene attraverso una sorgente di accensione che possieda un'energia sufficiente all'innesco.



Figura 1. Le cinque condizioni che caratterizzano le esplosioni da polveri.

Il potenziale di esplosione di polveri nell'industria alimentare è particolarmente elevato a causa dei grandi volumi che vengono manipolati e lavorati; le polveri alimentari possono accumularsi su superfici e attrezzature, creando un pericolo se la nube si disperde nell'aria [2]. Si riporta in Tabella 1 un elenco (non esaustivo) di alcune polveri alimentari combustibili con i relativi parametri di St, classe di esplodibilità, K_{st}, indice di esplosività, e P_{max}, massima pressione di esplosione. I valori riportati

sono indicativi e dipendono fortemente da caratteristiche quali la dimensione delle particelle, l'umidità e la concentrazione.

Polvere alimentare	**St**	K_{st} **(bar×m/s)**	P_{max} **(bar)**
Farina di Grano	St 1	80 - 130	7 - 9
Zucchero (a velo)	St 1	130 - 150	7 - 9
Amido di Mais	St 1	150 - 200	7 - 10
Cacao in polvere	St 1	100 - 150	6 - 8
Latte in polvere	St 1	80 - 130	6 - 8
Farina di Mais	St 1	100 - 150	7 - 9
Caffè (polvere)	St 1	70 - 100	6 - 8
Spezie (varie)	St 1 - St 2	100 - 250	7 - 10
Glutine	St 1 - St 2	100 - 250	7 - 10

Tabella 1. Classe di esplodibilità (St), indice di esplosività (K_{st}) e massima pressione di esplosione (P_{max}) di polveri alimentari.

Le esplosioni di polveri possono causare danni significativi alle attrezzature e agli impianti, oltre a rappresentare un grave rischio per la sicurezza dei lavoratori e gli incendi che ne derivano possono essere difficili da estinguere, potendo diffondersi rapidamente all'interno di un impianto [3, 4]. Questo studio si propone di discutere il rischio occupazionale dovuto alla presenza di polveri nel settore alimentare, la cui manipolazione può generare atmosfere esplosive, soprattutto durante le operazioni di trasporto e confezionamento, illustrando le misure attualmente messe in atto per gestirle, compreso il controllo della pressione all'interno dei silos di stoccaggio polveri, e suggerendo misure innovative che potrebbero essere ulteriormente adottate per garantirne un'aggiuntiva riduzione della loro concentrazione negli impianti. Un profondo impegno per il miglioramento della sicurezza occupazionale, della conformità normativa e operativa nei processi delle produzioni alimentari è la motivazione di questo studio. Fornendo una migliore comprensione della pericolosità delle polveri organiche alimentari e valutando efficaci strategie di mitigazione, gli autori intendono offrire spunti preziosi a professionisti del settore, decisori politici e ricercatori. È importante chiarire che questo studio non presenta risultati di ricerca originali o nuove analisi statistiche, ma piuttosto sintetizza e interpreta le conoscenze esistenti e le migliori pratiche del settore, al fine di discutere le tecniche migliori per la gestione in sicurezza delle polveri alimentari. Traguardo dello studio ivi presentato risiede, dunque, nell'imperativo di mitigare i rischi per la sicurezza, minimizzando allo stesso tempo l'impatto per l'esposizione occupazionale, di soddisfare gli standard normativi in evoluzione e di ottimizzare le pratiche industriali.

2. La gestione della pressione all'interno dei silos contenenti polveri alimentari



Figura 2. Esempio di silos per l'immagazzinamento di prodotti dell'industria agroalimentare (farine di frumento, grano, cacao, zucchero e similari). Immagine Inail, ID documento 446VWSDZDHTQ-225-1284.

La gestione della pressione nei silos contenenti polveri alimentari (figura 2) rappresenta un aspetto critico per la sicurezza strutturale e l'affidabilità operativa degli impianti di stoccaggio di materiali granulari e polverulenti. La pressione nei silos, in ottica ATEX, è un parametro critico, date le suddette capacità di formazione di atmosfere esplosive delle polveri alimentari. La progettazione deve considerare i parametri di rischio come la P_{max} e il K_{st} per dimensionare i sistemi di contenimento (pannelli di sfogo), e requisiti associati alla prevenzione (inertizzazione, controllo cariche elettrostatiche) e alla protezione, classificando l'area come Zona 20, area all'interno del silos, dove la polvere è presente in concentrazioni elevate in modo continuo o frequente e Zone 21 o 22, aree circostanti il silo (es. zona di carico/scarico), dove la polvere può presentarsi occasionalmente o in modo non frequente, e rispettando la Direttiva ATEX 99/92/CE [5]. Sistemi di controllo e gestione della pressione nei silos destinati allo stoccaggio di polveri alimentari rivestono un ruolo fondamentale nella prevenzione dei guasti strutturali e nella mitigazione del rischio di esplosione di polveri, in quanto tali impianti sono soggetti a significative variazioni di pressione durante le fasi di carico pneumatico, stoccaggio e scarico del prodotto. La sovrappressione generata dall'immissione di aria e materiale, così come la depressione indotta dallo svuotamento del silo o da condizioni termiche variabili, deve essere mantenuta entro limiti di sicurezza mediante l'impiego di sistemi di sfiato e compensazione opportunamente dimensionati [6]. Le tecnologie attualmente adottate comprendono sistemi di ventilazione passiva e attiva, valvole di sovra- e sottopressione, dispositivi di sfogo per esplosioni di polveri e sensori intelligenti per

il monitoraggio continuo delle condizioni interne. In particolare, le valvole di sfiato o valvola di controllo pressione, detta PRV, dall'acronimo inglese *Pressure Relief Valve* [7], calibrate consentono di limitare le sovrapressioni indotte durante le fasi di riempimento e svuotamento, riducendo il rischio di instabilità locale delle pareti del silo, mentre i pannelli di sfogo certificati rappresentano una soluzione consolidata per la mitigazione degli effetti di eventuali esplosioni di polveri combustibili. L'integrazione di sensori di pressione e sistemi di controllo basati su PLC (Controllori Logici Programmabili) o piattaforme IoT (*Internet of Things*) permette, inoltre, una gestione predittiva del rischio, con interventi automatici o segnalazioni in tempo reale. La progettazione e successiva validazione di tali soluzioni tecnologiche deve avvenire in accordo con normative e linee guida internazionali, come l'EN 1991-4 per le azioni sui silos e serbatoi, le direttive ATEX per atmosfere esplosive e norme specifiche quali la UNI/ISO 8456 e UNI EN ISO 4126-4:2013 per la sicurezza dei sistemi di stoccaggio. L'approccio moderno alla gestione della pressione all'interno dei silos contenenti polveri alimentari combustibili si conferma, dunque, essere sempre più orientato a una combinazione di progettazione strutturale, dispositivi meccanici di protezione e sistemi avanzati di monitoraggio [8, 9], nonché, come descritto nei paragrafi 3. e 4., alla riduzione della formazione e al contenimento della dispersione delle polveri.

3. Tecniche tradizionali utilizzate nella gestione delle polveri alimentari

La possibilità di disporre di metodi efficaci per la raccolta e la gestione delle polveri alimentari è di fondamentale importanza al fine di minimizzarne gli impatti negativi. Uno dei metodi più comuni è l'uso di depolveratori, progettati per la cattura e il contenimento delle particelle di polvere generate durante le varie fasi del processo di lavorazione industriali [10]. Esistono diversi tipi di depolveratori utilizzati nell'industria alimentare, tra cui: 1) i filtri a maniche [11], che funzionano intrappolando le particelle di polvere sulla superficie dei filtri, che vengono poi puliti periodicamente per rimuovere la polvere accumulata, 2) i separatori a ciclone[12], che utilizzano la forza centrifuga per separare le particelle di polvere dall'aria, e 3) i precipitatori elettrostatici [13], che utilizzano una carica elettrica per aspirare e raccogliere le particelle di polvere. I materiali più utilizzati per le maniche filtranti in questo contesto sono il poliestere (con una temperatura massima/picco pari a 150°C), il polipropilene (110°C), il nomex (220-230°C) o il teflon (280°C+). I depolveratori, installati strategicamente in vari punti dei sistemi di lavorazione e movimentazione polveri, inclusi i punti di trasferimento dei nastri trasportatori, i silos e le macchine per il confezionamento e all'interno delle apparecchiature, svolgono un duplice scopo: catturare la polvere fuggitiva che potrebbe essere fuoriuscita dalle apparecchiature e rimuovere l'accumulo di polvere interna. Catturando efficacemente la polvere organica alimentare prima che possa accumularsi nell'aria, i depolveratori svolgono, quindi, un ruolo di primaria importanza nella salvaguardia della sicurezza e salute dei lavoratori e nella prevenzione del pericolo di esplosioni.

Altro metodo tradizionale efficace per la gestione delle polveri consiste nell'utilizzo di sistemi di trattamento dell'aria, progettati per far circolare l'aria nella zona di produzione e rimuovere le particelle di polvere. Sebbene questi sistemi possano svolgere un ruolo nel mantenere l'aria pulita e sicura nelle aree di lavorazione, è importante chiarirne lo scopo e i limiti: la loro funzione principale è quella di far circolare l'aria e di fornire un ambiente di lavoro confortevole; essi non sono destinati a rimuovere quantità significative di polvere dagli impianti di produzione bensì dovrebbero essere utilizzati principalmente per gestire le quantità accidentali di polvere che sfuggono ai sistemi di raccolta delle polveri locali.
L' EU-OSHA (Agenzia Europea per la Sicurezza e la Salute sul Lavoro) ha sviluppato linee guida per la prevenzione delle esplosioni di polveri sul luogo di lavoro, inclusi i requisiti per la valutazione dei pericoli, i piani di gestione del rischio e la formazione dei dipendenti [14]. Queste linee guida raccomandano misure quali un'adeguata ventilazione, pulizia e l'uso di apparecchiature antideflagranti per ridurre al minimo il rischio di esplosioni. È importante, infatti, considerare che quando si utilizzano sistemi di aspirazione, in particolare quelli portatili, è necessario tenere conto di specifiche considerazioni di sicurezza per evitare che diventino una fonte di innesco.

4. Tecnologie emergenti e misure aggiuntive

La tecnologia di raccolta delle polveri alimentari ha fatto notevoli progressi nel corso degli anni con l'introduzione di soluzioni innovative che hanno il potenziale di migliorare la sicurezza e di ridurre al minimo la probabilità di esplosioni di polveri.
Un esempio di soluzione innovativa è l'uso di ESPs, precipitatori elettrostatici, dispositivi di controllo dell'inquinamento atmosferico che rimuovono efficacemente il particolato fine dalle emissioni industriali e dai sistemi di purificazione dell'aria [15].
Il dispositivo funziona secondo il principio dell'attrazione elettrostatica (figura 3.), utilizzando un campo elettrico ad alta tensione per caricare le particelle sospese nell'aria durante il loro passaggio: le particelle cariche vengono, quindi, attratte da piastre o elettrodi di raccolta con carica opposta all'interno dell'ESP [16].
Questo processo cattura e rimuove efficacemente le particelle dal flusso d'aria, migliorando la qualità dell'aria e riducendo l'inquinamento.

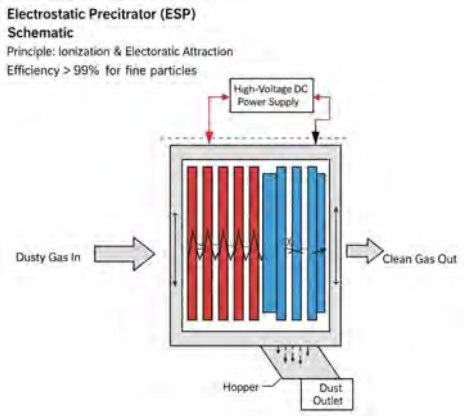


Figura 3. Rappresentazione schematica di un precipitatore elettrostatico (EPR), immagine creata con Gemini, assistente AI di Google.

I progressi nella tecnologia dell'automazione hanno consentito lo sviluppo di sistemi di raccolta della polvere autopulenti accoppiati a filtri antiparticolato ad alta efficienza (HEPA); questi sistemi sono in grado di identificare ed eliminare autonomamente la polvere dai macchinari di produzione, diminuendo la necessità di pulizia manuale e mitigando il potenziale accumulo di polvere [17]. Alcuni sistemi fanno un ulteriore passo avanti, impiegando l'intelligenza artificiale per migliorare l'ottimizzazione dei programmi di raccolta e pulizia, aumentando così l'efficienza e riducendo la dipendenza dalla pulizia manuale e, di conseguenza, la probabilità di accumulo di polvere [18].
Altro approccio innovativo riguarda l'integrazione della nanotecnologia nella gestione delle polveri alimentari. Le nanoparticelle, caratterizzate da una dimensione delle particelle che varia da 1 a 100 nm e composte da polimeri naturali o artificiali, mostrano efficacia nel catturare ed eliminare le particelle di polveri aerodisperse, migliorando in definitiva la qualità dell'aria e mitigando il rischio di esplosioni di polveri. La nanotecnologia può essere, infine, sfruttata per la progettazione di sistemi di raccolta delle polveri più efficienti ed ecosostenibili, riducendo anche l'impatto ecologico associato alla loro produzione [19-21].

5. Conclusioni

La gestione delle polveri organiche infiammabili rappresenta una delle principali preoccupazioni nell'industria alimentare a causa dei loro potenziali rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori. Pertanto, strategie di gestione efficaci sono fondamentali per mantenere un ambiente di lavoro sano e sicuro. Questo studio ha identificato diverse misure chiave per contribuire a mitigare i rischi legati al loro utilizzo; tra queste, il controllo efficace della pressione interna ai silos, anche grazie all'ausilio della sensoristica, il ricorso a efficaci pratiche di pulizia regolare delle attrezzature e delle aree di lavoro, la cui implementazione può avvenire attraverso l'utilizzo di adeguati sistemi di ventilazione e aspirazione delle polveri. Per affrontare efficacemente il problema della gestione della sicurezza delle polveri combustibili nell'industria alimentare, i risultati dell'analisi ivi presentata confermano, dunque, la necessità di investire maggiormente in ricerca e sviluppo per la realizzazione di nuove tecniche e attrezzature che ne impediscano l'accumulo e la diffusione negli impianti di produzione. Ciò può includere lo sviluppo di nuovi strumenti per la gestione e il controllo della pressione nelle apparecchiature deputate allo stoccaggio, impianti di ventilazione innovativi, sistemi antideflagranti e altri strumenti e tecnologie per migliorare la sicurezza.

Bibliografia

[1] NFPA 61: standard for the prevention of fires and dust explosions in agricultural and food processing facilities, 2008 edition" (Record no. 13547).
[2] Eckhoff R.K. Dust Explosions in the Process Industries: Identification, Assessment and Control of Dust Hazards: Third Edition. Dust Explosions in the Process

Industries: Identification, Assessment and Control of Dust Hazards. 2003; Third Edition:1-719.
[3] Eckhoff R.K., Li G. Industrial dust explosions. A brief review, *Appl. Sci*. 2021; 11 (4):1669.
[4] T. Fishwick. The sugar dust explosions and fire at Imperial Sugar Company, Georgia, *Loss Prev. Bull*. 2019; 266 (5).
[5] DIRETTIVA 1999/92/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 1999 relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive (quindicesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE).
[6] Keklis A., Salykov B., Kurmanov A. Enhancing Efficiency and Safety in Grain Silo Unloading: Analysis and Optimization of Mechanisms. *IJDNE*. 2024; 19: 513-521.
[7] Hauert F., Vogl A., Radandt S. Dust cloud characterization and its influence on the pressure-time-history in silos. *Process Saf. Prog*. 1996; 115:178-184.
[8] EN 1991-4 (2006): Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
[9] Półka M., Ptak S. Preventing Air Pollution Connected to the Explosion of Different Types of Flours in Dedicated Storage and Transportation Systems. *Sustainability*. 2019; 11(24):7256.
[10] Agnello J., Boopathi S., Arivoli A., Kannan A. Economic and environmental benefits of cleaner technology in industrial pollution control: case study of select sugar industry in Tamil nadu, in: D.M. Prashanthi, S. Rajakumar, J. Aravind, K. Thamaraiselvi (Eds.), Bioremediation and Green Technologies: Sustainable Approaches to Mitigate Environmental Impacts, Springer, Cham, Switzerland, 2021; 185–207.
[11] Chiang P.C., Gao X. Baghouse System. Air Pollution Control and Design, Springer, 2022; 621–652.
[12] Venkatesh S., Sivapirakasam S., Sakthivel M. Importance of Dust Collectors in Waste Management and Recycling in Industries. Green Materials and Advanced Manufacturing Technology. *CRC Press*, 2020; 23–34.
[13] Aziz A., Maqsood H., Kapur S. Cost-effective technologies for control of air pollution and atmospheric-related extremes, Extremes in Atmospheric Processes and Phenomenon: Assessment, Impacts and Mitigation. 2022; 349–368.
[14] R. Zalosh. Dust Explosions: Regulations, Standards, and Guidelines. Methods in Chemical Process Safety, Elsevier. 2019; 229–282.
[15] Afshari A., Ekberg L., Forejt L., Mo J., Rahimi S., Siegel J., et al., Electrostatic precipitators as an indoor air cleaner—a literature review, *Sustainability* 2020;12 (21): 8774.

[16] Zheng C., Zhang H., Liu X., Wang Y., Gao W., Zheng H., et al., Effect of dust layer in electrostatic precipitators on discharge characteristics and particle removal, *Fuel* 278. 2020; 118335.
[17] King G., Miller A., Schneider C., Feagan G., Gain D. Evaluation of a self-cleaning portable dust collector for reducing worker exposures to silica at hydraulic-fracturing sites, J. *Air Waste Manag. Assoc*. 2022; 1–11.
[18] Wang Y., Zhang J. Autonomous air duct cleaning robot system, in: 2006 49th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. 1. San Juan, PR, IEEE, USA, 2006; 510–513.
[19] Emenike E.C., Adeniyi A.G., Iwuozor K.O., Okorie C.J., Egbemhenghe A.U., Omuku P.E., et al. A critical review on the removal of mercury (Hg2+) from aqueous solution using nanoadsorbents, *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag*. 2023; 20:100816.
[20] Emenike E.C., Adeniyi A.G., Omuku P.E., Okwu K.C., Iwuozor K.O. Recent advances in nano-adsorbents for the sequestration of copper from water, *Journal of Water Process Engineering*. 2022; 47:102715.
[21] T. Lu, J. Cui, Q. Qu, Y. Wang, J. Zhang, R. Xiong, et al. Multistructured electrospun nanofibers for air filtration: a review. *ACS applied materials & interfaces*. 2021; 13 (20): 23293–23313.

Sicurezza degli impianti elettrici nella produzione di biogas in aziende agricole

M. del Gaudio[1], R. Modestino[1]

[1]Inail - UOT di Avellino

1. Introduzione

È sempre più frequente che le aziende agricole e zootecniche si dotino di impianti per la produzione di energia elettrica e termica a partire dai residui vegetali o dalle deiezioni animali.
Gli impianti di produzione di biogas non solo portano alla produzione di energia rinnovabile, ma offrono anche opportunità economiche: gli agricoltori e altri operatori possono produrre energia, da utilizzare in azienda soprattutto quando c'è la trasformazione dei prodotti, oppure da cedere in rete. Altro prodotto è rappresentato dai residui digestati che possono essere utilizzati come fertilizzanti organici.
Questi impianti, quindi, non solo forniscono energia pulita e sostenibile, ma diventano anche un motore per la crescita economica.
Tuttavia, esaminando alcuni incidenti che si sono verificati negli anni, in questi stabilimenti, è possibile avere un quadro generale dei rischi associati a questi processi industriali. In particolare, è opportuno evidenziare tre tipologie di eventi: deflagrazione/esplosione, incendio e danno ambientale. I fattori di rischio sono riconducibili a problemi sull'impianto elettrico, all'aumento di pressione oltre i limiti previsti dal fabbricante delle attrezzature ed eventualmente alla conseguente rottura del componente ed anche al rischio fulmini.

2. Normativa di riferimento

Gli impianti di produzione di biogas con capacità superiore a 25 Nm^3/h sono soggetti a controllo da parte dei Vigili del Fuoco, poiché rientrano nel punto 1 dell'Allegato I del D.P.R. n. 151/11e di conseguenza, dovranno anche rispettare le regole tecniche del D.M del 3 Agosto 2015.
Questi impianti possono essere soggetti a rischi di esplosione, in particolare a causa di emissioni derivanti da guasti nei sistemi di tenuta della rete di trasporto, da cedimenti dei serbatoi di accumulo del biogas. E' necessario, pertanto, procedere ad una corretta classificazione delle zone a rischio esplosione in modo tale da poter installare apparecchiature conformi alla direttiva ATEX 2014/34/UE e alla norma "UNI EN 1127-1:2019: Atmosfere esplosive - Prevenzione e protezione contro l'esplosione".
Un ulteriore riferimento normativo di rilievo è la norma "UNI 10458:2022: Sicurezza degli impianti di biogas - Linee guida per la progettazione e l'esercizio" valida per tutte le tipologie di impianti di biogas, sia agricoli che industriali, indipendentemente dalle

loro dimensioni e capacità produttiva, importante punto di riferimento per la progettazione, installazione e gestione di questi impianti.
È necessario inoltre rispettare le direttive europee e le norme CEI di riferimento per la realizzazione di un adeguato impianto elettrico, il DPR 462/2001 per la messa in esercizio dell'impianto e i riferimenti normativi relativi alla messa in servizio degli impianti a pressione, secondo il DM 329/04 e per i controlli periodici secondo il DM 11 Aprile 2011.

3. L'impianto tipo

3.1 Funzionamento dell'impianto di produzione di biogas

In generale in un impianto di produzione di biogas i materiali di rifiuto devono essere pretrattati, in particolare triturati, addizionati di liquidi, riscaldati prima di essere avviati ad un fermentatore dove avviene una digestione ad opera di batteri.
Questo processo naturale, chiamato digestione anaerobica, avviene in assenza di ossigeno, e permette la fermentazione delle biomasse grazie all'azione di batteri ed enzimi.
I gas prodotti vengono raccolti in un gasometro e successivamente utilizzati per alimentare generatori a biogas oppure sottoposti a ulteriori trattamenti di purificazione per ottenere biometano da immagazzinare in serbatoi per il successivo utilizzo o per impianti di grosse dimensioni da immettere nella rete nazionale.

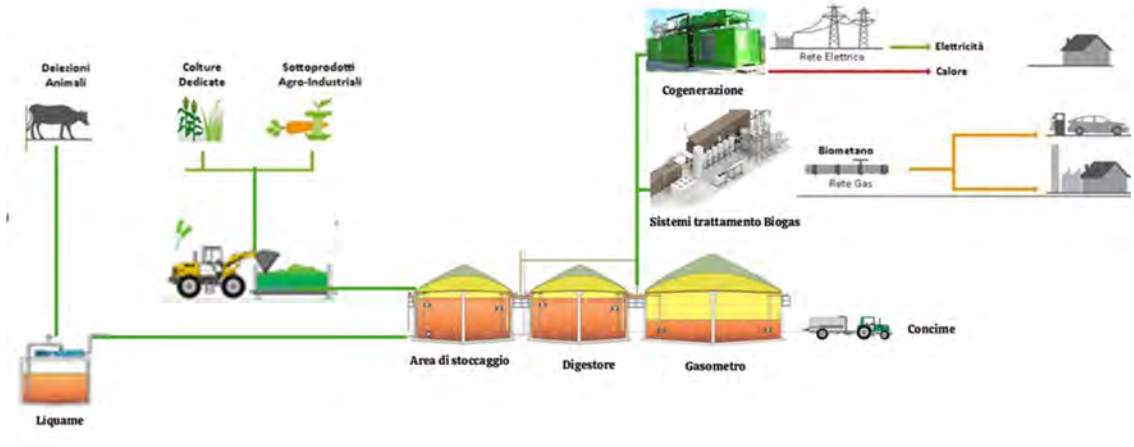


Figura 1. Diagramma di flusso produzione di biogas o biometano.

3.2 I componenti principali dell'impianto

La struttura di un impianto a biogas è abbastanza standardizzata; può prevedere diversi elementi, in base alla tipologia e qualità delle biomasse utilizzate, alla quantità di materiale che è in grado di ricevere e al prodotto finale.
I principali componenti di un impianto a biogas sono:

● **Aree di stoccaggio:** possono essere delle vasche o serbatoi in cui viene raccolto il materiale organico da digerire. In queste aree vengono eliminate le impurità e preparato il materiale mediante trattamenti meccanici o termici;
● **Digestore primario:** mediante un sistema di tubi e pompe il materiale organico stoccato nelle apposite aree viene inviato al digestore, grandi cisterne chiuse in modo ermetico dove le biomasse sono continuamente miscelate. Qui avviene la fermentazione attraverso l'azione dei microrganismi, ad una pressione, generalmente costante, il cui valore viene garantito, circa 0,04 barg, grazie alla presenza di valvole di sovrapressione. In molti impianti direttamente sul digestore è montata una cupola gasometrica dotata dei dispositivi di sicurezza per sovrappressioni in cui viene accumulato il gas prodotto.
● **Gasometro:** è un serbatoio a freddo in cui si accumula il biogas. Anche in questo la massima pressione consentita, grazie a opportune valvole di sovrappressione, è molto bassa (circa 0,04 barg). Queste valvole, in caso di necessità, permettono lo scarico del gas direttamente in atmosfera.
● **Aree per lo stoccaggio del digestato:** la digestione anaerobica produce non solo biogas ma anche dei materiali residui organici, i quali vengono stoccati in apposite aree ed usati in ambito agricolo come ammendante o fertilizzante.
Il biodigestore e il gasometro sono normalmente protetti dalle sovrappressioni da valvole a molla o farfalla con un opportuno valore di taratura in grado di evitare danni alla struttura. Valvole sferiche possono essere utilizzate per regolare i flussi di gas e per maggiore sicurezza possono essere installate valvole di intercettazione combustibile da attivare in caso di avarie nelle successive parti dell'impianto.
A causa della elevata capacità di corrosione dei prodotti utilizzati è preferibile che tutti i componenti: valvole, tubazioni e guarnizioni siano di tipo idoneo a resistere in ambienti aggressivi.

3.2.1 Impianti per la eventuale produzione di biometano ed utilizzo

Dopo la fase di digestione, per ottenere biometano è necessario procedere ad una purificazione in impianti dove il processo avviene mediante tre passaggi principali: il pretrattamento, la rimozione di tutti gli ultimi residui di impurità e della CO_2 e la liquefazione.
● **Sistemi di trattamento del biogas:** in questi impianti si procede alla desolforazione per eliminare l'acido solfidrico e alla rimozione dell'anidride carbonica;
L'impianto è composto essenzialmente dai seguenti elementi:
- una "Biogas Upgrading Unit (BUU)" unità atta a purificare il biogas rimuovendo H_2S, Composti Organici Volatili (VOC) e CO_2 (fino ad una concentrazione del 2%) per ottenere Biometano.
- una "Polishing Unit (PU)". L'unità riceve il flusso di biogas composto prevalentemente da metano ma anche da anidride carbonica, acqua, H_2S ed altri contaminanti residui. L'H_2S costituirebbe, un rischio data la sua capacità corrosiva. La

rimozione della CO_2 e dell'acqua è propedeutica alla fase successiva di liquefazione del biometano dove si raggiungono temperature di circa 120 K (-153 °C), per evitare che la loro solidificazione ostruisca progressivamente lo scambiatore di calore dell'unità di liquefazione.

- una "Biomethane Liquefaction Unit (BLU)" unità in cui avviene il processo di liquefazione per mezzo di scambio termico tra un fluido criogenico a bassa temperatura di liquefazione, l'azoto, e il biometano gassoso proveniente dalla PU. L'azoto passa dalla fase liquida a quella gassosa mentre il metano dalla fase gassosa a quella liquida. La liquefazione del metano avviene ad una temperatura di circa -160 °C ed a una pressione di circa 5 barg.
- un "Liquefied Biomethane (LBM) Storage Tank" Il biometano liquefatto viene trasferito per caduta di pressione all'interno del serbatoio criogenico di stoccaggio.
- un Loading Bay (LB) sottoinsieme che trasferisce il prodotto all'esterno dell'impianto mediante una pompa criogenica.

Il biometano prodotto può essere ceduto alla rete nazionale o utilizzato per alimentare un impianto di cogenerazione.

- **Impianto di Cogenerazione:** Gli impianti di cogenerazione permettono di sfruttare il calore disperso da un impianto di produzione di energia elettrica. L'energia elettrica proviene in genere da impianti con motori termici, in cui il calore, attraverso un ciclo termodinamico viene convertito prima in energia meccanica e quindi in energia elettrica attraverso dei generatori elettrici. In questo processo di trasformazione la porzione di calore che non viene convertita in lavoro viene recuperata per generare sia energia elettrica che energia termica da cedere alla rete o da utilizzare per alimentare la stessa.

Le varie unità si avvalgono di numerose attrezzature a pressione, quali serbatoi di gas e criogenici, scambiatori di calore, tubazioni, soprattutto per quanto concerne le componenti dell'impianto relative alla produzione di biometano.

In tutti i casi, anche nel digestore e gasometro, dove, generalmente, la pressione non supera i valori di soglia previsti dalla normativa italiana per la denuncia di messa in servizio di tali impianti, sono previsti diversi sistemi di protezione dal rischio sovrappressione quali valvole di sicurezza e dischi di rottura.

Gli impianti di produzione di biometano hanno pressioni d'esercizio che li assoggettano all'obbligo di denuncia all'Inail ai sensi del DM 329/2004 e sono quindi maggiormente attenzionati.



Figura 2. Esempio di impianto compatto di produzione di biogas- Fonte Schmack.

4. La sicurezza degli impianti

La necessità di una valutazione e gestione continua dei rischi, l'importanza di un approccio integrato che comprenda la conformità normativa, un'analisi sistematica dei rischi e l'implementazione di misure preventive e protettive è indispensabile per garantire la sicurezza degli impianti di biogas.

Tuttavia, soprattutto nelle piccole realtà agricole, spesso a conduzione familiare, vengono a volte disattese la necessità di denunciare l'impianto elettrico secondo quanto previsto per impianti installati in ambienti a rischio di esplosioni, e la necessità di prestare la dovuta attenzione alle parti dell'impianto in pressione e ai relativi sistemi di protezione.

A causa del rischio di esplosione è necessario applicare la UNI EN 1127-1:2019. Seguendo tale norma è possibile valutare il rischio esplosione, identificando le sorgenti di accensione, la probabilità che una atmosfera esplosiva si formi e si inneschi, e l'analisi delle conseguenze potenziali di un'esplosione.

Una volta identificati i rischi, la norma prescrive una serie di misure preventive e protettive da mettere in atto per ridurre il rischio come l'uso di apparecchiature elettriche certificate per aree pericolose, la realizzazione di un opportuno impianto di messa a terra e il collegamento equipotenziale per prevenire scariche elettrostatiche, e il controllo delle temperature superficiali delle apparecchiature per evitare che raggiungano livelli pericolosi.

Per quanto concerne il rischio derivante dall' impianto elettrico, oltre a rispettare le norme tecniche CEI necessarie per regolamentare la progettazione e la realizzazione di tali impianti, occorre applicare le prescrizioni previste dalle norme CEI che disciplinano la progettazione e l'installazione degli impianti elettrici con pericolo di esplosione.

Allo stato attuale la direttiva ATEX 2014/34/UE e la direttiva ATEX 99/92/CE, sono il punto di riferimento per quanto attiene le apparecchiature e i sistemi di protezione che sono destinati ad essere utilizzati in atmosfera esplosiva. La norma di riferimento per questi tipi di impianti è la EN UNI 1127-1:2019. "Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia", nella quale si differenziano tredici diverse fonti di innesco.
Gli ambienti con atmosfera esplosiva per la presenza di gas devono essere suddivisi in zone, utilizzando a questo scopo le norme EN 60079-10-1. A seconda dei risultati della valutazione del rischio, la definizione delle zone con pericolo di esplosione è da descrivere in un documento per la protezione contro il pericolo di esplosione. Per quanto riguarda la protezione contro i fulmini, le norme da utilizzare sono quelle della serie CEI EN 62305.
Tutte le apparecchiature elettriche che si trovano in zone classificate devono rispondere ai requisiti di sicurezza ed offrire il livello di protezione adatto al tipo di zona classificata, secondo quanto previsto dalla direttiva ATEX 2014/34/UE.
Tipicamente, in un impianto di produzione di biogas le sorgenti di emissione sono rappresentate da vasche di carico liquami, digestore, gasometro, tubazioni, e le zone pericolose individuate sono classificate zona 2 e più raramente zona 1 con le caratteristiche descritte in tab. 1.

Zona	Descrizione
Zona 0	Area in cui è presente in modo continuativo, per lunghi periodi o frequentemente, un'atmosfera esplosiva sotto forma di gas, vapore o nebbia
Zona 1	Area in cui è probabile periodicamente oppure occasionalmente la presenza di un'atmosfera esplosiva in occasione del normale funzionamento
Zona 2	Area in cui non è probabile la presenza di un'atmosfera esplosiva in occasione del normale funzionamento ma se si verifica, sarà solo per breve periodo.

Tabella 1. Zone ATEX (ATEX CEI EN 60079-10-1) per atmosfere gassose.

Successivamente il DPR 462/01 prevede che il datore di lavoro proceda alla denuncia dell'impianto di terra all'Inail e nel caso di ambienti ATEX all'ASL territorialmente competenti.
Per quanto concerne invece il rischio sovrappressione, le parti dell'impianto in pressione debbono essere dotate di una serie di dispositivi di sicurezza in grado di compensare sovrappressioni o incontrollati aumenti delle temperature. Generalmente tali dispositivi consistono in valvole di sicurezza e/o dischi di rottura in grado di depressurizzare l'attrezzatura ed impedire danneggiamenti dell'impianto produttivo.

Un altro dispositivo di sicurezza è rappresentato dalla valvola di sicurezza a guardia idraulica, che entra in funzione ogni volta che la pressione del biogas supera il valore della pressione stabilita dal battente idrostatico.
Tali impianti devono essere correttamente installati secondo le indicazioni previste dal fabbricante nel manuale d'istruzioni e periodicamente controllate per monitorare lo stato di manutenzione e conservazione, il mantenimento delle condizioni di sicurezza previste in origine dal fabbricante specifiche dell'attrezzatura di lavoro, come pure l'efficienza dei dispositivi di sicurezza e di controllo.
Negli impianti di piccole dimensioni, come i sistemi di impianto biogas completamente containerizzati, i valori di pressione sono normalmente inferiori a 0,5 bar e pertanto sono esclusi dalle prescrizioni del DM 329/2004. Per gli impianti di maggiori dimensioni, possono essere soggetti a tale decreto i diversi componenti in pressione come recipienti di gas o criogenici, tubazioni ecc.

5. Risultati

Negli ultimi anni sono state maggiormente sviluppate le tecnologie per produrre energia da fonti rinnovabili e tra queste anche la produzione di combustibili a partire da scarti organici prima utilizzati al massimo per produrre ammendanti per l'agricoltura. Le aziende agricole, anche sollecitate dagli aumenti dell'energia, hanno installato degli impianti di produzione di biogas o di biometano alimentati con gli scarti di produzione o con le deiezioni prodotte dagli allevamenti.
Sono disponibili sul mercato impianti compatti utilizzabili direttamente anche da piccole aziende mentre in alcuni casi sono stati realizzati impianti più grandi in grado di raccogliere materiali organici da più aziende. Analizzando le denunce presentate dalle aziende agricole nell'applicativo CIVA quasi mai gli impianti di produzione di Biogas vengono denunciati perché i valori di pressione sono normalmente inferiori a quelli indicati dal DM 329/2004 ed anche gli impianti elettrici sono spesso denunciati senza considerare che sono installati in ambiente a rischio di esplosione e quindi ai sensi del DPR 462/01 dovrebbero essere collaudati dalla ASL competente e successivamente denunciati ad Inail.

6. Conclusioni

In questo lavoro sono stati descritti gli impianti di produzione di biogas o di biometano sottolineando gli accorgimenti necessari per garantire la sicurezza e prevenire incidenti.
È necessario sensibilizzare i progettisti, le ditte installatrici, gli installatori e gli utilizzatori sulla necessità di progettare correttamente questi impianti e di utilizzarli correttamente. La fase di manutenzione rappresenta sempre la maggiore criticità perché è necessario controllare periodicamente l'efficienza dei dispositivi di sicurezza e valutare attentamente gli effetti di eventuali revamping. Le denunce di impianti da presentare ad Inail costituiscono un momento di verifica al fine della prevenzione ma

per gli impianti con caratteristiche esenti da tali obblighi è necessario porre la stessa attenzione nelle verifiche.

Bibliografia

[1] Decreto 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 d.l. 25 febbraio 2000, n. 93. (GU n.22 del 28-01-2005 - Suppl. Ordinario n. 10)

[2] D.p.r. 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." (G.U. 8 gennaio 2002, n. 6).

[3] UNI EN 1127-1:2019- Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia.

[4] Direttiva 2014/34/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 26 febbraio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva (rifusione).

[5] Direttiva 1999/92/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 1999 relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive (quindicesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE).

[6] CEI EN IEC 60079-10-1 Atmosfere esplosive Parte 10-1: Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di gas.

[7] CEI EN 62305 –(Parti1,2,3,4) Protezione contro i fulmini.

[8] D.p.r. n. 151/11- Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4-quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122. (G.U. 22 settembre 2011, n. 221)

[9] D. m. del 3 Agosto 2015 - Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139. (15A06189) (GU Serie Generale n.192 del 20-08-2015 - Suppl. Ordinario n. 51).

[10] D. m. 11 Aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo (G.U. del 29.4.2011, n. 98, S.O. n. 111).

[11] UNI 10458:2022 Impianti per la produzione e l'impiego di gas biologico (biogas) - Classificazione, requisiti essenziali, regole per l'offerta, l'ordinazione, la costruzione e il collaudo.

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

A. Romanelli[1], A. Serra[2], G. Baccarin[3]

[1] Inail – UOT di Bergamo
[2] ATS Brescia
[3] Mipu Predictive Hub srl Società Benefit

Sommario
Il contesto normativo sui generatori di vapore è stato recentemente aggiornato con il Decreto Ministeriale n. 94 del 7 agosto 2020 (entrato in vigore il 30 settembre 2021) relativo all'abilitazione alla conduzione dei generatori di vapore. Questo provvedimento, emanato in attuazione dell'art. 73-bis del D.Lgs. 81/2008, ha lasciato invariata la classificazione dei patentini su quattro gradi e ha abrogato la normativa previgente del 1974. Una novità significativa è l'esenzione dalla presenza continua per impianti certificati con caratteristiche di esenzione H24 ÷ H72. Tale deroga – che riprende criteri di esenzione in vigore prima del 2000 – comporta vantaggi gestionali ed economici, ma richiede che la sicurezza intrinseca dell'impianto sia garantita da dispositivi automatici affidabili e da una manutenzione rigorosa. È importante sottolineare che restano invariati tutti gli altri obblighi normativi: ad esempio la messa in servizio secondo D.M. 329/2004 e le verifiche periodiche previste dall'Allegato VII del D.Lgs. 81/2008 continuano ad applicarsi senza cambiamenti. In sintesi, il D.M. 94/2020 aggiorna il quadro normativo enfatizzando una gestione del rischio proporzionata alla potenzialità dell'impianto, mantenendo però ferme le garanzie di sicurezza di base.

1. Gestione del Rischio in Esercizio e durante le Verifiche Periodiche

1.1 Inquadramento tecnico-operativo del rischio nei generatori di vapore

La gestione del rischio nei generatori di vapore deve essere affrontata con un'impostazione sistemica, nella quale convergono aspetti tecnici, organizzativi e procedurali. Il generatore di vapore rappresenta un insieme o un'attrezzatura in pressione potenzialmente critica per la presenza contemporanea di energia termica e pressione, e i principali scenari di rischio sono generalmente associati a:

- perdita di controllo di pressione/temperatura;
- insufficienza del livello acqua e surriscaldamento di parti metalliche;
- inefficienza o indisponibilità dei dispositivi di sicurezza (valvole di sicurezza, pressostati, limitatori, blocchi);
- inefficienza dei dispositivi di regolamentazione e controllo (dovuti ai meccanismi degradati).

- degradazione nel tempo di componenti soggetti a corrosione, erosione, fatica, creep (in funzione del degrado di materiali per diverse condizioni).

Per questo motivo, il presidio del rischio non può basarsi su un unico "livello" di controllo, ma richiede ridondanza funzionale: regolazione, protezione, monitoraggio e manutenzione.

1.2 Gestione del rischio in esercizio quotidiano

In esercizio, la gestione del rischio si fonda sulla capacità di controllare con continuità i parametri critici e di assicurare che le funzioni di protezione intervengano correttamente **nei tempi previsti**, in caso di deriva o guasto. Quando è previsto un conduttore patentato, il suo ruolo non è solo "presenza", ma presidio tecnico: verifica dello stato operativo, attenzione a segnali di anomalia, applicazione di procedure, coordinamento delle attività manutentive e gestione delle emergenze. Quando invece l'impianto rientra nei casi di esenzione dalla presenza continua, aumenta l'importanza di:

- automazioni robuste e correttamente configurate;
- logiche di blocco affidabili (interlock);
- controlli periodici documentati e manutenzione eseguita con rigore.

I parametri tipicamente monitorati in continuo includono pressione, temperatura, livello acqua, portata combustibile, portata aria, qualità dell'acqua di alimento (ove prevista strumentazione in linea), oltre alle grandezze funzionali dei dispositivi di sicurezza. In particolare:

- il livello acqua è un indicatore fondamentale perché l'insufficienza può portare a surriscaldamento localizzato e danneggiamento del corpo caldaia o del fascio tubiero;
- le oscillazioni anomale di pressione possono evidenziare instabilità di regolazione, inefficienza di scarico condensa, problemi di valvole o richieste di carico non compatibili.

1.3 Ruolo delle procedure, formazione e manutenzione preventiva

La sicurezza effettiva non dipende solo dal controllo in tempo reale, ma anche dalla robustezza di:

- procedure operative standard (SOP): avviamento, arresto, gestione transitori, cambio assetto, gestione emergenze;
- formazione e addestramento: comprensione degli allarmi, priorità di intervento, riconoscimento delle condizioni anomale;
- piani di manutenzione preventiva: controlli funzionali periodici dei dispositivi di sicurezza, verifiche di taratura, interventi programmati su componenti soggetti a usura, compresi i dispositivi di regolamentazione e controllo.

In questo scenario la manutenzione preventiva completa "classica" ha ancora un ruolo essenziale, soprattutto per le funzioni di sicurezza e per le parti soggette a invecchiamento noto.

1.4 La gestione del rischio durante le verifiche periodiche

Le verifiche periodiche previste dall'Allegato VII del D.Lgs. 81/2008 rappresentano un presidio esterno che si affianca alla gestione interna del datore di lavoro. Esse sono orientate a valutare, con criteri tecnico-documentali e con controlli diretti, che:

- l'attrezzatura sia installata e mantenuta in condizioni coerenti con il progetto e le istruzioni del costruttore;
- sia garantito nel tempo il mantenimento delle condizioni di sicurezza originarie;
- i dispositivi di sicurezza, regolazione e controllo siano efficienti e correttamente gestiti.

Nei generatori di vapore, tali verifiche consentono di intercettare criticità che non sempre emergono in conduzione ordinaria: fenomeni corrosivi interni, depositi, perdite incipienti, tarature errate, segnali di deterioramento di accessori e organi di intercettazione. Il valore aggiunto della verifica periodica è quindi duplice: da un lato è controllo di conformità e conservazione; dall'altro è occasione di "validazione" indiretta delle politiche manutentive e della qualità della conduzione. Importante è la trascrizione di ogni intervento di tipo manutentivo su ogni componente, nel registro di controllo.

2. Tecnologie Innovative per il Monitoraggio Predittivo e la Prevenzione dei Guasti

L'innovazione tecnologica sta offrendo nuovi strumenti per migliorare la sicurezza e l'affidabilità dei generatori di vapore attraverso il monitoraggio predittivo. L'integrazione di sensori IoT (Internet of Things) consente di rilevare in tempo reale i parametri operativi chiave – ad esempio pressione, temperatura, vibrazioni, portata e qualità del vapore – e di trasmettere continuamente questi dati a piattaforme di analisi. Applicando algoritmi di analisi avanzata, intelligenza artificiale e machine learning, ai dati raccolti, è possibile individuare pattern anomali indicativi di potenziali guasti incipienti. In questo modo la manutenzione predittiva permette di anticipare i malfunzionamenti e pianificare interventi di manutenzione mirati prima che si verifichi un guasto, evitando fermi impianto imprevisti e prolungando la vita utile delle apparecchiature. Nel vecchio Regio Decreto 1927, la sicurezza dei generatori di vapore era affidata soprattutto alla presenza e al controllo umano (il fuochista, l'operatore in servizio continuo). Con la PED, invece, la valutazione del rischio e la progettazione tecnica diventano parte integrante della normativa europea sulle attrezzature a pressione. I produttori devono dimostrare che l'impianto, quando correttamente costruito secondo gli standard armonizzati, non presenta rischi significativi per persone e proprietà nelle condizioni di uso normali e ragionevolmente prevedibili; in questo quadro non viene richiesto esplicitamente il controllo umano permanente, perché i rischi devono essere gestiti e controllati da misure tecniche che impediscono automaticamente condizioni pericolose.

3. Esempio sul territorio Lombardo: manutenzione predittiva e digitalizzazione degli impianti.

Nel contesto industriale lombardo, l'implementazione della manutenzione predittiva per i generatori di vapore rappresenta un'opportunità strategica di innovazione che coniuga sicurezza, efficienza operativa e sostenibilità economica. L'esperienza maturata sul territorio ha evidenziato come l'integrazione di tecnologie IoT e algoritmi di intelligenza artificiale possa trasformare radicalmente l'approccio manutentivo tradizionale, passando da una logica reattiva o time-based a una gestione basata sulle condizioni effettive degli impianti.

L'architettura tipica di un sistema PdM applicato ai generatori di vapore si articola su tre livelli fondamentali. Il primo livello è costituito dalla sensoristica distribuita, che include trasduttori di pressione e temperatura ad alta precisione, accelerometri triassiali per il monitoraggio vibrazionale, analizzatori di conducibilità e pH per la qualità dell'acqua di alimento, e sensori di posizione e stato per gli scaricatori di condensa. Questi dispositivi, connessi tramite protocolli industriali come Modbus TCP/IP, OPC-UA o MQTT, generano flussi di dati continui che vengono trasmessi a piattaforme cloud o edge computing.

Il secondo livello riguarda l'elaborazione intelligente dei dati attraverso algoritmi di machine learning. In particolare, le tecniche di anomaly detection basate su modelli statistici multivariati (come Isolation Forest, One-Class SVM o Autoencoder neurali) permettono di identificare deviazioni dai pattern operativi normali anche quando queste si manifestano in modo graduale e difficilmente percepibile attraverso il monitoraggio manuale. Per esempio, un incremento progressivo della temperatura di uscita fumi, correlato con una riduzione dell'efficienza termica, può indicare l'inizio di un processo di incrostazione delle superfici di scambio termico, consentendo di pianificare interventi di pulizia chimica prima che il fenomeno comprometta significativamente le prestazioni.

Gli algoritmi di Remaining Useful Life (RUL) prediction, implementati mediante reti neurali ricorrenti (LSTM) o modelli di degradazione fisico-statistici, consentono di stimare la vita residua di componenti critici come pompe di alimento, valvole di sicurezza e ventilatori. Questi modelli vengono addestrati su dataset storici che includono sia dati operativi sia informazioni relative a guasti e sostituzioni pregresse, permettendo di costruire curve di degrado specifiche per ogni tipologia di componente e condizione operativa. L'accuratezza predittiva di questi sistemi, che in implementazioni ottimizzate può raggiungere valori superiori all'85%, permette di ottimizzare la pianificazione degli interventi manutentivi e di minimizzare i costi di gestione delle scorte di ricambio.

Il terzo livello dell'architettura è rappresentato dall'interfaccia decisionale, tipicamente implementata attraverso dashboard web-based che integrano visualizzazioni in tempo reale, sistemi di allerta multilivello e moduli di reportistica automatizzata. L'interfaccia deve essere progettata secondo principi di usabilità che

consentano sia al personale tecnico di conduzione sia ai responsabili della manutenzione di accedere facilmente alle informazioni rilevanti. La presenza di notifiche push configurabili garantisce che anomalie critiche vengano comunicate tempestivamente agli operatori responsabili, anche al di fuori dell'orario di lavoro ordinario.

Un aspetto particolarmente rilevante dell'implementazione di sistemi PdM nel contesto lombardo riguarda l'interoperabilità con i sistemi informativi aziendali esistenti, in particolare con i CMMS (Computerized Maintenance Management System) e gli ERP. L'integrazione bidirezionale permette di sincronizzare automaticamente le attività manutentive suggerite dagli algoritmi predittivi con i sistemi di pianificazione aziendale, ottimizzando l'allocazione delle risorse umane e materiali. Inoltre, la registrazione automatica degli interventi e dei parametri operativi costituisce un patrimonio informativo fondamentale per la conformità normativa e per il miglioramento continuo dei modelli predittivi.

Dal punto di vista della cybersecurity, aspetto sempre più critico nell'era dell'Industria 4.0, l'implementazione di sistemi PdM richiede un'architettura di rete segmentata secondo il modello ISA/IEC 62443. La separazione tra livello di campo (Purdue Level 0-2), livello di supervisione (Level 3) e livello enterprise (Level 4-5) mediante firewall industriali e DMZ dedicate è essenziale per proteggere i sistemi di controllo da potenziali attacchi informatici. L'autenticazione multi-fattore, la cifratura end-to-end delle comunicazioni e il logging dettagliato degli accessi rappresentano misure imprescindibili per garantire l'integrità e la confidenzialità dei dati operativi.

Le evidenze raccolte da progetti pilota implementati nel territorio lombardo mostrano risultati significativi in termini di riduzione dei fermi macchina non pianificati (tipicamente nell'ordine del 30-40%), incremento dell'efficienza energetica (mediamente 5-8% attraverso l'ottimizzazione dei parametri di combustione e trattamento acqua) e riduzione dei costi complessivi di manutenzione (15-25% considerando sia i costi diretti sia quelli indiretti legati ai fermi produttivi). Particolarmente interessante è l'impatto sulla sicurezza operativa: il monitoraggio continuo delle condizioni critiche ha permesso di identificare precocemente situazioni potenzialmente pericolose, quali malfunzionamenti delle valvole di sicurezza o condizioni anomale di pressione, contribuendo alla riduzione del rischio di incidenti.

Tuttavia, l'adozione di sistemi PdM presenta anche sfide significative che devono essere affrontate con un approccio metodologico rigoroso. La qualità dei dati rappresenta il fattore critico di successo: sensori mal calibrati, dati mancanti o rumorosi possono compromettere l'affidabilità delle predizioni. È pertanto essenziale implementare procedure di data quality assurance che includano la validazione automatica dei dati in ingresso, la gestione delle anomalie strumentali e la calibrazione periodica della sensoristica. Inoltre, la formazione del personale tecnico e manutentivo costituisce un investimento fondamentale per garantire l'efficace

utilizzo dei sistemi e l'interpretazione corretta dei risultati forniti dagli algoritmi predittivi.
In prospettiva futura, l'evoluzione verso architetture basate su Digital Twin rappresenta la naturale estensione dei sistemi PdM attualmente implementati. Il gemello digitale del generatore di vapore, alimentato da dati real-time e modelli fisici multi-scala, già permette di simulare scenari operativi complessi, ottimizzare le strategie di conduzione e pianificare interventi manutentivi in un contesto virtuale prima della loro esecuzione fisica. Questo tipo di sistemi sono per nostra esperienza implementati oggi in meno del 5% delle aziende, soprattutto a causa delle sfide già evidenziate quali scarsa digitalizzazione degli impianti e incompleta formazione del personale. E' dunque fondamentale diffondere nelle aziende la consapevolezza di quanto le tecniche predittive e la digitalizzazione possano favorire non solo la continuità operativa, ma anche e soprattutto la sicurezza ed il benessere dei lavori e la sostenibilità di processi. L'integrazione con tecnologie emergenti quali il 5G industriale, per garantire connettività ultraveloce e a bassa latenza, e l'edge AI, per abilitare capacità decisionali autonome a livello locale, delineerà scenari sempre più avanzati di gestione intelligente e sicura degli impianti termici.

4. Integrazione dei sistemi PdM nei processi ispettivi dei soggetti pubblici e privati deputati alle verifiche

4.1 Evoluzione del modello ispettivo: da "istantanea" a "storia tecnica"

Il modello tradizionale di verifica periodica si basa su documentazione, controlli funzionali e osservazioni in sito. I sistemi PdM, se correttamente governati, aggiungono una dimensione "storica" e quantitativa: trend, eventi, registrazioni automatiche, allarmi, interventi eseguiti. Ne consegue una verifica potenzialmente più mirata, perché l'ispettore può:

- individuare le aree "a rischio" (trend anomali, eventi ripetuti);
- valutare la coerenza tra anomalie segnalate e azioni intraprese;
- avere riscontri quantitativi sull'andamento dell'impianto.

L'adozione dei sistemi PdM può trasformare modalità e strumenti con cui gli organi di verifica svolgono le ispezioni sulle attrezzature. In un modello tradizionale, l'ispettore verifica di persona lo stato della macchina, basandosi su documentazione cartacea (registro manutenzioni, verbali di verifica precedenti) e sull'esame visivo/funzionale diretto. Con l'integrazione dei sistemi digitali e sensoriali, si prospettano diversi miglioramenti.

Accesso remoto ai dati dell'attrezzatura: Le piattaforme cloud di manutenzione predittiva consentono di consultare da remoto i dati rilevati dai sensori e lo storico manutentivo. Ciò significa che un verificatore (INAIL, ASL o soggetto abilitato) potrebbe, previa autorizzazione, accedere a una dashboard web dell'attrezzatura prima di recarsi sul posto. Questo anticipo informativo permette di pianificare meglio

l'ispezione: l'organismo di verifica individua subito eventuali parametri anomali o componenti che hanno segnalato problemi. In alcuni casi, potrebbe addirittura svolgere una prevalutazione a distanza, riducendo il tempo necessario in campo e il disagio per l'azienda ispezionata.

Trasparenza e condivisione in tempo reale: Un sistema PdM ben integrato offre trasparenza sui dati di esercizio e manutenzione dell'attrezzatura. Per esempio, tutte le parti coinvolte (datore di lavoro, manutentore, ente di controllo) possono attingere alla stessa fonte dati aggiornata, evitando discrepanze o possibili omissioni. Questa trasparenza riduce il rischio di manomissioni o occultamenti: i dati essendo generati in automatico e (idealmente) protetti da modifiche, costituiscono un'evidenza immediata dello stato di fatto.
Confronto con soglie normative e parametri di sicurezza: I sistemi PdM possono essere configurati per confrontare i valori rilevati con soglie di sicurezza stabilite da norme tecniche o dal costruttore. Questi indicatori supportano l'ispettore nel valutare lo stato di conservazione e la sicurezza: invece di affidarsi solo all'ispezione visiva (che magari non rivela micro-cricche o stress accumulato), egli dispone di misure quantitative di degrado.
Collaborazione in tempo reale durante la verifica: Si può immaginare che durante una verifica periodica in sito l'ispettore possa avvalersi del supporto remoto di esperti (ad esempio ingegneri del costruttore o della stessa INAIL/ASL/Soggetto abilitato) collegati al sistema PdM. Tramite la piattaforma, tutti possono osservare i medesimi dati di sensore e magari le immagini/video in streaming dalla macchina. Questo crea un processo ispettivo collaborativo: qualora emerga un dubbio su un parametro, si può consultare in diretta il costruttore per un parere tecnico, migliorando la qualità dell'ispezione. Inoltre, l'ispettore può inserire i risultati della verifica direttamente nel sistema digitale dell'azienda (o in un registro elettronico collegato), evitando doppie registrazioni e integrando subito le non conformità rilevate con i dati sensoriali.
Un aspetto cruciale per la diffusione dei sistemi di monitoraggio avanzato è la certificabilità e validità legale dei dati raccolti. Affinché i dati di PdM possano essere utilizzati come documentazione ufficiale ai sensi delle normative vigenti (D.Lgs. 81/08, DM 11/04/2011, norme UNI/ISO, ecc.), occorre garantirne attendibilità, integrità e disponibilità nel tempo. Esaminiamo i requisiti e le soluzioni possibili:
Equivalenza ai documenti tradizionali: Oggi la normativa richiede una serie di documenti a corredo della sicurezza delle attrezzature: registro delle manutenzioni, verbali delle verifiche periodiche, dichiarazioni CE, manuali, ecc.. Molti di questi possono essere dematerializzati e sostituiti/affiancati da archivi digitali generati dai sistemi PdM. Ad esempio, un registro di manutenzione compilato a mano può essere sostituito da un log digitale dove ogni intervento manutentivo viene registrato automaticamente con data/ora e descrizione. Perché questo sia valido legalmente, occorre che tali registrazioni siano veritiere e immodificabili. La normativa (es. art. 71 D.Lgs. 81/08) non prescrive il formato del registro di manutenzione, ma impone

l'obbligo di averlo e mantenerlo aggiornato; dunque un registro elettronico ha lo stesso valore di uno cartaceo, purché l'azienda ne garantisca l'attendibilità. In caso di ispezione, il datore di lavoro può esibire i file elettronici o dare accesso al sistema – è importante che questi riportino tutte le informazioni richieste. Ad esempio, la norma richiede di conservare verbali di verifica e comunicazioni di messa in servizio: questi documenti possono essere scannerizzati e allegati al sistema PdM, creando un fascicolo digitale sempre disponibile. In prospettiva, gli stessi verbali delle verifiche periodiche potrebbero essere emessi in formato digitale (firmati elettronicamente dal verificatore) ed integrati nel database dell'attrezzatura.

Validazione e attendibilità tecnica dei dati sensoristici: Per utilizzare i dati di PdM a fini normativi (ad esempio per dimostrare che un componente era entro limiti di sicurezza), bisogna assicurarne la qualità metrologica. Ciò implica che i sensori impiegati e i sistemi di analisi rispettino norme tecniche di riferimento. Esistono standard UNI/ISO che regolano sia i sistemi di monitoraggio sia i criteri di manutenzione basata sulle condizioni: ad esempio, la UNI EN 13306:2018 (manutenzione – terminologia) classifica gli interventi di Condition Based Maintenance (CBM) ossia manutenzione condizionale/predittiva; la serie ISO 17359:2018 e successive fornisce linee guida generali per il monitoraggio e diagnostica delle macchine, mentre la ISO 13374 definisce l'architettura dei sistemi di condition monitoring (acquisizione dati, elaborazione, indicatori) e la ISO 13381-1 riguarda i metodi prognostici (stima della vita residua). Riferirsi a tali norme garantisce che il sistema PdM sia progettato secondo criteri riconosciuti. Ad esempio, la ISO 13374 assicura che dal dato grezzo di un sensore si arrivi a un'informazione diagnostica consistente; la ISO 9712 regola la qualificazione del personale che esegue prove non distruttive (rilevante se i dati PdM includono controlli NDT come analisi termografiche, ultrasuoni, ecc.). Calibrazione periodica dei sensori è un altro elemento: i dispositivi di misura dovrebbero essere tarati e certificati. Solo con queste accortezze i dati raccolti potranno avere valore probatorio paragonabile a quello di una rilevazione strumentale fatta durante una verifica dall'ispettore.

Tracciabilità, immodificabilità e sicurezza dei dati (cloud, blockchain, firme digitali): Un rischio percepito nell'affidarsi a registri digitali e sensori è la possibile manipolazione o perdita dei dati, intenzionale o accidentale. Per fare in modo che i dati PdM siano tracciabili e inviolabili, si stanno esplorando varie soluzioni tecnologiche:

Utilizzo del cloud: Salvare i dati su cloud (idealmente su server certificati) garantisce che essi siano centralizzati e accessibili anche a distanza di anni, indipendentemente dalle vicende dell'azienda (es. cambi di software, guasti ai dispositivi locali). Inoltre il cloud facilita la condivisione controllata con terze parti (es. l'ente di vigilanza può avere un accesso dedicato). È fondamentale prevedere backup ridondanti e meccanismi di audit trail (registro delle operazioni) per sapere chi accede e se qualcuno modifica qualcosa.

Blockchain e registri distribuiti: La tecnologia blockchain offre la certificazione immutabile dei dati registrati. In pratica, ogni dato (evento di manutenzione, misura

critica) viene timbrato temporalmente e legato crittograficamente a una catena di blocchi, rendendo praticamente impossibile alterarlo senza che ciò sia evidente.
Firme digitali e dispositivi crittografici: Un approccio più semplice è l'uso di firme digitali applicate ai file di log o ai report generati. Ad esempio, al termine di ogni giornata il sistema PdM potrebbe generare un rapporto giornaliero di esercizio (con parametri max/min, eventi occorsi) e firmarlo digitalmente con un certificato riconosciuto, magari del datore di lavoro o di un ente terzo.
Standard aperti e interoperabilità: Per rendere i dati PdM davvero utilizzabili come "documentazione ufficiale", dovrebbero idealmente essere in formati standard e interoperabili. Norme ISO come la serie ISO 14224 (raccolta dati di affidabilità e manutenzione) offrono schemi su quali informazioni registrare e come classificarle – se tutti i produttori adottassero formati comuni per i log (es. un formato digitale del "libretto macchina"), gli enti di vigilanza potrebbero con facilità importarli nei propri sistemi.
Riconoscimento normativo e riferimenti legislativi: Attualmente, né il D.Lgs. 81/08 né il DM 11/2011 menzionano esplicitamente i sistemi di manutenzione predittiva o l'uso di dati da remoto. Tuttavia, essi nemmeno lo precludono: il Testo Unico obbliga il datore di lavoro a mantenere le attrezzature in buono stato di conservazione e efficienza ai fini della sicurezza (art. 71, c.1) e a farle controllare periodicamente secondo indicazioni del costruttore o norme di buona tecnica. Un sistema PdM può essere visto come uno strumento di buona tecnica che aiuta a soddisfare proprio questi obblighi in modo più rigoroso. Inoltre, se i dati sono conservati e certificati adeguatamente, possono costituire prova documentale in caso di verifiche o procedimenti legali. Ad esempio, di fronte a un incidente, poter esibire il log che mostra tutti i controlli effettuati e le manutenzioni fatte (o eventuali allarmi ignorati) avrà un peso nelle valutazioni di responsabilità. Vale la pena citare che la Commissione Consultiva Permanente (art. 6 D.Lgs. 81/08) può validare buone prassi e linee guida su proposta di INAIL o altri enti. È auspicabile che in futuro vengano validate linee guida ufficiali sull'uso di sistemi di monitoraggio continuo per la sicurezza delle attrezzature: ciò darebbe un riferimento certo a imprese e verificatori. In ambito internazionale, le norme ISO sui sistemi di gestione degli asset (serie ISO 55000) già incoraggiano l'uso di dati di condizione per prendere decisioni di manutenzione ottimali; a livello italiano, indicazioni operative da parte di INAIL o Ministero (come circolari esplicative) potrebbero sancire, ad esempio, che il registro digitale manutenzioni estratto da un PdM è accettato ai sensi dell'art.71.

5. Conclusioni

Il risultato atteso è un sistema di controllo delle attrezzature più intelligente e proattivo, in cui manutenzioni e verifiche obbligatorie non sono più vissute come adempimenti burocratici, ma come un flusso continuo di attività di prevenzione, ben supportato dalla tecnologia e in cui azienda e organo di controllo collaborano per il fine comune della sicurezza. Questo approccio è perfettamente in linea con lo spirito

del D. Lgs. 81/08 e delle norme sulla salute e sicurezza: migliorare continuamente le condizioni di lavoro attraverso l'innovazione e il miglioramento delle prassi – e la manutenzione predittiva, con i necessari adeguamenti normativi, è destinata a diventare una delle migliori prassi del prossimo futuro.

Bibliografia

[1] riferimenti normativi: d.m. 329 del 01/12/2004; d.lgs. n. 81/2008; d.m. 11/04/2011

[2] norme tecniche: UNI EN 13306:2018 Manutenzione - Terminologia di manutenzione – UNI 10147:2021 Manutenzione - Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni.

Esperienza di esercizio di una caldaia elettrica ad elettrodi immersi in supporto a una centrale a ciclo combinato

M. Calabria[1], F. Pascucci[1], G. Gorrino[2], S. Manna[2], A. Urso[3]

[1]Tirreno Power S.p.A
[2]Inail – UOT di Roma
[3]Inail – UOT di Alessandria

Sommario
In un contesto di crescita della richiesta di energia, anche da fonti rinnovabili, non sempre programmabili per la disponibilità degli impianti di produzione di energia elettrica, sono richieste soluzioni flessibili per garantire l'affidabilità e la continuità di esercizio degli impianti di produzione.
In questo contesto, Tirreno Power ha scelto di installare caldaie elettriche ad elettrodi immersi come strumento efficace a supporto dei propri cicli combinati, sempre più orientati alla transizione energetica e alla sicurezza di esercizio.
Il lavoro descrive l'esperienza operativa con generatori di vapore ad alta tensione (6kV), evidenziando le funzionalità più rilevanti: avviamento, regolazione di carico, gestione automatica dei parametri critici (conducibilità, pressione e livello).
Dal punto di vista applicativo l'impianto ha mostrato benefici concreti: drastica riduzione delle emissioni di CO_2 e NOx, rapida disponibilità di vapore in avviamento e in fermata dei cicli combinati e per il riscaldamento delle turbine a vapore nei casi di fermo prolungato.
Il presente studio vuole rappresentare un riferimento per le aziende che intendono avviare la transizione energetica assicurando nel contempo la sicurezza operativa.

1. Evoluzione degli impianti a ciclo combinato

La costante attenzione alla decarbonizzazione e il crescente utilizzo delle fonti rinnovabili richiedono nuove strategie per garantire la flessibilità e l'efficienza delle centrali termoelettriche convenzionali.
In questo contesto, l'impiego di una caldaia elettrica ad elettrodi immersi risulta un supporto operativo alle centrali a ciclo combinato può offrire vantaggi significativi: tempi di avvio e spegnimento rapidi, efficienza quasi unitaria nella conversione dell'energia elettrica in calore / vapore, riduzione di emissioni dirette da combustione e maggiore capacità di adattarsi a variazioni rapide di carico.
Il funzionamento delle caldaie ad elettrodi immersi consiste nel far passare la corrente elettrica tramite gli elettrodi attraverso l'acqua di caldaia, utilizzando il calore prodotto per "effetto Joule" dovuto al riscaldamento dell'acqua con conseguente generazione di vapore. I vantaggi di questi generatori di vapore sono principalmente il rendimento maggiore del 99 % e i tempi di risposta molto brevi per la modulazione del carico termico.

Le problematiche per l'applicazione in impianti di grandi dimensioni, soprattutto a supporto di centrali a ciclo combinato sono:

- gestione dell'acqua di alimento
- gestione e controllo dei sistemi tecnici
- impatto economico operativo.

Lo scopo della presente memoria è descrivere un'esperienza reale di esercizio in un impianto a ciclo combinato ed evidenziarne le prestazioni raggiunte e le criticità operative.

2. Descrizione dell'impianto e del sistema ausiliario

2.1 Centrale a ciclo combinato

L'impianto in oggetto di studio è una centrale termoelettrica a ciclo combinato (gas + vapore) costituita da una unità TV5 (Fig. 1) e una unità TV6 (Fig.2) rispettivamente caratterizzate dalla potenzialità di circa 760 MW, composta da due turbogas e una turbina a vapore in configurazione 2+1 (i due GVR alimentano la turbina a vapore con una linea "a forchetta") e da una potenzialità di circa 380 MW, composta da un turbogas a metano e una turbina a vapore con una configurazione 1+1.

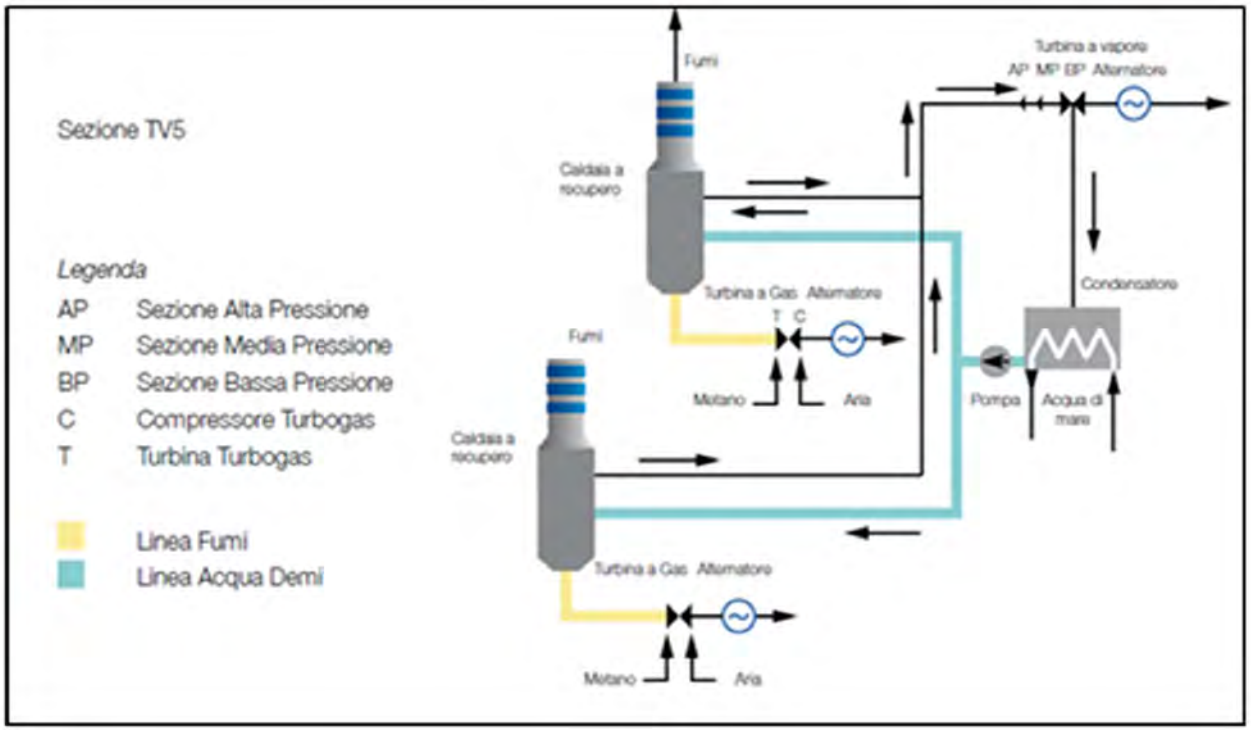


Figura1. configurazione unità TV5

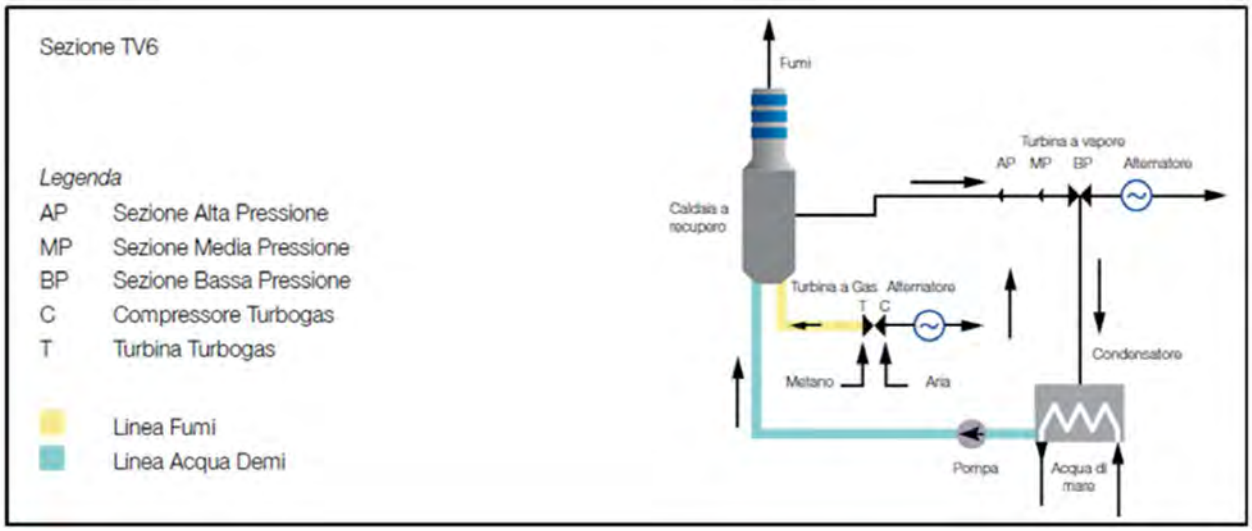


Figura 2. configurazione unità TV6

Tutte le turbine a gas e a vapore hanno alternatori coassiali collegati alla Rete di Trasmissione Nazionale a 380 kV attraverso trasformatori elevatori di taglia adeguata.
Il ciclo di produzione dell'energia elettrica impiegato richiede il funzionamento dei circuiti di seguito illustrati:

- Circuito acqua di raffreddamento e di condensazione del vapore. L'acqua è prelevata dal mare con due pompe di grande potenza (circa 1 MW cad.), viene filtrata grossolanamente e, attraverso un canale e/o linee di grandi dimensioni, raggiunge il condensatore e la stazione di raffreddamento del ciclo chiuso.
- Circuito di raffreddamento dei macchinari di produzione. Detto circuito è realizzato attraverso un sistema acqua servizi in ciclo chiuso che garantisce la portata di raffreddamento alle varie utenze d'impianto (compressori aria, pompe alimento GVR, pompe estrazione condensato, refrigeranti olio turbine, ecc..).
- Circuito acqua-vapore, in cui due pompe di estrazione (PEC) aspirano direttamente dal pozzo caldo l'acqua del condensatore spingendola fino ai corpi cilindrici di bassa pressione dei GVR.
- Circuito media e alta pressione del GVR. I circuiti sono alimentati da due pompe, con una portata doppia della producibilità del generatore caratterizzate quindi da una grande potenza (circa 1,5 MW cad.).

Il sistema che sarà approfondito nella presente memoria è quello del vapore ausiliario ovvero del vapore impiegato per alcuni servizi necessari all'avviamento o al riscaldamento delle Unità di Produzione a ciclo combinato.

2.2 Vapore ausiliario e suo impiego

Il vapore utilizzato per il sistema ausiliario è garantito dalla caldaia a elettrodi immersi fino al raggiungimento di una pressione minima nei corpi cilindrici di MP a 10 barg.
In Fig.3 è rappresentata l'architettura generale del sistema vapore ausiliario che prevede l'alimentazione dai collettori dalla caldaia ausiliaria o da una presa di vapore dedicata installata sui surriscaldatori di media pressione dei GVR.

Le utenze alimentabili dai collettori sono:
- eiettori di avviamento condensatori,
- tenute turbine a vapore,
- linee di riscaldamento gas naturale e le prese di vapore per l'esecuzione del "riscaldamento di coda" della turbina a vapore.

Le richieste di vapore sono:

- Tenute turbina pari a 4 t/h cad.;
- Eiettori per il vuoto pari a 6 t/h cad.;
- Riscaldamento metano 1,5 t/h per ogni TG.

Dalle richieste di vapore sovraesposte risulta evidente che, nell'avviamento di TV5, la richiesta di vapore è di 13 t/h mentre per TV6 si scende a 11,5 t/h.
Le caratteristiche del vapore sono: 6 bar di pressione e 270°C di temperatura.

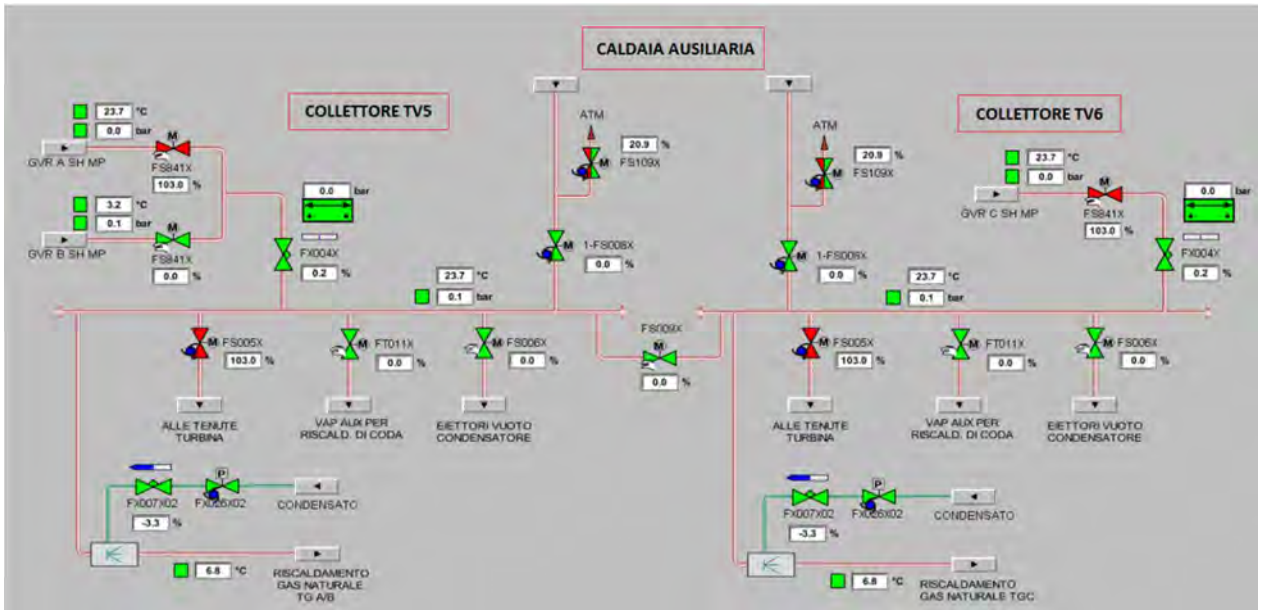


Figura 3. Sistema vapore ausiliario

2.3 Caratteristiche e descrizione caldaia elettrica

In base alle richieste di vapore viene utilizzata la caldaia elettrica ad elettrodi immersi ed il surriscaldatore aventi le caratteristiche di seguito riportate:

Caratteristiche Caldaia:

- Potenza: 10 MW
- Producibilità: 15,5 t/h
- Volume: 13.200 litri
- Design press/temp: 13bar/195°C
- Operating press/temp: 10bar/184°C
- Tensione di alimentazione elettrodi: 6 kV
- Tensione di alimentazione ausiliari: 400 V

Caratteristiche Surriscaldatore:

- Potenza: 1,4 MW
- Producibilità: 15,5 t/h
- Operating press/temp: 7 bar/335°C
- Tensione di alimentazione resistenze: 400 V
- Tensione di alimentazione ausiliari: 400 V



Al fine di migliorare la flessibilità operativa e diminuire l'impiego degli ausiliari a combustione nei transitori, è stata installata una caldaia elettrica ad elettrodi immersi con le seguenti caratteristiche principali:

- Tecnologia immersa: elettrodi immersi nel fluido d'acqua,
- Tensione di alimentazione: alta tensione (6 kV),
- Potenza nominale: 10 MW termici, capace di coprire i carichi ausiliari della centrale,
- Tempo di risposta: dal caldo allo 0-100% entro 1 – 2 minuti (hot-start), da freddo a capacità piena in ~15-30 minuti. Caratteristiche tipiche della tecnologia.
- Rendimento termico: conversione di energia elettrica a calore vicina al 100% (≈99 %) grazie all'assenza di combustione ed alle perdite minime.
- Integrazione: la caldaia è stata installata in parallelo al circuito ausiliario della centrale, con piping dedicato, alimentazione elettrica integrata e controllo remoto via PLC.



Figura 4. caldaia ad elettrodi immersi

3. Funzionamento e regolazioni principali caldaia ad elettrodi

In fig. 5 è riportato il sinottico di controllo della caldaia dove vengono rappresentate le principali regolazioni:

- Avviamento e regolazione di potenza;
- Regolazione di livello;
- Regolazione della conducibilità dell'acqua.

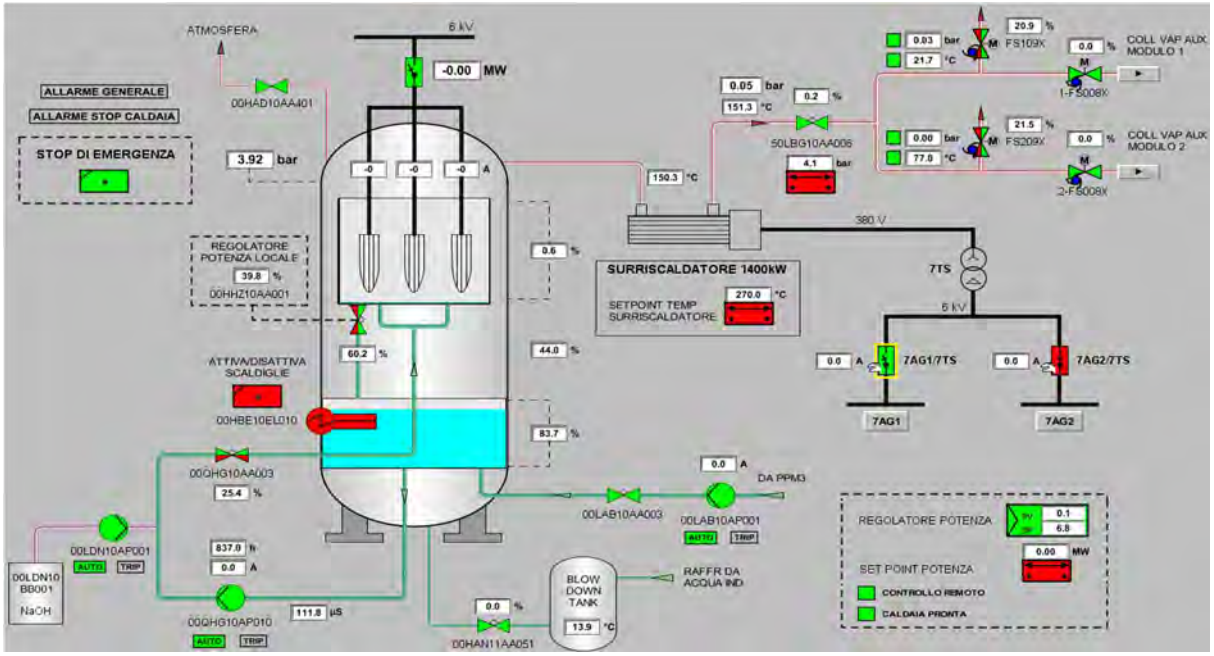
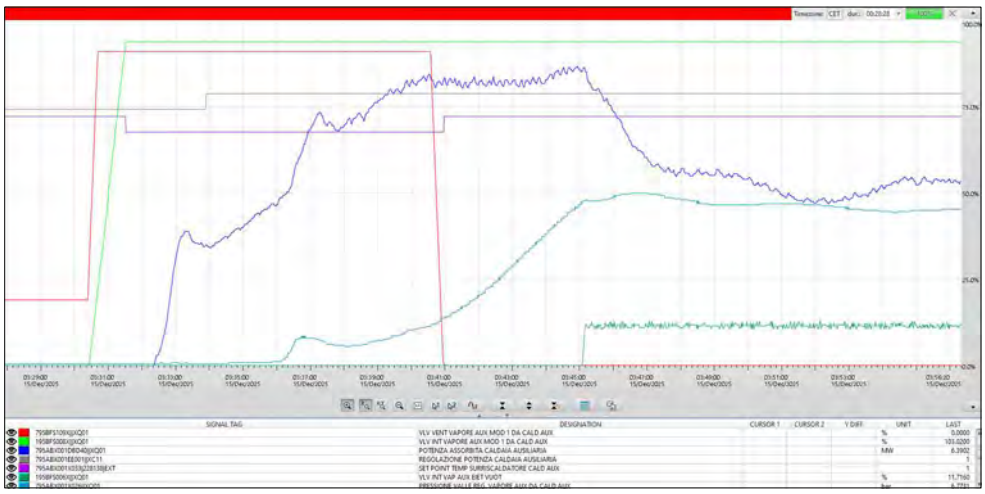


Figura 5. sinottico di controllo caldaia ad elettrodi immersi

Il prelievo di vapore viene effettuato alla stabilizzazione dei valori di setpoint della caldaia e del surriscaldatore.
In condizioni di picco o cambio rapido di regime, la caldaia si attiva per fornire vapore o acqua calda al sistema ausiliario, consentendo alla centrale di modulare l'unità turbogas con maggiore flessibilità e ridurre l'uso dei sistemi convenzionali.
Ad un maggiore prelievo di vapore la regolazione di potenza reagisce con un incremento linearmente corrispondente fino al valore massimo di carico pari a 10MW (trend in Fig.6).


Fig.6 (grafico registrazione valori)

3.1 Regolazione di livello

Per analizzare la regolazione di livello si deve considerare che in una caldaia ad elettrodi immersi, la potenza dissipata nell'acqua è, come riporta l'Elettrotecnica di base, $P = R \times I^2$, dove R è la resistenza elettrica del volume d'acqua. La resistenza elettrica del fluido è

pari a R = L/σ·A dove L è la di distanza media tra gli elettrodi, A è la sezione attraversata dalla corrente e σ la conducibilità dell'acqua.
La potenza dissipata nell'acqua è pari a $P=V^2 \cdot \sigma \cdot A/L$ ed essendo l'area A linearmente dipendente dal livello di acqua (h) contenuta nella parte superiore della caldaia, si può dire che $P \propto V^2 \cdot \sigma \cdot h$.
A parità di tensione di alimentazione degli elettrodi (nello specifico 6 kV), numero delle fasi (nello specifico 3), dimensione/forma degli elettrodi e conducibilità (pari a 100 uS·cm) si conclude che P = K·h.
La regolazione è affidata ad una pompa alimento e due valvole:

- Pompa circolazione caldaia spinge l'acqua dalla parte inferiore alla parte superiore della caldaia;
- Valvola di circolazione caldaia di regolazione pressione mandata della sua pompa circolazione;
- Valvola di regolazione livello superiore per le richieste di carico imposte dal prelievo di vapore delle utenze.

In figura 7 (Fig.7) è possibile notare che esiste un legame lineare tra potenza e livelli superiore e inferiore:

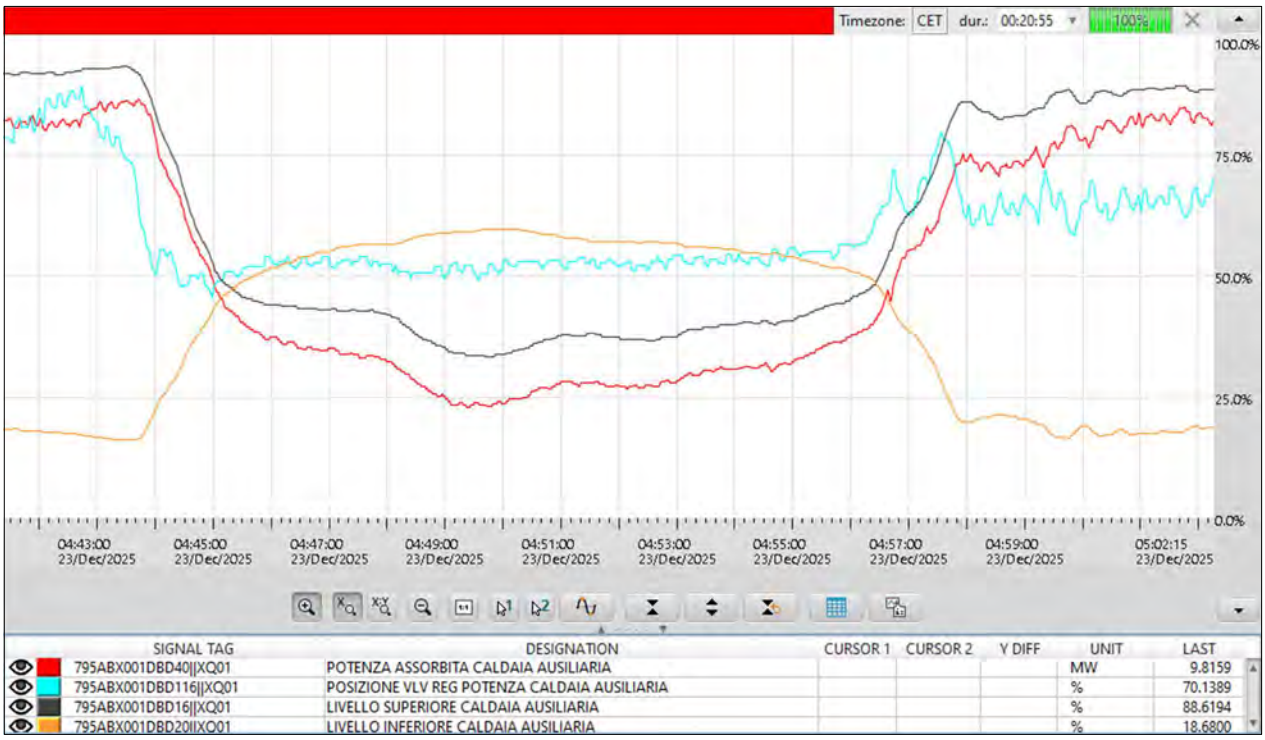


Figura 7. grafico potenza livelli caldaia

3.2 Regolazione di conducibilità

Il tipo di generatore preso in esame richiede una conducibilità dell'acqua pari a 100 uS·cm. Per ottenere tale condizione ci si avvale di una pompa di dosaggio che si avvia tutte le volte che la conducibilità scende sotto la soglia di regolazione (Fig.8):



Figura 8. grafico conducibilità

4. Vantaggi dell'utilizzo della caldaia a elettrodi immersi

Un vantaggio introdotto nell'impianto oggetto di studio dall'utilizzo della caldaia a elettrodi immersi rispetto alle caldaie a gas naturale è facilmente calcolabile, se si considera che i tempi di avviamento e messa a disposizione del vapore ausiliario ottenibile ora sono molto minori dei precedenti (1 ora vs. 3,5 ore):

- Start con caldaia gas = 1.500 Smc/ora x 3,5 ore x 0,01 MWh/Smc = 52,5 MWh/start;
- Start con caldaia elettrica = 11 MW x 1 ora = 11 MWh/start.

4.1 Riscaldamento di coda turbine a vapore

Le modalità di avviamento delle Unità a ciclo combinato sono funzione della temperatura del metallo cassa interna di alta pressione delle turbine a vapore (Fig.9):

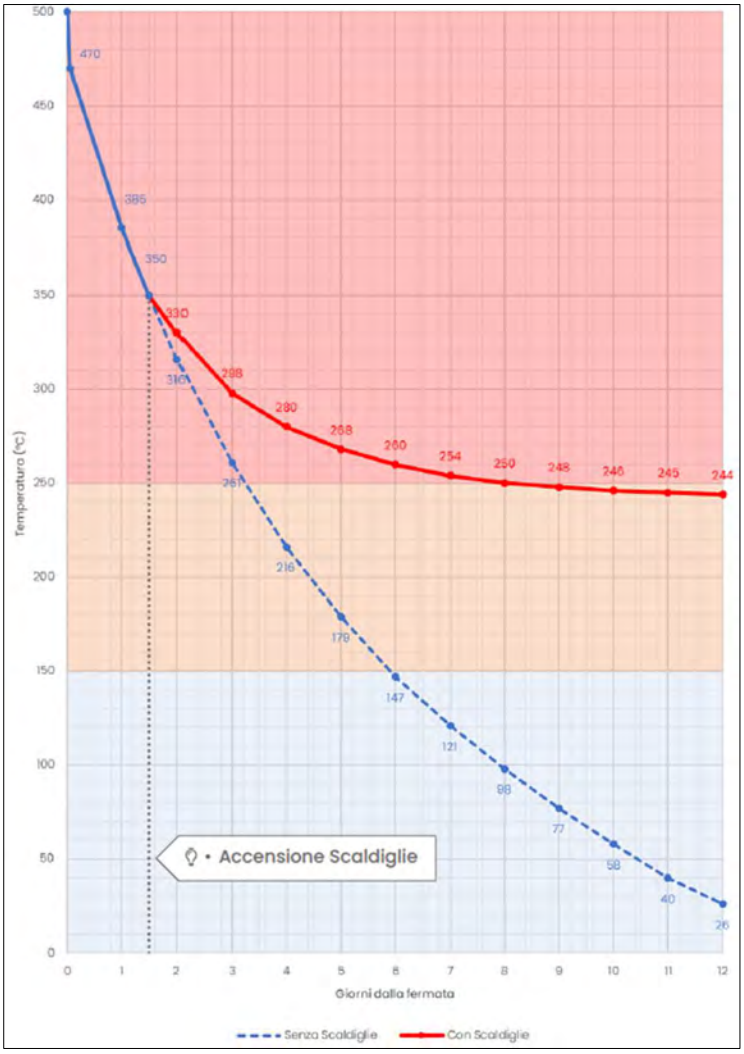


Figura 9. temperatura mantello cassa turbina

Un avviamento si definisce “da caldo” quando la temperatura del metallo è superiore a 350°C e di norma ciò si ha quando l’Unità è ferma da meno di 2 giorni, si ha “da tiepido” quando la temperatura metallo è compresa tra 150 e 350°C, condizione che si ha quando l’Unità è ferma da 2 a 6 giorni. L’ultimo caso è quello degli avviamenti “da freddo” che si hanno per fermate più lunghe di 6 giorni.
Il riscaldamento di coda (per “coda” si intende lo scarico della sezione di alta pressione della turbina a vapore) è una pratica sviluppata da Ansaldo che consiste nell’immettere vapore ausiliario riscaldando delicatamente il metallo turbina con l’obiettivo di ridurre i costi di avviamento ed il consumo di vita delle turbine. Immettendo vapore ausiliario in turbina si riesce ad innalzare la temperatura metallo dai 150°C iniziali fino a 250°C, garantendosi la possibilità di avviare “da tiepido” invece che “da freddo”.
In questa analisi, non considerando il consumo di vita dei rotori delle turbine a vapore, si riportano i volumi di gas necessari per avviare le Unità Tirreno Power sia in configurazione 1+1 che, soprattutto, in 2+1 (Tab.1):

Consumo gas avviamento (kSm^3)		
	Unità configurazione 1+1	**Unità configurazione 2+1**
	TV6	TV5
Caldo	23	45
Tiepido	35	55
Freddo	50	90

Tabella1. consumo di gas

Come si nota da Tab.1 il risparmio di gas ottenuto nel passare da freddo a tiepido è mediamente dell'ordine del 40% e si ottiene con circa 5 ore di riscaldamento (50 MWh di energia elettrica necessaria).

5. Conclusioni

I cicli combinati svolgono un ruolo fondamentale nel fornire energia alle reti elettriche, supportando l'affidabilità e la resilienza durante i periodi di elevata domanda. A seconda delle condizioni della rete elettrica potrebbero dover essere utilizzate per diverse ore al giorno, o solo occasionalmente durante la settimana, o forse anche solo poche volte all'anno.

Tuttavia, indipendentemente dalla frequenza del ciclo, le Unità a ciclo combinato garantiscono sostegno al sistema nei picchi di carico e/o in carenza di fonti rinnovabili.

Una delle sfide per le centrali CCGT in questo senso è rappresentata dall'avvio rapido delle turbine a vapore dopo essere state fuori servizio.

Per essere pronti a fornire energia il più rapidamente possibile, gli impianti CCGT utilizzano caldaie ausiliarie per ridurre il tempo di avviamento a freddo delle turbine a vapore riuscendo anche a ridurre l'impatto emissivo ed incrementando l'efficienza generale dell'impianto.

In conclusione, è utile sottolineare un aspetto che non è stato analizzato nella presente memoria che riveste una grande importanza, soprattutto nel revamping di impianti preesistenti: la versatilità nella collocazione delle apparecchiature.

Bibliografia

[1] "Immersed-type electrode boilers" – CTI for Industry.

[2] "High-voltage electrode boiler technology analysis: principles, advantages and application panorama" – FangKuai Boiler Co., Ltd.

[3] "Electrode boilers are ideal for quickly, efficiently supplying auxiliary steam and hot water" – Del Williams, ACHR News.

[4] "Immersed Electrode Hot Water Boiler" – A.E.P. Thermal Inc. – CEJW Series Brochure.

[5] "Future opportunities for electrification to decarbonise UK industry" – ERM & Department for Energy Security and Net Zero (UK).

La conduzione da remoto dei generatori di vapore

A. Tonti[1], I. Mazzarelli[2], I. Mazzarelli[3]

[1]Inail - Dit
[2]Inail - Uot di Milano
[3]Inail - Uot di Napoli

Sommario
Il lavoro ha lo scopo di analizzare la legislazione e la normativa di riferimento relativa alla conduzione dei generatori di vapore, attraverso un'analisi storica e lo sviluppo di nuovi sistemi automatici per tali attrezzature ed insiemi. Sono illustrati stralci dei recenti standard europei che ammettono la conduzione da remoto e verranno messi in evidenza i nuovi requisiti che consentono tale modalità di conduzione. E' stata posta l'attenzione sul tema dei requisiti dei sistemi di controllo e la relazione con i requisiti della cyber security. Dato il recente recepimento degli standard europei la memoria vuole fornire esclusivamente spunti per lo sviluppo di sistemi affidabili e protetti, considerazioni finali saranno a riguardo dell'impatto che tali tecnologie potrebbero avere in termini di adeguamento dei regolamenti e delle norme nazionali.

1. Cenni storici sulla conduzione dei generatori di vapore e attuale quadro normativo nazionale

La conduzione continua dei generatori di vapore ed acqua surriscaldata è imposta dall'art. 27 del Regio Decreto del 12 maggio 1927 n. 824, ad eccezione dei generatori già esclusi dall'art. 3 del R.D. e quelli previsti nell'art. 4 e successivi aggiornamenti. Ulteriore esclusione dal regime di conduzione abilitata e continua era prevista per i cosiddetti "generatori esonerati", individuati dapprima con il D.M. 27 ottobre 1969, sostituito successivamente dal D.M. 21 maggio 1974, che individuava due tipologie di esoneri: dalla conduzione abilitata (artt. 28, 29, 39, 41), dalla conduzione continua (art. 28, 29, 39, 43), prevedendo una presenza discontinua per l'esecuzione di specifiche attività di ispezione, controllo e verifica (prove). Nella tabella 1 sono indicate le tipologie di esoneri nei vari casi ed i dispositivi di protezione per la concessione degli stessi.

2. La PED e le norme armonizzate europee sulla conduzione di generatori di vapore a tubi da fumo

L'entrata in vigore della prima Direttiva PED nel 1997 con la conseguente emanazione del decreto di recepimento D.Lgs 93/00 e l'emanazione del D.M. 329/04 in materia messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi, ha modificato sostanzialmente la materia dell'esonero. Le norme armonizzate europee sono state revisionate per introdurre i concetti di *sistemi di*

sicurezza degli insiemi (vedere la prima versione della EN 12953-6:2002) e di *conduzione discontinua*.

Art.	Tipo di generatore di vapore o acqua surriscaldata	Esonero dall'applicazione del/della	Dispositivi per l'esonero dalla conduzione continua (Raccolta E)
28**	GV con PS*V ≤ 300 bar*l e PS ≤ 10 bar	seconda valvola di sicurezza secondo mezzo di alimentazione secondo indicatore di livello patente del conduttore	regolatore di pressione e di livello pressostato di blocco due livellostati di blocco di minimo livello
29	GV ad attraversamento meccanico con PS*V ≤ 2940 bar*l e PS ≤ 11.76 bar		regolatore di pressione pressostato di blocco flussostato di blocco termostato di blocco
39	GV con PS ≤ 0.98 bar, S ≤ 100 m^2 e P ≤ 2 t/h ($G_{H2Osurr}$ con PS ≤ 0.98 bar, S ≤ 100 m^2 e P ≤ 2 t/h)	dimensionamento della valvola di sicurezza secondo l'art. 16 del RD 824/27 con dimensionamento secondo la raccolta E applicazione di mezzi meccanici di alimentazione, patente del conduttore	regolatore di pressione e di livello pressostato di blocco due livellostati di blocco di minimo livello
41	GV a sorgente termica diversa dal fuoco (compresi gli elettrici ed esclusi quelli in impianti nucleari)	secondo indicatore di livello secondo mezzo di alimentazione, dimensionamento della valvola di sicurezza secondo l'art. 16 del RD 824/27 con dimensionamento secondo la raccolta E patente del conduttore	Non applicabile
43	GV a funzionamento automatico* con PS ≤ 14.7 bar e P ≤ 3 t/h	Presenza continua del conduttore	Regolatore combustibile Regolatore di livello Pressostato di blocco Livellostato di blocco Controllo fiamma

**eccetto quelli con combustibili solidi non polverizzati*
***esclusi dal D.M. 329/04*

Tabella 1. Esoneri dalla conduzione e relativi accessori di sicurezza

Il 18 marzo 2004 il Working group pressure (WGP) emanò a livello europeo la guideline 8/15 (oggi H-15 versione del 8 gennaio 2016 aggiornata alla Direttiva 2014/68/UE), la quale forniva chiarimenti riguardo i concetti di funzionamento automatico e requisiti specifici dei dispositivi atti a consentire una conduzione discontinua a 24 ore, lasciando in capo agli stati membri la facoltà di introdurre ulteriori requisiti fino a 72 ore, che ribadiamo non possono essere in contrasto con quelli già individuati nelle norme armonizzate a livello europeo ove disponibili.
Il Ministero del Lavoro, della Salute e delle Politiche Sociali il 29 gennaio 2009 ha emanato la circolare 1/2009 nella quale correttamente, per "le apparecchiature" marcate CE secondo la Direttiva 97/23/CE, dovevano essere disattese le previgenti

disposizioni legislative al D.M. 329/04 in materia di assistenza continua o discontinua, nonché evidentemente i requisiti previsti per tali casi nella Raccolta E ISPESL. Con il Decreto Ministeriale 7 agosto 2020 (per i generatori di cui agli ex artt. 29, 39, 41 del D.M. 21.05.1974) e con la nota INAIL 5475/2021 sono stati successivamente stabiliti i criteri per il rilascio dell'esonero, mentre per i generatori di cui all'ex artt. 43 trova applicazione il concetto di conduzione discontinua a 24 o 72h fissato dal fabbricante.
Si è reso necessario aggiornare le specifiche tecniche nazionali, quindi l'UNI ha pubblicato e aggiornato nel tempo due specifiche tecniche in materia di sorveglianza dei generatori di vapore e acqua surriscaldata, elaborate dal CTI ai sensi dell'art. 3 del D.M. 329/04:

- la UNI/TS 11325-3 (oggi alla terza edizione 2021) che si applica a tutti i generatori tranne quelli esclusi dalla PED e dal D.M. 329/04, e quelli esonerabili di cui agli artt. 29 (nuovo limite PS*V ≤ 3000 bar*l e PS ≤ 12 bar), 39 e 41;
- la UNI/TS 11325-10 non esclusi dalla PED e dal D.M. 329/04 ed esclusi dal campo di applicazione della UNI/TS 11325-3;

Veniamo ai giorni nostri, la norma UNI EN 12953-6 edizione 2024 per i generatori di vapore e acqua surriscaldata a tubi da fumo apre una "*nuova frontiera*", in quanto consente la conduzione discontinua per un tempo definito dal fabbricante oltre le 72 ore, dotando il generatore anche di un limitatore o un dispositivo di monitoraggio in continuo della conducibilità dell'acqua di caldaia individuato sulla base dell'analisi di rischio del fabbricante dell'insieme. Nella tabella 2 sono illustrate le varie possibilità in funzione della potenzialità del generatore e della modalità di conduzione discontinua. È evidente che in caso di superamento delle 72h il fabbricante dell'insieme dovrà anche indicare i requisiti di manutenzione e prova specifici previsti dal requisito essenziale di sicurezza 2.11.1 della Direttiva PED, che non potranno essere orientati alle frequenze pari a 72 ore previste dall'annesso C informativo della norma EN 12953-6 Tabella C1, ma dovrà stabilirne una frequenza superiore a tale limite e garantire l'affidabilità di tutto il sistema di sicurezza entro tale limite.

Potenzialità del generatore in MW	**Tipo di conduzione**	**Dispositivo richiesto**	**Azione**	**Ritardo azione**
Non superiore a 18,2 (H_{gas}) e 14 (H_{oil})	Continua o discontinua ≤ 24h	Una misura quotidiana	Quelle previste nel manuale d'uso del generatore	Non specificato
Superiore a 18,2 MW (H_{gas}) e 14 MW (H_{oil})	Continua o discontinua ≤ 24h	Dispositivo di monitoraggio in continuo conforme all'annesso F del EN 12953-6	Interruzione del generatore e blocco della fonte dell'alimentazione di energia	
Qualsiasi	Discontinua > 24h e ≤ 72h		Interruzione del generatore e blocco della fonte dell'alimentazione di	Specificato dal fabbricante (2)

			energia	
Qualsiasi	Discontinua > 72h	In base ai risultati dell'analisi di rischio del fabbricante (1) un limitatore conforme al EN12953-9 o un dispositivo di monitoraggio in continuo conforme all'annesso F del EN12953-6	Interruzione del generatore e blocco della fonte dell'alimentazione di energia	Specificato dal fabbricante (2)
(1) la scelta dipende dall'analisi di rischio del fabbricante condotta anche con riferimento al punto 5.5.4 della EN 12953-3 (2) È consentito un ritardo ulteriore in base all'analisi di rischio condotta sull'impianto				

Tabella 2. Dispositivi per il monitoraggio della conducibilità dell'acqua di alimento di generatori di vapore

3. Conduzione da remoto nel quadro normativo europeo

La norma UNI EN 12953-6: 2024 ha introdotto un'ulteriore novità che riguarda il superamento del concetto di conduzione effettuata direttamente nel locale caldaia o dalla sala controllo di sito, prevedendo la possibilità di "*conduzione da remoto*" nel sito oppure in un luogo diverso dal sito di installazione del generatore. Questo assunto deriva anche dalla recente pubblicazione della norma EN 12953-1:2025 che fornisce un quadro completo di nuove definizioni. Nell'annesso E della UNI EN 12953-6, di tipo informativo, sono stati introdotti requisiti per le sale controllo poste in un sito diverso da quello dello stabilimento ove è installato il generatore (quella che ci abitueremo a chiamare "*conduzione da remoto*"). Permane infatti l'obbligo di presenza dell'operatore nel locale caldaia con conseguenti "interventi manuali" dopo un blocco a freddo (in tale fase non è possibile alcun reset da remoto). Ove espressamente specificato nel manuale d'uso, sarà possibile effettuare il "*reset da remoto*" dopo la fase di investigazione e ripristino delle condizioni anomale. Per la modalità di conduzione da remoto particolari requisiti sono individuati nell'annesso E della UNI EN 12953-6: nella fase di conduzione deve essere assicurata la comunicazione tra gli operatori in campo e da remoto e devono essere considerati tutti i rischi relativi alla cybersecurity, che andranno valutati anche con riferimento ai requisiti tecnologici richiesti nella Direttiva 2016/1148/UE (recante misure per un livello comune elevato di sicurezza delle reti e dei sistemi informativi nell'Unione), negli standard EN IEC 62443 (serie di norme sulla sicurezza dei sistemi di automazione e controllo industriali) ed in particolare la norma IEC 62443-3-1 (*Security technologies for industrial automation and control systems*), nonché la norma UNI CEN ISO/TR 22100-4:2021 (*Guidance to machinery manufacturers for consideration of related IT-security – cyber security - aspect*). È da segnalare che l'inchiesta pubblica della norma EN 12953-6 si era già conclusa alla data del 18 ottobre 2024: dopo tale data entra in vigore la nuova Direttiva 2022/2555/UE che abroga la Direttiva 2016/1148/UE; pertanto, i riferimenti vanno ora intesi alla nuova Direttiva.

4. Cybersicurezza e requisiti essenziali di sicurezza

Per “cybersicurezza” come riportato nel Regolamento 2019/881/UE occorre intendere l’insieme delle attività necessarie per proteggere la rete e i sistemi informativi, gli utenti di tali sistemi e altre persone interessate dalle minacce informatiche, costituite essenzialmente da attacchi informatici a una rete di comunicazione industriale e a centri di condivisione e analisi delle informazioni basati su computer e reti. In caso quindi di conduzione da remoto “off site oppure on site” dove esiste la possibilità di scambio dati tra il controllore logico del generatore ed un sistema informatico e di rete (pubblica e/o privata) dovrà essere valutato il rischio per la cibersicurezza.

La definizione di sistema informativo e di rete è contenuta nell’art. 6 della Direttiva 2022/2555/UE, tale sistema contiene una rete di comunicazione elettronica, qualsiasi dispositivo o gruppo di dispositivi interconnessi o collegati, che eseguono un'elaborazione automatica di dati digitali, i dati digitali conservati, elaborati, estratti o trasmessi. La protezione, quindi, deve essere garantita per gli apparati e per i dati e quindi per hardware e software, oltre che per i sistemi di trasmissione (cavo, radio, fibre ottiche, reti satellitari, reti mobili e fisse, etc.).

Sovente un generatore di vapore certificato come insieme ricade anche in alcuni requisiti della Direttiva Macchine 2006/42/CE e quindi dal 14.01.2027 troverà applicazione il nuovo Regolamento macchine 2023/1230, prima disposizione che individua requisiti essenziali di sicurezza specifici per aspetti legati alla Cybersecurity.

Il requisito essenziale di sicurezza 1.1.9 (Protezione dall'alterazione) del Regolamento macchine 2023/1230 chiede che “*la macchina o il prodotto correlato devono essere progettati e costruiti in modo tale da fare sì che il collegamento ad essi di un altro dispositivo, tramite qualsiasi caratteristica del dispositivo connesso stesso o tramite qualsiasi dispositivo remoto che comunica con la macchina o il prodotto correlato, non determini una situazione pericolosa*”.

Esiste quindi una relazione univoca tra sicurezza del macchinario ed IT-security (vedere la norma UNI CEN ISO/TR 22100-4:2021), gli attacchi di Cyber Security possono compromettere le misure di safety previste ed implementate sul macchinario. Quindi è necessario effettuare un’attenta valutazione del rischio per la safety del macchinario in conformità con lo standard CEI EN IEC 62443-3-2 anche nel contesto della sicurezza informatica. Ciò si traduce nello studio di vulnerabilità a potenziali attacchi/incidenti cyber che possono diminuire la sicurezza del macchinario e quindi, se necessario, adottare soluzioni di safety intrinseche ed altre misure tecniche supplementari di protezione (misure di mitigazione dei rischi).

Nel documento Nist 800-82r2 (Appendice C - Threats to ICS) vengono riportati gli elementi rappresentativi delle possibili minacce ai sistemi di produzione.

5. Lo standard IEC 62443-3-1

La norma IEC 62443-3-1 stabilisce le tecnologie di sicurezza per i sistemi di automazione e controllo industriale e deve essere applicata congiuntamente alle parti 3-2 “Valutazione del rischio di sicurezza nel progetto di sistema” e 3-3 “Requisiti

per la sicurezza informatica e i livelli di sicurezza informatica di sistema". La scelta della tecnologia opportuna deve essere basata su un'attenta analisi dei rischi condotta mediante la norma IEC 62443-3-2, approfondiremo maggiormente gli aspetti legati alle tecnologie di filtraggio e blocco, al rilevamento degli attacchi informatici e ai software utilizzati per i cosiddetti IACS "Industrial Automation and Control System", non tratteremo gli aspetti legati al controllo di sicurezza fisica per l'accesso ai sistemi e agli aspetti di autenticazione e autorizzazione del conduttore.
I produttori di componenti dovranno attenersi agli standard IEC 62443-4-1 che definisce i requisiti di sicurezza per l'intero ciclo di vita dello sviluppo dei prodotti, (progettazione sicura, implementazione, verifica e gestione dei difetti e delle patch) e IEC 62443-4-2 che definisce i requisiti tecnici di sicurezza per i singoli componenti dei sistemi industriali, assicurando che ogni componente possa funzionare in modo sicuro all'interno dell'ambiente IACS.

5.1 Tecnologie di filtraggio/blocco/controllo degli accessi

Le tecnologie di controllo degli accessi sono tecnologie di filtraggio e blocco progettate per dirigere e regolare il flusso di informazioni tra dispositivi o sistemi una volta che l'autorizzazione è stata determinata. Per la conduzione "onsite" i firewall statici o dinamici, di rete e/o host, sono la forma più comunemente utilizzata di questa tecnologia. Questo sistema è efficace se il server aziendale è residente nel sito del generatore, ci si limita ad assicurare opportuni firewall della LAN. Quando l'applicativo utilizzato non è residente è possibile utilizzare sistemi Proxy. Le configurazioni tipiche limitano il flusso di dati da e verso la rete di controllo dei processi in base a una combinazione di indirizzi IP, porte e applicazioni consentite per la comunicazione, è possibile installare sistemi di rilevamento delle intrusioni (IDS) e collegare firewall che consentano a un sistema IDS di rispondere a una minaccia alla sicurezza, ad esempio bloccando i firewall. Il limite principale è costituito dal fatto che i firewall non sono progettati per applicazioni dell'industria di processo (DCS, SCADA), rendendo difficile personalizzare il filtraggio per una sicurezza ottimale. I firewall in genere non proteggono le workstation dalla maggior parte degli attacchi basati sui dati (ad esempio, virus), da alcuni attacchi denial-of-service, attacchi di ingegneria sociale e da malintenzionati interni e non proteggono dal tunneling su protocolli applicativi consentiti da parte di applicazioni infette o mal scritte. Quindi l'implementazione di firewall non elimina la necessità di implementare controlli software sulle reti interne o un'adeguata sicurezza host sui server. In un ambiente IACS, i firewall basati su host sono ancora relativamente rari, in particolare su dispositivi di controllo o workstation critici. La maggior parte dei sistemi operativi basati su controller non consente l'implementazione di questo tipo di software e alcuni fornitori di HMI potrebbero vietarne l'utilizzo sulle proprie workstation per garantirne il corretto funzionamento o per non compromettere la garanzia. Il problema di compatibilità del firewall host è dovuto al fatto che molti fornitori di DCS testano e convalidano i propri sistemi con un set controllato di applicazioni sull'HMI.

Un fornitore può invalidare la garanzia del DCS se un utente aggiunge software al sistema a causa della potenziale interferenza con i sistemi critici. In genere è opportuno usare reti VLAN (o reti FAN basate su fieldbus) dinamiche mediante switch Ethernet che suddividono le reti fisiche in reti logiche più piccole per aumentare le prestazioni, migliorare la gestibilità e semplificare la progettazione della rete, oltre a isolare il traffico dalle altre VLAN. In questo caso è necessario valutare ad attacchi come lo spoofing del controllo di accesso ai media (MAC), gli overflow delle tabelle e gli attacchi contro i protocolli spanning tree, a seconda del dispositivo e della sua configurazione. Questi attacchi non possono essere condotti da remoto e richiedono l'accesso fisico locale allo switch. Lo standard IEC 62443-3-1 specifica anche requisiti relativi alla crittografia che non sono trattati per brevità nel presente lavoro, per una conduzione “onsite” da sala controllo potrebbe essere sufficiente una crittografia a chiave segreta o pubblica quando i dati passano attraverso reti geografiche o Internet verso utenti o personale di supporto esterni, le comunicazioni dovrebbero essere crittografate per proteggere sia la riservatezza che l'integrità dei dati. Per la conduzione “offsite” è opportuno invece affidarsi ad Reti private virtuali (VPN) integrata alla LAN aziendale, in tal caso occorre effettuare un’analisi dei rischi per la rete e le workstation da attacchi basati sui dati (ad esempio, virus), da alcuni attacchi denial-of-service, da attacchi di ingegneria sociale e da malintenzionati interni, oltre a dover affrontare le problematiche di potenziale latenza dell’intero sistema.

5.2 Strumenti di gestione, audit, misurazione, monitoraggio e rilevamento

Queste tecnologie includono sistemi di rilevamento virus, sistemi di rilevamento delle intrusioni, utilità di registrazione/audit degli host, motori di correlazione degli eventi e strumenti di analisi forense di rete. Un’attività fondamentale è l’auditing dei log finalizzata a mantenere un controllo delle tracce e dei vari file e voci creati da un attacco informatico, anche ai fini di una successiva riparazione dei file, oltre a verificare la regolarità di accessi e azioni su hardware e software. Le attività critiche nella gestione della rete in un ambiente IACS sono la gestione della sicurezza e dell'autenticazione, la gestione dell'integrità del registro (gestione degli script) e dell'installazione e tutte quelle funzioni che possono integrare un'attività di qualificazione dell'installazione e operativa negli ambienti di produzione regolamentati. Altro importante aspetto riguarda l’implementazione di sistemi di rilevamento dei virus e del loro aggiornamento continuo, nonché l’adozione di un sistema di antintrusione di rete (NIDS) che agiscono sul traffico dati o host (HIDS) e sui file di registro di sistema. La combinazione dei sistemi assicura un monitoraggio da usi impropri sia all'interno che all'esterno della rete. Per i sistemi NIDS può essere utilizzato uno sniffing passivo tramite un'interfaccia promiscua sulle sottoreti di rete, che monitora tutto il traffico sulle specifiche sottoreti a cui è collegato l'IDS e confronta il traffico con un insieme di regole che determinano se il traffico indica un attacco. Questa tecnica è il metodo predominante per implementare i NIDS, oppure

una distribuzione in linea in cui la funzionalità NIDS si trova nel percorso di inoltro delle comunicazioni tra computer, il codice NIDS è incorporato in router, firewall e dispositivi NIDS autonomi. Nei sistemi HIDS invece gli IDS vengono installati su ogni macchina per monitorare e verificare le azioni sul computer e confrontarle con la policy HIDS. Un NIDS funge da dispositivo di difesa monitorando il traffico di rete alla ricerca di minacce che sfruttano le vulnerabilità note sui computer in rete, fornendo allarmi per gli attacchi contro queste vulnerabilità e catturando il traffico dell'attacco che ha attivato l'allarme.
Quando distribuito in linea, il NIDS acquisisce anche la capacità di ignorare il traffico che corrisponde a una firma di attacco e impedire all'attacco di sfruttare la vulnerabilità. Questa nuova capacità si riflette nell'introduzione sul mercato del termine "sistemi di prevenzione delle intrusioni". Gli HIDS prevedono il caricamento di software su un computer e l'esecuzione di una serie di funzioni da parte di tale software al fine di rilevare e prevenire gli attacchi al computer. I sistemi HIDS variano nella loro tecnica di rilevamento delle intrusioni. Le applicazioni tipiche includono: • Monitoraggio del traffico in entrata e in uscita dal computer • Esecuzione di controlli di integrità dei file • Monitoraggio di comportamenti sospetti di utenti o applicazioni.
Il personale addetto alla sicurezza IT in genere esegue la scansione di reti e dispositivi nell'ambito di test di vulnerabilità di routine e valutazioni della sicurezza. Queste scansioni vengono utilizzate per determinare il livello di sicurezza e le violazioni delle policy, come la mancata applicazione delle patch di sicurezza o configurazioni non protette. In alternativa è possibile utilizzare strumenti di gestione della configurazione host (HCM) per gestire le risorse in modo centralizzato, controllare l'accesso ai sistemi e impostare un livello di sicurezza generale per ciascun host su una rete. Questi strumenti semplificano il monitoraggio del software e dell'hardware disponibili su ciascun host e l'impostazione di una configurazione software e hardware standard, che spesso si traduce in un risparmio di costi e tempo nella gestione dei computer. Per trarre il massimo vantaggio dagli strumenti di gestione della configurazione host, una rete deve applicare policy rigorose per l'utilizzo e la sicurezza del sistema, avere un ambiente hardware e software abbastanza omogeneo ed essere una rete di grandi dimensioni o molto estesa. I sistemi di automazione e controllo industriale in genere non utilizzano strumenti HCM a causa della natura basata sulle policy degli strumenti.

5.3 Software per sistemi di controllo e automazione industriale

Lo studio dei software del sistema è basato sull’analisi di tre componenti chiave utilizzate negli IACS: sistemi operativi per server e workstation, sistemi operativi real-time ed embedded, Server web e tecnologie Internet. Nell'ambiente dei sistemi di automazione e controllo industriale, gli host SCADA, i computer di stabilimento e le stazioni HMI utilizzano in genere gli stessi sistemi operativi server e workstation comuni al mondo IT (principalmente Windows® e UNIX®). PLC, RTU, controller DCS e altre apparecchiature di acquisizione dati utilizzano in genere sistemi operativi

specializzati in tempo reale o embedded. I sistemi operativi UNIX®, Linux® e Windows® basano la sicurezza sul concetto di controllo di accesso discrezionale (DAC) Il DAC non impone una politica di sicurezza a livello di sistema e le misure di protezione sono in gran parte sotto il controllo dei singoli utenti. Qualsiasi programma eseguito da un utente eredita tutte le autorizzazioni di quell'utente ed è libero di modificare qualsiasi file a cui l'utente possa accedere. Pertanto, i sistemi operativi basati su DAC sono vulnerabili ad attacchi di virus e trojan. Stanno iniziando ad apparire versioni ad alta sicurezza di sistemi operativi diffusi, come Microsoft Next-Generation Secure Computing Base, National Security Administration (NSA), Security Enhanced Linux® e Hewlett Packard Secure OS for Linux®. Questi sistemi attualmente incorporano uno o più dei seguenti concetti di sicurezza: file system crittografati, disabilitazione di porte di rete non necessarie e firewall lato client. Un sistema operativo real-time (RTOS) garantisce che gli interrupt vengano gestiti entro un certo tempo massimo specificato, rendendolo quindi adatto per il controllo e altre applicazioni time-critical. In genere, un RTOS viene implementato in sistemi embedded che presentano severi vincoli di risorse rispetto ai computer desktop o workstation convenzionali. I sistemi operativi in tempo reale sono ampiamente utilizzati negli IACS come software chiave nelle apparecchiature di acquisizione e controllo dati come RTU, PLC, IED e controller DCS. Questi sistemi dispongono in genere di una varietà di porte di ingresso e uscita digitali, analogiche e per contatori di impulsi collegate a sensori e attuatori che monitorano e controllano un processo fisico. Dispongono inoltre di almeno una connessione di rete che funge da interfaccia principale con il dispositivo da computer host che eseguono HMI, SCADA o software di controllo. Le connessioni di rete possono essere interfacce seriali per dispositivi situati in postazioni remote che utilizzano collegamenti radio o telefonici verso un sito centrale. Altri dispositivi supportano reti industriali specializzate, come Foundation Fieldbus®, PROFIBUS® e ControlNet®. Sempre più spesso, i sistemi embedded forniscono una connessione di rete TCP/IP e incorporano servizi Internet come e-mail, trasferimenti di file FTP e persino server Web. Queste connessioni di rete vengono utilizzate per: • Richiedere trasferimenti di dati dal dispositivo (polling) • Trasmettere dati o notifiche di eventi al computer host (segnalazione per eccezione) • Scaricare parametri operativi come limiti di allarme e setpoint • Accendere o spegnere le uscite o, nel caso di un'uscita analogica, regolarne il valore • Scaricare programmi applicativi nuovi o aggiornati.

I fornitori di software SCADA e di storico in genere forniscono server Web come opzione di prodotto in modo che gli utenti esterni alla sala di controllo possano accedere alle informazioni di produzione attuali e storiche. In molti casi, i componenti software noti come controlli ActiveX® o applet Java® devono essere installati o scaricati su ogni macchina client che accede al server Web. Alcuni prodotti, come PLC e altri dispositivi di controllo, sono disponibili con server web, FTP ed e-mail integrati per semplificarne la configurazione da remoto e consentire la generazione di notifiche e report via e-mail al verificarsi di determinate condizioni.

Stanno iniziando ad apparire dispositivi di sicurezza (o gateway) con proxy applicativi in grado di esaminare il traffico web, FTP ed e-mail per bloccare gli attacchi e impedire il download di controlli ActiveX® o applet Java®. E' importante evidenziare che qualsiasi processo di sviluppo del software deve rispondere alle norme IEC 62443-4-1 e IEC62443-4-2.

6. Possibili modelli per generatori di vapore di media e grande potenza conformi alla IEC 62443-3-2 e alla IEC 62443-3-3

Un tipico sistema di controllo e protezione per un generatore di vapore a recupero di un ciclo combinato può essere basato su un Livello di sicurezza SL2, che previene la diffusione non autorizzata di informazioni a un'entità che ne sia attivamente alla ricerca, utilizzando mezzi semplici, risorse modeste, capacità generiche e un basso livello motivazionale. Ogni livello di sicurezza può essere valutato in tre differenti modi: SL-T (Security Level Target) da raggiungere in base all'analisi di rischio, SL-C (Security Level Capability) raggiungibile con la tecnologia a disposizione, SL-A (Security Level Achieved) effettivamente implementato. La IEC 62443-3-2 definisce un set di FR (Fundamental Requirement) che qualificano il proprio SL, nella tabella 4 sono indicati gli FR, lo scopo e il tipo di implementazione richiesta per un SL2.

6.1 Apparati di rete, integrazione e configurazione

La scelta, l'integrazione e la configurazione degli apparati di rete varia significativamente in funzione del tipo di conduzione "onsite" da sala controllo, "offsite" da sala controllo primaria connessa alla sala controllo locale o meno. Nel lavoro ci limitiamo a fornire alcuni requisiti generali per una sicurezza informatica sul livello di sicurezza SL2.

FR	Scopo	Requisito SL2
Identification and authentication control (IAC)	Abilitazioni persone, software, processi e device	Principio del privilegio minimo (PoLP) secondo le mansioni dell'utente Operatore", "Amministratore", "Manutenzione", Vendor, Cliente con utenze individuali in modo da garantire il principio di Accountability"
Use control (UC)	Allocare compiti e privilegi assegnati ad un utente (persona, software, processo o device)	Integrare l'autenticazione agli apparati con il sistema di gestione delle credenziali Active Directory utilizzando protocolli sicuri (LDAPS invece di LDAP). Uso di bunner escludendo il blocco account per le utenze di esercizio utilizzate per gestire l'ICSS nelle postazioni di operazione e nella postazione collegata al videowall.
System Integrity (SI)	Integrità del componente	L'accesso di dispositivi portatili o mobili non deve essere possibile. Cambiamenti, aggiornamenti o modifiche delle configurazioni del sistema di controllo consentiti solo alle persone qualificate ed autorizzate e sottoposti a tracciamento (ruolo

		amministrazione, ingegneria ed operation) Memorizzare le password in formati non suscettibili ad attacchi (no chiaro ed hash crittografico) Backup e recovery dei file di dati critici e delle immagini di sistema (Frequenza, convalida, tempo di recupero RTO e punto di recupero RPO).
Data Confidentiality (DC)	Tutela da divulgazione non autorizzata delle informazioni (canali e repository)	L'accesso a condivisione o risorse di rete dovrà essere consentito previa autenticazione utilizzando le credenziali individuali fornite e registrate in Active Directory. I privilegi concessi dovranno sottostare al principio del minimo privilegio. Inventario degli asset (nome, indirizzi IP fisici MAC address, versioni firmware o immagine software, del sistema operativo, protocolli, porte e servizi associati) Regole di aggiornamento software e firmware e azioni per indisponibili su attacchi (eventuali certificati "ISA Secure SDLA" e "ISA Security EDSA" o "Achilles Level 1")
Restricted Data Flow (RDF) di asset logici o fisici e conduit (canali di comunicazione)	Limitazione del flusso dati (suddivisione in zone e conduit) basato su analisi di rischio secondo IEC 62443-3-2	Separare le reti DCS dalle reti office e dalle reti pubbliche con data diodes e firewall di rete, definendo zone e le relative network principali: RNL (locale dedicata alle connessioni di desktop remoto), DCS (parte dei sistemi ausiliari al generatore), SCADA (sistema elettrico), INF (apparati di rete), CORE (network di transito tra DCS ausiliari e DCS eventuali delle turbine in impianti di potenza, che contiene gli switch, servizio di sincronizzazione NTP e i firewall), SIS (reti periferiche isolate), Zona ingresso (contiene la zona demilitarizzata DMZ e le altre aree dedicate, oltre ai router di turbine e ausiliari, switch dedicato al port mirroring, bridge pc che fungono da jump station), Rete (reti di controllo, di gestione degli host per la virtualizzazione, le idrac - Integrated Dell Remote Access Controller - dei server fisici e la componente dati). La normativa IEC 62443 suggerisce di identificare i conduit intesi come matrice dei flussi comunicativi tra le zone definite, Per ciascun punto di intersezione tra zone sorgenti e zone destinazione è indicato il valore SI/NO a seconda se la comunicazione tra sorgente e destinazione nelle zone è permessa o meno
Timely Response to Events (TRE) basato su Policy	Detection, Notifica, raccolta e reporting attacchi e violazioni,	Meccanismi qualificati per la protezione da codice dannoso (virus, worm, spyware, rootkit e ransomware) sulle componenti dell'ICSS.

	azioni correttive e tempestive quando viene rilevato un incidente di sicurezza	Software antivirus o protezione endpoint installato su tutti i nodi supportati (server, workstation e thin client) per rilevare la presenza di codice dannoso sugli stessi e contrastarne la diffusione. Gli host protetti (server e workstation) dovranno rilevare in modo automatico le versioni del software antivirus e riportarli alla funzione di logging generale. Protezione contro l'esecuzione di software non autorizzato e codice dinamico (application whitelisting o application control). Monitoraggio dell'integrità dei file presenti (hash SHA-256, SHA-1 o md5 contenuto in EDR McAfee). Registrazione, Logging e monitoring di accessi, richieste, eventi, modifiche, audit (mantenimento log e registri immodificabili – esempio syslog, windows event forwarding e collector WEF/WEC) stabilendo un tempo di conservazione. Dotazione di un sistema di controllo dedicato per il monitoraggio intrusioni (IDS) dotato di allarmi, con propria console e least privilege di accesso e posizionato sulla rete dell'ICSS - Industrial Control Safety System - in modo passivo, che sia di ausilio ai normali sistemi di rete
Resource availability (RA)	Disponibilità dei componenti	Impostazione output in uno stato predeterminato delle componenti di sistema (unpowered, hold, fixed, dynamic). Proprietà di fail-safe del sistema di controllo

Tabella 4. Implementazioni tipiche per gli FR in un sistema SL2

La misura di sicurezza primaria è quella di disabilitare le tecnologie di zero-touch provisioning presenti sugli apparati di rete per impedire l'esecuzione di codice dinamico (TCL o Python) sugli stessi oppure, se impossibile, dotarsi di misure compensative per i soli utenti autorizzati e attraverso interfacce sicure (autenticazione console remota e uso di protocolli SSH per la postazione remota dai soli indirizzi IP autorizzati), cercando di evitare il più possibile i protocolli HTTPS. Occorre prevedere un blocco (timeout delle sessioni) o la disconnessione automatica su tempo stabilito, in particolare per le conduzioni discontinue, tale controllo però non dovrà ostacolare eventuali azioni di emergenza tempestive da parte degli operatori del sistema di controllo e le utenze da loro utilizzate ne dovranno essere esentate. Gli indirizzi IP utilizzati nell'architettura di rete dell'ICSS, preferibilmente statici e basati su registri, dovranno appartenere a classi IP private, descritte nella RFC 1918 *(Address Allocation for Private Internets).* La rete dell'ICSS dovrà essere opportunamente segmentata in modo da limitare flussi informativi non necessari secondo zone e conduit stabiliti in base al criterio FR scelto e possono essere stabiliti differenti requisiti di sicurezza per le varie zone di rete. Ogni apparato di rete al confine delle zone di sicurezza dovrà consentire il controllo e il monitoraggio delle

comunicazioni tra le stesse, applicando la compartimentazione definita nel modello di zone e conduit. Le regole di controllo di accesso dovranno essere impostate in modo da bloccare il traffico di rete non esplicitamente consentito, come impostazione predefinita, secondo il principio “deny by default, allow by exception”. La policy di segregazione deve essere basata su dispositivi di rete adibiti alla protezione di confine (requisiti di segmentazione) atti a impedire comunicazioni da e verso perimetri untrusted; pertanto, non vi deve essere alcuna connessione diretta da Internet alla rete di processo e viceversa. La rete aziendale non dovrebbe essere in grado di interrogare o controllare direttamente alcun dispositivo di controllo a livello di impianto o SCADA, pertanto sia fisicamente che logicamente, le reti aziendali e di controllo dei processi dovranno essere isolate. L’utilizzo di sistemi di comunicazione interpersonale privati (anche in hot-spot) o non correlati alle operazioni del sistema di controllo sulla rete di processo non dovrà essere consentito. Per la conduzione offsite l’accesso autorizzato a sistemi della rete di processo da altri impianti o dalla rete aziendale dovrà avvenire attraverso la zona demilitarizzata DMZ attraverso il dispositivo di protezione di confine con politica *“deny by default, allow by exception”,* e monitoraggio del traffico in ingresso e uscita da e verso reti untrusted opportunamente crittografate, adottando la gestione dei firewall e degli apparati di instradamento (router, switch layer3) attraverso protocolli sicuri e l’accesso agli stessi dovrà essere consentito ai soli soggetti autorizzati. Zone esterne all’ICSS, ovvero terze parti o entità esterne, dovranno essere opportunamente segregate fisicamente e logicamente attraverso firewall di rete.
Le reti dovranno possedere requisiti di “rate limiting” per limitare il traffico broadcast, unicast sconosciuto e multicast attraverso il meccanismo di throttling.
Protocolli vulnerabili ad attacchi di amplificazione, come NTP dovranno essere messi in sicurezza attraverso l’implementazione di ACL applicative in modo da consentire l’utilizzo del server dai soli host autorizzati. Inoltre, il servizio server NTP sui dispositivi, apparati o host, diversi dal server NTP di riferimento per l’ICCS, dovrà essere disabilitato.

7. Conclusioni

Il lavoro si poneva esclusivamente lo scopo di relazionare i recenti requisiti individuati dalla norma EN 12953-6 in materia di conduzione da remoto con quelli di norme tipicamente utilizzate per la sicurezza informatica. Si è visto che la comunione di tali requisiti è oggi stabilita nei requisiti della Direttiva Macchine, mentre per la Direttiva PED occorre affrontare tale aspetto anche al fine di introdurre requisiti essenziali di sicurezza specifici per i sistemi di controllo, anche per giungere ad un livello di presunzione di conformità nelle specifiche norme dei generatori di vapore. Ulteriore aspetto da non sottovalutare riguarda l’eventuale adeguamento delle norme nazionali sulla conduzione dei generatori di vapore, quanto meno al concetto di conduzione discontinua oltre le 72h. Sicuramente il progressivo aumento e sviluppo di tecnologie informatiche e di intelligenza artificiale applicate al mondo

della produzione obbligherà ad un intenso lavoro di aggiornamento normativo europeo e nazionale per gli aspetti legati alla sicurezza di operatori ed “operazioni” che oggi giorno sono rappresentate sempre più da processi interattivi uomo/macchina di tipo assistito. Occorre assicurare che tali sistemi di controllo (intelligenti o meno) forniscano quel requisito rappresentato dall’innata capacità intellettiva ed operativa dell’uomo di determinare le condizioni di sicurezza di un sistema.

Bibliografia e sitografia

[1] Iuri Mazzarelli, Ivan Mazzarelli - Applicazione della conduzione discontinua di generatori di vapore di media e grande potenzialità mediante controllo da remoto – SAFAP 2012 – ISBN 978-88-7484-230-8

[2] I.Mazzarelli, A. Tonti – L’esonero dalla conduzione abilitata dei generatori di vapore: i requisiti tecnici tra norme nazionali e norme armonizzate europee – SAFAP 2021 – ISBN 978-88-7484-709-9

[3] I.Mazzarelli – Conduzione dei generatori di vapore cenni storici e attuale quadro legislativo e normativo di riferimento – Rivista Energia e dintorni – maggio 2025

[4] I.Mazzarelli – Conduzione dei generatori di vapore nuove frontiere e cybersecurity – Luglio-Agosto 2025

[5] Norma IEC/TR 62443-3-1: Industrial communication networks – Network and system security – Part 1: Security technologies for industrial automation and control systems

Tubazioni interrate in pressione: confronto tra norme tecniche e applicazione del DM 329/04.

G. Giannelli[1], N. Altamura[2], R. Acerboni[3], A.Mele[4], M.F.S. De Musso[5]

[1]Inail - UOT di Como
[2]Inail - UOT di Bari
[3]Inail - UOT di Venezia
[4]Inail - UOT di Taranto
[5]Inail - UOT di Bari

Sommario
Come noto, tra le novità introdotte a suo tempo dal DM 329/04 vi fu quella della verifica delle tubazioni in pressione, che fino a quel momento erano state progettate, costruite, collaudate ed esercite in ossequio alle poche norme tecniche afferenti, facendo principalmente uso di codici di calcolo come l'ASME. Le successive denunce delle tubazioni esistenti pervenute in tutti gli uffici delle Unità Operative Territoriali Inail dopo il 12/02/2005 (data di entrata in vigore del DM 329/04), con l'applicazione della Direttiva 97/23/CE prima, e della 2014/68/UE dopo, hanno mostrato aspetti che effettivamente meriterebbero un approfondimento. Infatti, se le tubazioni non interrate permettono un impatto visivo immediato e una flessibilità negli interventi di manutenzione e/o riparazione, da questo punto di vista le tubazioni interrate mostrano diverse criticità. Ciò comporta una fase di progettazione e installazione ricca di elementi aggiuntivi rispetto alle tubazioni non interrate, con lo studio di situazioni che, in alcuni casi costituiscono elementi di novità per gli addetti del settore delle attrezzature in pressione. In aiuto a tale studio concorrono fortunatamente alcune norme tecniche armonizzate alla Direttiva 2014/68/UE, come la EN 13480-6 e la EN 13941, molto ricche sia di riferimenti teorici e sia di approcci empirici, sintetizzati in formule ed equazioni non sempre di immediato utilizzo. La memoria, dopo più di vent'anni dall'introduzione del DM 329/04, vuole esporre solo alcuni degli aspetti di confronto fra l'attività di verifica e quella di progettazione ed installazione delle tubazioni interrate, senza però trascurare alcuni accenni a proposte di miglioramento delle due attività.

1. Sintesi del quadro normativo

Ormai sappiamo che non tutte le tubazioni installate sugli impianti afferenti luoghi di lavoro rientrano nel DM 329/04. Sono escluse: le tubazioni facenti parte di siti industriali con funzione di trasporto dei fluidi da un serbatoio di stoccaggio a un impianto di produzione o esercizio (in questo caso occorre fare attenzione alla definizione di Sito Industriale); le tubazioni con un DN minore a 80; le tubazioni che collegano due apparecchi non compresi dal DM 329/04; le tubazioni che non rientrano nell'applicazione della Direttiva 2014/68/UE.

Ovviamente l'esclusione dal controllo in esercizio delle tubazioni non corrisponde ad una automatica esclusione dall'applicazione delle Direttiva 2014/68/UE; pertanto, bisogna sempre tenere a mente che la sfera della costruzione delle tubazioni è ben separata dalla sfera dell'esercizio che è propria del DM 329/04.
In merito, nel tempo sono state emanate dall'Ispesl due circolari applicative, la n. 5411 del 2008 e la n. 2592/09 del 13/07/2009. La prima si riferisce all'applicazione dell'articolo 16 del DM 329/04 sulla denuncia delle tubazioni esistenti prima del 12/02/2005, con richiami alle norme tecniche EN 13480 (in particolare la EN 13480-5), API 580 e API 581(con richiami del RBI); la seconda è specifica per le riparazioni delle tubazioni in cui troviamo la seguente tabella 1 che spiega quali sono le tubazioni soggette a procedura di riparazione ai sensi dell'art. 14 del DM 329/04.

Gruppo del Fluido	**Stato del Fluido**	**Categoria dell'attrezzatura ai sensi della PED**		
		I	II	III
1	Liquido	NO	SI	SI
	Gas, vapori e Liquidi surriscaldati	SI	SI	SI
2	Liquido	NO	NO	----------
	Gas, vapori e Liquidi surriscaldati	NO[1]	NO	SI

Tabella 1

NOTA 1: Tubazioni escluse in quanto non oggetto di enuncia ai sensi dell'articolo 16 ed inoltre escluse dai controlli periodici indicati nella tabella di cui all'allegato 7 del D.lgs. 81/08.

Per entrambe le circolari si fa richiamo allo stato di conservazione delle tubazioni e per quelle interrate non vi sono molti metodi che permettono di asseverare con precisione l'assenza di difetti. Infatti, a parte la classica prova di resistenza costituita dalla prova idraulica, i CND a disposizione, previsti da precise norme tecniche sono essenzialmente costituiti: dalle video-ispezioni interne; correnti parassite pulsate (Eddy Current Pulsate); Onde Guidate; emissioni acustiche; infine, non si disdegna l'utilizzo della termografia di precisione ma bisogna ammettere che le condizioni di utilizzo sono molto restrittive e riguardano perdite di tenuta con efflussi notevoli.
È quindi evidente che lo stato di conservazione di una tubazione interrata potrà essere diagnosticato con una certa attendibilità in funzione della possibilità di poter utilizzare uno dei metodi sopra citati in condizioni opportune; in tal caso sono fondamentali i tratti di tubazione che emergono dal sottosuolo e il collegamento di quest'ultime al tratto interrato.
Facendo salve le tubazioni esistenti prima dell'entrata in vigore della Direttiva 97/23/CE (poi 2014/68/UE), per tutte quelle che sono state costruite dopo, è diventato obbligatorio indicare i "mezzi di ispezione" secondo il punto 2.4 dei RES della Direttiva.

Tali accorgimenti possono essere diretti o indiretti. I primi permettono una visita interna che purtroppo non risulta ovviamente pertinente per le tubazioni di tipo industriale; i secondi sono gli unici che dovranno essere considerati in fase di progettazione e inseriti nei manuali delle istruzioni operative. Infatti, nella EN 13480-6, dedicata esclusivamente alle tubazioni interrate sono prescritte esplicitamente al paragrafo 4.5 le " *internal inspection previsions*", cioè le aperture che avrebbero l'unico obiettivo di permettere l'ispezione interna delle tubazioni mediante l'ausilio di idonea strumentazione. Allo scopo non si dovrà trascurare anche quanto suggerito dalla EN UNI 14419: 2019 in merito a veri e propri sistemi di sorveglianza delle tubazioni destinate al trasporto di acqua calda comprese nella norma EN 13941. Questi sistemi sono costituiti da cavi elettrici e sensori posizionati o direttamente sulle tubazioni o a margine delle stesse per il rilievo dei parametri necessari (umidità del materiale di riempimento, eventuali spostamenti della tubazione, consumo dell'elettrodo sacrificale, pressioni esterne, temperature esterne, ecc..).
In ultimo, ma non meno importante, si sottolinea che in caso di necessaria rimozione del materiale di ricoprimento, pur riconoscendo opportuna l'operazione per un controllo migliore delle superfici esterne accessibili della tubazione, diventa obbligatorio ripristinare le condizioni originarie, in quanto quest'ultime fanno parte integrante della progettazione delle tubazioni interrate in pressione (carichi esterni permanenti e dinamici). Infatti, come si vedrà in seguito, la compattazione e il materiale di ricoprimento sono parametri che indirettamente influiscono sulla deformazione e resistenza della tubazione interrata.

2. Cenni sulla Progettazione delle tubazioni interrate e norme tecniche afferenti

La norma EN 13480 per la progettazione e installazione delle tubazioni metalliche, contiene la parte sesta denominata "Requisiti *addizionali per tubazioni interrate*". Nello scopo della norma si esplicita che la temperatura massima di progettazione non dovrà superare i 75°C, e qualora sarà necessario superare questo limite si dovrà fare riferimento alla norma EN13941.1: 2019+A1:2021 che ammette la progettazione fino a TS = 140°C con diametri esterni fino a 800 mm.
Ovviamente la EN 13480-6 esplicita requisiti aggiuntivi a tutta la serie delle norme EN 13480 (parti 1÷ 5) con particolare riferimento alla EN 13480-3 per la progettazione e calcolo e alla EN 13480-5 per i controlli da fare in sede di fabbricazione e installazione.
La sicurezza di una tubazione interrata non solo è fondamentale per gli operatori che insistono nella stessa area di installazione, ma anche per l'ambiente circostante con particolare attenzione del sottosuolo. Non a caso la EN 13480-6 traccia un elenco di fattori principali aggiuntivi da prendere in considerazione per l'analisi dei rischi, interagenti tra loro e di seguito esaminati. Questi sono rappresentati da: a) progettazione del percorso più opportuno con studio delle interazioni con le connessioni e studio della profondità degli scavi; b) Qualità dei materiali sia della tubazione, sia del riempimento e sia della copertura finale; c) Esercizio e controllo dei

parametri di esercizio; d) Protezione dalla corrosione; e) Protezione e mitigazione dei danni eventualmente provocati all'esterno.

***2.1 Fattore a)*:** Innanzitutto si dovranno evitare incroci con altri impianti interrati e limitare al massimo possibile i carichi addizionali esterni sia di tipo statico che dinamico. In generale la profondità minima per l'installazione dovrà essere di 80 cm dal punto più alto della tubazione, con nastri identificativi che dovranno distare dalla tubazione almeno 30 cm; in particolare, le tubazioni di terza categoria PED dovrebbero distare da altre tubazioni di almeno 25 cm (distanze inferiore potrebbero essere accettate solo a seguito di dimostrazione convincente).

2.2 Fattore b): La qualità dei materiali incide molto sull'efficienza ed integrità della tubazione. Questi dovranno rispondere a quanto prescritto dalla EN 13480-2, con particolare attenzione all'allungamento longitudinale dopo frattura che si raccomanda essere superiore al 20% (allungamenti longitudinali inferiori possono essere consentiti ma solo dopo una esplicita validazione da parte del fornitore e del progettista). Anche i materiali di riempimento dello scavo a trincea o scavo ampio per la posa della tubazione sono fondamentali per un'adeguata risposta alle sollecitazioni provenienti dall'esterno. Una tubazione interrata che poggia su una superficie non omogenea lungo il percorso può essere sottoposta a "cedimenti "differenziali che possono provocare sollecitazioni aggiuntive a quelle classicamente considerate per le tubazioni non interrate. Dalla successiva equazione (1) si potrà decidere se siamo in presenza di tubazione rigida o meno.

$$\left(\frac{E}{E_t}\right) * \left(\frac{2e}{D_0}\right)^3 \geq 1 \qquad (1)$$

Dove:

- "E" è il modulo elastico del materiale della tubazione;
- "E_t "è il modulo elastico del materiale di riempimento dello scavo;
- "e" è lo spessore nominale della tubazione;
- "D_0" è il diametro esterno della tubazione.

Se i parametri afferenti la tubazione sono noti, comprendendo anche il modulo elastico "E", molto difficile potrebbe risultare la determinazione precisa di "E_t". Infatti, a prescindere dalle tabelle che riportano il modulo "E_t" in funzione della compattazione (indice Proctor), un riferimento per dare un'idea dei valori in discussione potrebbe essere quello dato dalla tabella 2 estratta dalla EN 13491-1.

Material	E modulus MPa	Factor α or β	γ_{dr} kg/m^3
Polystyrene foam	4 or 14[a]	0	15 or 40
Subsoil[b]	100[b]	—	—
Fly ash	150	0,03	—
Lava, macadam, crushed stone, chalk stabilizer, foundation of soft rubble	200	0,13	—
Cellular concrete	300	0,30	400
Asphalt layers, clinkers, concrete rubble foundation	500	0,54	—
Cellular concrete	650	0,680	500
Sand cement, sand asphalt	1000	0,94	—
Cellular concrete	1200	1,060	600
Blast furnace slag	1500	1,220	—
[a] $E = 4 + 2\,(\gamma_{dr} - 15/5$ MPa is applicable for in-between values).			
[b] Well compacted sand.			

Tabella 2

Come si potrà notare, i valori sono sempre molto più piccoli di quelli riguardanti l'acciaio (si potrà parlare di rapporti di fra 100 e 1000 volte), pertanto per tubazioni con rapporti fra spessori e diametri pari ad 1/10 si potranno avere valori dell'equazione (2) inferiori a 1 solo per materiali di riempimento con un modulo elastico molto basso, e pertanto la tubazione dovrà essere considerata semirigida. La Figura 1 mostra la deformazione che nel tempo una sezione di tubazione potrebbe subire a causa del materiale esterno che la circonda. Se la circonferenza in neretto definisce la situazione iniziale dopo il ricoprimento, la pseudo-circonferenza in tratteggio mostra la deformazione a cui si potrà giungere nel tempo.

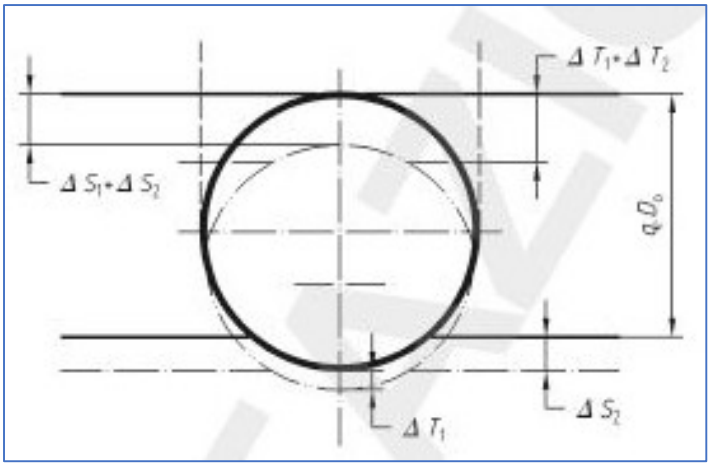


Figura 1

Per uno scavo ampio, o una trincea larga, quando la tubazione è considerata rigida, l'affondamento del materiale di riempimento è maggiore sulle pareti laterali della tubazione rispetto alla sommità della stessa, causando delle forze di taglio nel materiale di riempimento (dovuto alla coesione dello stesso) che aumentano i carichi statici permanenti. L'effetto contrario si avrà per una tubazione semirigida. Nella Figura 1 si possono distinguere i seguenti affondamenti:

- DS_2 dovuto al materiale di posa per le spinte superiori del materiale di riempimento;
- DT_1 dovuto alla penetrazione e trascinamento della tubazione nel piano di posa;
- DS_1 dovuto all'abbassamento del materiale di riempimento presente lateralmente alla tubazione, per via della compattazione;
- DT_2 è la deformazione centrale della tubazione per il carico del materiale di riempimento centrale. Questa deformazione genera un allargamento della sezione della tubazione e quindi una piccola "ovalizzazione" con conseguente aumento della spinta laterale che dall'esterno carica la sezione della tubazione.

I parametri legati agli affondamenti per assestamento dell'insieme scavo-tubazione sono considerati nella EN 13480-6 nel coefficiente di assestamento dell'equazione (2) seguente:

$$C_{TAss} = \frac{\Delta s_1 + \Delta S_2 - \Delta T_1 - \Delta T_2}{\Delta s_1} \quad (2)$$

La differenza fra il totale degli affondamenti del materiale di riempimento e del piano di posa (DS_1+ DS_2) , con la somma degli affondamenti e deformazioni della tubazione (DT_1+ DT_2) sono messi in relazione con l'affondamento del materiale di riempimento laterale (DS_1). Dalla tabella 3 si evince il comportamento delle tubazioni rigide e flessibili.

«Rigid» piping on rock or firm soil	+ 1,0
«Rigid» piping on ordinary soil	+ 0,8 to + 0,5
«Rigid» piping on unconsolidated soil	+ 0,5 to 0
«Flexible» piping with non-compacted backfill on each side	– 0,4 to – 0,2
«Flexible» piping with slightly compacted backfill on each side	– 0,2 to 0
«Flexible» piping with well compacted backfill on each side	0 to + 0,4
«Flexible» piping with optimally compacted backfill on each side	+ 0,4 to + 0,8

Tabella 3

Il C_{TASS} è pari a 1 quando la somma (DT_1+ DT_2) è pari a DS_2: per le tubazioni rigide su roccia si può assumere DS_2 = DT_1 =DT_2 =0 e quindi tutta la deformazione del materiale di riempimento si scarica sulla parte laterale della tubazione. Quando la stessa

tubazione rigida poggia su terreni non rocciosi il valore di C_{TASS} può scendere a 0. In tali casi, come detto sopra possono verificarsi cedimenti differenziali, a volte pericolosi.

2.3 Fattore c): Come già accennato, il controllo dell'esercizio di una tubazione interrata può eseguirsi con l'ausilio della strumentazione il cui uso dovrà essere previsto in sede di progettazione. Il controllo dei parametri come la pressione, la temperatura, l'umidità del materiale di riempimento, devono essere eseguiti costantemente con almeno due punti di rilevazione corrispondenti all'entrata e l'uscita della tubazione dal sottosuolo (es.: vedere la EN 14419). Anche il controllo delle deformazioni e scorrimenti dei vincoli esterni può dare indicazioni sulle deformazioni delle parti interrate. Dalle Foto 1 e 2 si prende in considerazione una tubazione di metano che percorre il perimetro della proprietà dell'utilizzatore con vincoli esterni del tipo "carrello" e poi si interra in corrispondenza dei varchi per gli automezzi. Mediante lo studio delle rotazioni dei rulli conici presenti sui vincoli si possono fare deduzioni sugli spostamenti che la parte interrata della tubazione subisce, e se queste deformazioni sono plausibili con i calcoli di progettazione o si ipotizzano delle anomalie.

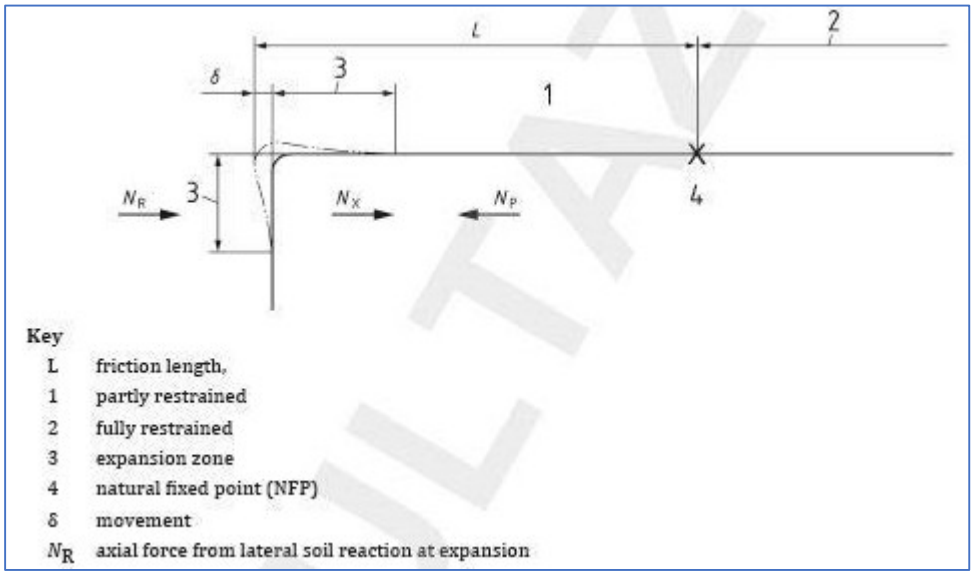


Foto 1



Foto 2

Ciò è evidente nelle dilatazioni termiche che una tubazione potrà subire in modo differenziato fra i tratti esterni e i tratti interrati. Se nei tratti esterni il sistema è controllabile con la misurazione diretta delle deformazioni, ovviamente ciò non sarà possibile per quelli interrati, pertanto grande importanza assumono i sensori di rilevazione.
Sia la EN 13480-6 e sia la EN 13941-1 si occupano in modo accurato dell'argomento, ma la EN 13941-1 dedica una maggiore attenzione ai dettagli delle forze in gioco.



Key

L	friction length,
1	partly restrained
2	fully restrained
3	expansion zone
4	natural fixed point (NFP)
δ	movement
N_R	axial force from lateral soil reaction at expansion

Figura 2

Nella Figura 2 si evidenzia la criticità legata alla parte terminale di una tubazione interrata e si ipotizza un modello statico da studiare. Così come accade per una tubazione esterna che ha un punto fisso, anche la tubazione interrata ha i suoi punti fissi (punto 4), che però sono costituiti da quei punti che a causa della "frizione" con il materiale di riempimento non permettono alla tubazione nessun spostamento. Il tratto "2" della tubazione in figura è completamente vincolata e non subisce spostamenti. Il tratto 1 è invece quel tratto che si muove e genera l'attrito con il materiale circostante la tubazione, mentre il tratto "3" è quello che si espande e deforma producendo uno spostamento "d".

N_R è la forza del materiale di riempimento o della parete di una trincea che si oppone allo spostamento e deformazione del tratto "3". Quando si ha un aumento di temperatura DT rispetto alla temperatura di installazione nel punto fisso "4" si genera una deformazione dettata dalle equazioni di risoluzione delle deformazioni:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_R + \sigma_p)] + \alpha \Delta T \quad (3)$$

Dove essendo:

- e_x = 0 per il fatto che il punto è fisso;
- E = modulo elastico della tubazione;
- s_x = tensione longitudinale che si sviluppa sulla circonferenza della sezione del tubo;
- s_R = tensione radiale che si sviluppa nella parete del tubo nella direzione del raggio. Il valore è trascurabile per le pareti sottili, quindi si assume pari a 0;
- s_p = tensione circonferenziale che si sviluppa nella parete del tubo nella circonferenziale (hoop strenght).
- n = coefficiente di Poisson che è pari a 0,3 per l'acciaio;
- a = coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio.

La relazione diventa:

$$-\frac{\sigma_x}{E} = -\frac{\nu\sigma_P}{E} + \alpha\Delta T \qquad (4)$$

Ciò indica che nel punto fisso 4 vi è in effetti un'azione di compressione pari a Nx, dato da $s_x * A$, dove "A" è l'area della sezione trasversale della parete della tubazione. Nella zona di espansione in cui si ritiene libera la dilatazione termica, agiscono solo la forza legata alla pressione Np e la reazione del terreno laterale che si oppone all'espansione. Nel tratto 1 della figura 3 si stabilisce una lunghezza "L" detta di frizione che appunto vede l'instaurarsi di una forza di attrito fra tubazione e terreno sovrastante con pericolo di instabilità; quando questa instabilità è pericolosa si potrebbe ricorrere all'utilizzo di compensatori di dilatazione ed evitare così rotture e cricche soprattutto nelle giunzioni permanenti.
Un discorso identico si potrebbe fare per quei tratti di tubazione che hanno "perso" l'appoggio e quindi il settaggio iniziale, così come mostrato in Figura 3 seguente.

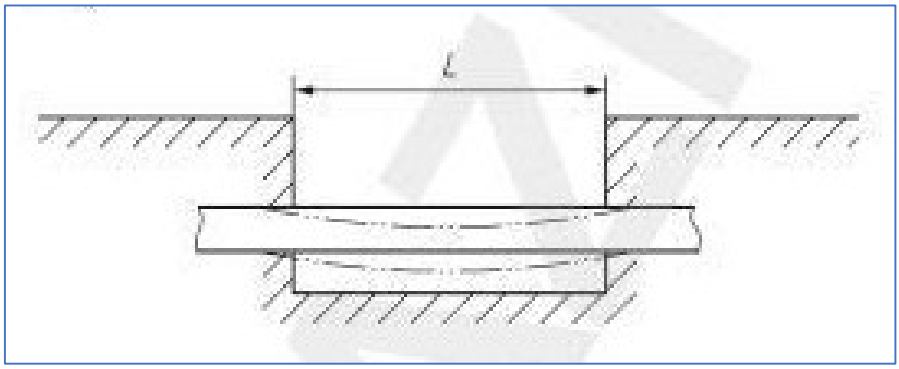
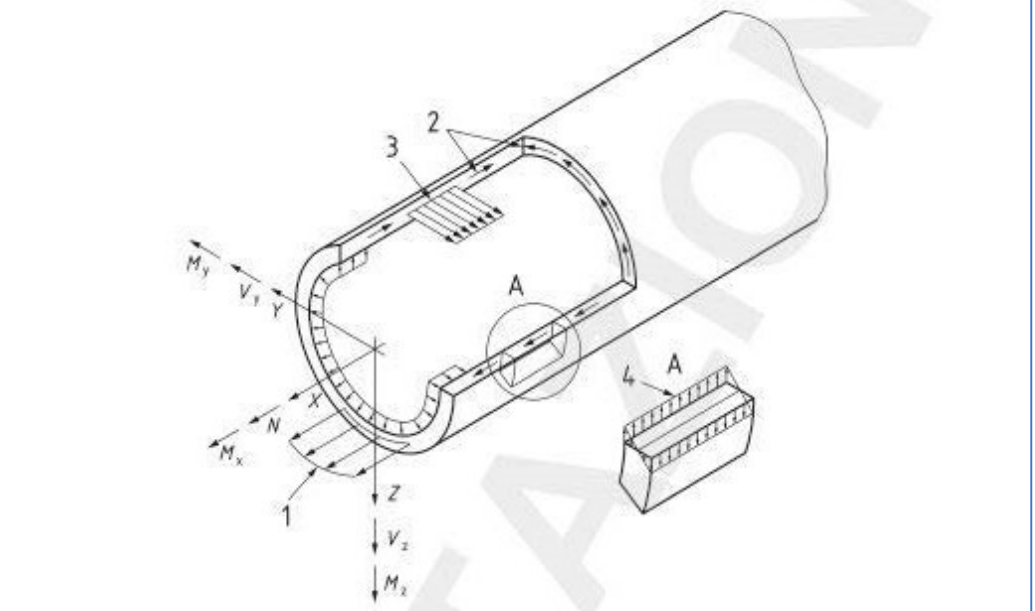


Figura 3

Come si potrà immaginare, possono sorgere altre sollecitazioni non previste correttamente; pertanto, la EN 13941 dedica un paragrafo a classificare tutte le possibili sollecitazioni che in esercizio potranno insorgere in una tubazione interrata, così come riassunto nella figura 4. Una tale situazione potrà diventare difficile da gestire soprattutto nelle zone saldate della tubazione, con il pericolo di insorgenza a breve termine della ulteriore ovalizzazione ed eventuale formazione dei "lobi" di deformazione, ed a lungo termine, con l'aumento delle tensioni, del fenomeno dello stress-corrosion. È quindi evidente come la sede di appoggio gioca un ruolo importante sulla stabilità della tubazione, indicando come la fase di installazione della stessa dovrà essere attentamente seguita per garantire la rigidezza impostata in sede di progetto e rispondere alle equazioni della linea elastica delle travi continue appoggiate su suolo alla Winkler.



Key

1 Maximum axial stress: $\Delta\sigma_a = i_{a1}\frac{\Delta N_x}{A} \pm i_{a2}\frac{\sqrt{\Delta M_y^2 + \Delta M_x^2}}{W}$

2 Maximum shear stress: $\Delta\tau = i_{a3}\frac{\Delta M_x}{2W} \pm i_{a4}\frac{2\cdot\sqrt{\Delta V_y^2 + \Delta V_x^2}}{A}$

3 Maximum membrane tangential stress: $\Delta\sigma_t = i_{ap}\frac{p\cdot d_i}{2t_{min}}$

4 Maximum bending tangential stress: $\Delta\sigma_t = i_{a5}\frac{\sqrt{\Delta M_y^2 + \Delta M_x^2}}{W} + \sigma_q$

σ_q is the ovalisation stress from top load (e.g. soil pressure and traffic) and lateral soil reactions, see 6.6.4.

Figura 4

Tra queste sollecitazioni quella che sicuramente risulta più trascurata è proprio la s_q che deriva dalla ovalizzazione della sezione anulare della tubazione a causa del peso del materiale di riempimento, delle forze dinamiche verticali (passaggio di automezzi) e delle loro eccentricità di azione che generano momenti torcenti sulla sezione.

2.4 Fattore d): La protezione dalla corrosione è sicuramente l'aspetto che solitamente viene più attenzionato mediante l'utilizzo di elettrodi sacrificali o protezioni superficiali adeguate. È noto che una tubazione interrata in acciaio potrebbe essere sottoposta ad una vera e propria cella elettrolitica in funzione dell'acqua e costituzione del materiale di riempimento, influendo notevolmente sulla corrosione anche della parte esterna della tubazione (corrosione per aerazione differenziale). Il problema riscontrato durante le verifiche è quello del controllo dello stato degli elettrodi sacrificali e la programmazione delle verifiche delle superfici. Sappiamo che per le tubazioni interrate è difficile la misurazione degli spessori, se non in maniera indiretta, e quindi è quasi impossibile capire il grado di corrosione e la velocità della

stessa. È quindi quasi obbligatorio imporsi metodi indiretti che possano costituire nel tempo l'unico riferimento attendibile da dimostrare in caso di eventi critici.

2.5 Fattore e): Poca attenzione viene destinata alla mitigazione del rischio legato ai pericoli di rilascio incontrollato: in questo caso l'unica soluzione è l'utilizzo di idonee valvole esterne per l'esecuzione dell'intercettazione del fluido e lo svuotamento del tratto interrato mediante sfiati controllati (utilizzati anche per le ispezioni interne con boroscopi). Sappiamo che esistono apparecchi per la soppressione delle esplosioni e degli incendi che possono intervenire e mitigare i danni potenziali all'ambiente circostante, ma non risulta semplice intercettare piccole perdite che possono inquinare il sottosuolo o, ancora peggio diffondere gas e/o liquidi potenzialmente esplosivi o facilmente infiammabili.

3. Conclusioni

In linea generale per le tubazioni interrate in pressione presenti nei siti industriali e da sottoporre a verifica del DM 329/04 si può asserire che la progettazione è ancora oggi maggiormente eseguita nella maniera identica delle tubazioni esterne. Purtroppo, non sono adeguatamente prese in considerazione tutte le sollecitazioni e pericoli contemplati dai fattori visti sopra, e che spesso sono la causa di quelle anomalie che provocano pericolosi rilasci nel sottosuolo. Come visto nella memoria molti problemi scaturiscono da:

- Mancata attenzione sul materiale di posa della tubazione e del riempimento dello scavo. Il problema è spesso limitato solo grazie al piccolo diametro delle tubazioni ma ciò non significa che le criticità non esistono;
- Mancata attenzione sulle sollecitazioni flettenti e torcenti derivate dalla conformazione e geometria dei percorsi esterni ed interrati;
- Mancata attenzione nella previsione di idonei mezzi di ispezione, sfiato ed intercettazione;
- Mancata realizzazione di idonei sistemi di monitoraggio dell'esercizio della sola tubazione interrata.

Molte delle soluzioni alle problematiche accennate sono state individuate nella realizzazione delle condotte di trasporto che, come noto, sono escluse dall'applicazione della PED e quindi dal DM 329/04, ma è pur vero che tali strutture sono spesso più robuste e dimensionalmente maggiori di quelle presenti nei siti industriali; quindi, rimane opportuno ricondurre tali soluzioni sempre alla specificità del caso da esaminare.

Nella disamina della memoria si è appurato a solo una piccola parte della sfera progettuale, tralasciando volutamente i dettagli relativi alle varie sollecitazioni da prendere in considerazione e alle teorie poste alla base di calcolo. Tuttavia, si può ricordare che una tubazione interrata con fluidi in pressione è assimilabile ad una trave continua poggiata su terreno di posa con comportamento elastico (fondazioni continue alla Winkler) e la cui ricerca delle deformazioni e sollecitazioni è affidata alle

equazioni della linea elastica dovuta a carichi continui costituiti dal riempimento degli scavi e dai carichi dinamici. Ovviamente non devono essere trascurati i carichi particolari che vanno dalle falde acquifere alle spinte di manufatti, passando dalle radici della vegetazione eventualmente esistente, fino alla seria considerazione degli eventi calamitosi come i terremoti.
Quando possibile, è chiaro che la soluzione più conveniente potrà essere costituita da un "incamiciatura" della tubazione interrata mediante l'utilizzo di un tubo guaina o di una "voltina" in calcestruzzo armato; attualmente sono in commercio molti sistemi brevettati di tipo modulare che sfruttando l'apposizione di elementi in polietilene denso (es.: Iglù dei vespai aerati) sulla tubazione in acciaio, realizzano una vera e propria galleria che garantisce l'aerazione e la possibilità di effettuare l'ispezione visiva esterna, con l'ausilio sempre di endoscopi adatti.
Tali soluzioni, in un solo colpo, eliminano molte criticità dei fattori sopra menzionati; infatti, volendo sintetizzare alcuni vantaggi avremo:

- ✓ Che i carichi dinamici e statici verticali sarebbero assorbiti dalla struttura esterna, e nel caso di utilizzo di vere e proprie guaine in cls si assorbirebbero anche i carichi laterali e di reazione del piano di posa. In questo modo sarebbero eliminate le eventuali ovalizzazioni e permesse le dilatazioni senza l'insorgenza di tensioni pericolose;
- ✓ Tutte le tubazioni, di qualsiasi materiale giacerebbero su un piano di posa continuo, rigido e privo di cedimenti differenziali, eliminando le valutazioni sulla rigidezza della tubazione e sugli affondamenti della stessa nel piano di posa;
- ✓ Eventuali perdite sarebbero convogliate in precisi punti di rilevazione con sensoristica adatta;
- ✓ Utilizzo di linee di sensori, trasduttori, videocamere, ed altri componenti di monitoraggio per la rilevazione di criticità;
- ✓ La corrosione sarebbe controllabile con la possibilità di avere almeno una ispezione visiva indiretta della parete esterna della tubazione e lo stato di conservazione della pellicola esterna di protezione, nonché, in caso di rottura della guaina-camicia, eventuali infiltrazioni sia del materiale di ricoprimento che di acqua;
- ✓ Possibilità di inserire più linee all'interno di un unico cunicolo senza tuttavia ostacolare le operazioni di ispezione esterna;

In definitiva si consentirebbe di progettare la tubazione interrata con le stesse connotazioni di una tubazione esterna e con tutti i vantaggi che quest'ultima comporta, utilizzando però tutti gli adeguati accorgimenti in termini di esercizio, manutenzione e controllo, da inserire nel manuale delle istruzioni operative da consegnare all'utilizzatore.

Bibliografia

[1] UNI EN 13480-3: 2024. Tubazioni Industriali Metalliche- Parte 3: Progettazione e Calcolo;
[2] UNI EN 13480-6: 2024. Tubazioni Industriali Metalliche- Parte 6: Requisiti addizionali per tubazioni Interrate;
[3] UNI EN 13941-1: 2022. Tubazioni per Teleriscaldamento- Progettazione ed installazione di tubazioni preisolate, singole o doppie, per reti di acqua calda interrate direttamente- Parte1: Progettazione;
[4] UNI EN 13941-2: 2022. Tubazioni per Teleriscaldamento- Progettazione ed installazione di tubazioni preisolate, singole o doppie, per reti di acqua calda interrate direttamente- Parte2: Installazione;
[5] UNI EN 14419:2019. Tubazioni per Teleriscaldamento- Sistemi bloccati con tubi singoli o doppi per reti di acqua calda interrate direttamente - Sistemi di Sorveglianza;
[6] D.M. 329/04 del 01/12/2001. 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;
[7] Circolari Ispesl: n. 5411 del 2008;
[8] Circolari Ispesl: n. 2592/09 del 13/07/2009;
[9] S. Timoshenko: Scienza delle Costruzioni- volume secondo. Prima edizione Italiana a cura del Dott. Ing. V. Camiz-1970.

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

F. Boella[1], A. De Palma[1], R. Acerboni[1], V. Prete[2], G. Zuccarello[3]

[1]Inail – UOT di Venezia Mestre
[2]Inail – UOT di Alessandria
[3]Inail – UOT di Bologna

Sommario
Nel contesto della gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio dei generatori di vapore, l'adozione della conduzione remota e in mobilità introduce nuovi fattori di rischio che il datore di lavoro deve valutare preventivamente. Questi riguardano sia la sicurezza dell'operatore, sia quella degli altri lavoratori. L'impiego di tecnologie digitali impone inoltre l'analisi delle vulnerabilità legate alla sicurezza informatica e di processo.
Il presente contributo offre una panoramica sistematica delle problematiche emergenti, con l'obiettivo di promuovere un approfondimento tecnico-organizzativo e favorire l'adozione di misure preventive adeguate.

1. Introduzione

La digitalizzazione delle attività di conduzione trasforma radicalmente l'interazione tra operatore, impianto e sistema di controllo, ampliando le possibilità operative e il profilo di rischio; la fase di esercizio riveste un ruolo centrale sia per la frequenza degli interventi operativi sia per le potenziali conseguenze di errori, guasti o malfunzionamenti.
La valutazione preventiva richiede oggi una comprensione integrata di ergonomia, cybersecurity e affidabilità di processo [1], [5].
I rischi sono stati classificati per ambiti di impatto, con attenzione agli aspetti ergonomici e cognitivi che influenzano la sicurezza dell'operatore.
Sul piano informatico, emergono minacce quali accessi non autorizzati, intercettazione dei segnali, malware, spoofing e attacchi Denial of Service (DoS), che possono compromettere la continuità operativa e la sicurezza degli impianti.
Per garantire la sicurezza di processo, è fondamentale affrontare criticità quali l'errore umano, i comandi errati, la perdita di segnale, le interferenze elettromagnetiche e la carenza di tracciabilità. Queste vulnerabilità, potenzialmente ad alto impatto, richiedono l'adozione di misure tecniche e organizzative specifiche, supportate da protocolli di monitoraggio e controllo continuo.
La conduzione remota, pur mantenendo la stessa responsabilità operativa della conduzione tradizionale, modifica la percezione del rischio e introduce un "gap

sensoriale" tra operatore e macchina che deve essere compensato con interfacce adeguate, feedback tempestivi e controlli ridondanti.

2. Analisi dei rischi per i lavoratori nell'utilizzo di dispositivi di controllo remoto portatili wireless per il controllo di generatori di vapore

2.1 Rischi ergonomici e fisici

L'uso prolungato di dispositivi portatili per il controllo remoto può causare diversi problemi ergonomici e fisici agli operatori. Questi rischi includono affaticamento visivo e posturale, movimenti ripetitivi ed esposizione a campi elettromagnetici. È essenziale valutare e mitigare questi rischi per garantire la salute e la sicurezza degli operatori.

1. Affaticamento visivo e posturale: l'uso prolungato di dispositivi portatili può causare affaticamento visivo e problemi posturali. L'utilizzo di display in condizioni luminose non ottimali o durante lo spostamento riduce la leggibilità e aumenta gli errori cognitivi [7], [8]. Gli operatori possono sviluppare disturbi muscolo-scheletrici a causa di posture scorrette e movimenti ripetitivi. È importante fornire pause regolari e formazione su posture corrette per ridurre questi rischi.
2. Movimenti ripetitivi: l'uso continuo di dispositivi portatili può portare a disturbi muscolo-scheletrici dovuti a movimenti ripetitivi. Gli operatori devono essere formati su tecniche di lavoro ergonomiche e devono avere accesso a dispositivi che riducano la necessità di movimenti ripetitivi.
3. Esposizione a campi elettromagnetici: sebbene generalmente bassa, l'esposizione a campi elettromagnetici deve essere monitorata. È importante garantire che i dispositivi rispettino le normative sulla sicurezza elettromagnetica e che gli operatori siano informati sui rischi associati.

2.2 Rischi legati alla mobilità dell'operatore

L'utilizzo di dispositivi di controllo remoto portatili wireless per il controllo di generatori di vapore può accentuare i rischi legati alla mobilità dell'operatore nell'ambiente di lavoro. Questi rischi includono inciampo, caduta, urti, interferenze con altri macchinari o operatori. È essenziale valutare e mitigare questi rischi per garantire la salute e la sicurezza degli operatori.

2.2.1 Rischi di inciampo, caduta e urti

1. Inciampo: gli operatori possono inciampare su cavi, attrezzature o ostacoli presenti nell'ambiente di lavoro. È importante mantenere l'area di lavoro libera da ostacoli e garantire che i cavi siano correttamente posizionati e fissati.
2. Caduta: gli operatori possono cadere a causa di superfici scivolose o dislivelli. È essenziale garantire che le superfici siano antiscivolo e che i dislivelli siano segnalati e protetti.

3. Urti: gli operatori possono urtare contro macchinari, attrezzature o strutture presenti nell'ambiente di lavoro. È importante garantire che l'area di lavoro sia ben illuminata e che gli ostacoli siano chiaramente visibili.
4. Collisioni: la mobilità mentre si svolgono compiti cognitivi impegnativi riduce l'attenzione periferica e aumenta il rischio di collisioni.

2.2.2 Interferenze operative

1. Interferenze con altri macchinari: gli operatori possono interferire con il funzionamento di altri macchinari presenti nell'ambiente di lavoro. È essenziale coordinare le attività e garantire che gli operatori siano consapevoli delle operazioni in corso.
2. Interferenze con altri operatori: gli operatori possono interferire con il lavoro di altri operatori presenti nell'ambiente di lavoro. È importante garantire una comunicazione efficace e coordinare le attività per evitare interferenze.

2.3 Misure di prevenzione e protezione

Le misure di prevenzione e protezione devono essere implementate per garantire la salute e sicurezza degli operatori durante la mobilità nell'ambiente di lavoro. Queste misure devono essere di tipo tecnico, organizzativo e che prevedano l'utilizzo di idonei dispositivi di protezione individuale.

Misure Tecniche

1. Segnaletica: utilizzare segnaletica chiara per indicare ostacoli, dislivelli e aree di pericolo.
2. Illuminazione: garantire una buona illuminazione dell'area di lavoro per rendere visibili gli ostacoli.
3. Superfici antiscivolo: utilizzare superfici antiscivolo per prevenire cadute.

Misure Organizzative

1. Coordinamento delle attività: coordinare le attività degli operatori per evitare interferenze operative.
2. Formazione: fornire formazione specifica agli operatori sui rischi legati alla mobilità e sulle misure di prevenzione.
3. Comunicazione: garantire una comunicazione efficace tra gli operatori per coordinare le attività e prevenire interferenze.

Dispositivi di Protezione Individuale (DPI)

1. Calzature antinfortunistiche: utilizzare calzature antinfortunistiche con suola antiscivolo per prevenire inciampi e cadute.
2. Protezioni per il corpo: utilizzare protezioni per il corpo per prevenire urti e lesioni (ad es. casco di sicurezza, occhiali antiurto, guanti di protezione touchscreen compatibili, indumenti ad alta visibilità).

Possono contribuire alla prevenzione anche custodie antiurto, per evitare da cadute improvvise del dispositivo, tracolle, imbraghi ergonomici e supporti a cintura, per un trasporto sicuro e mantenere le mani libere.

2.4 Rischi comportamentali, psicologici e sociali

L'utilizzo di dispositivi di controllo remoto per generatori di vapore può introdurre rischi comportamentali, psicologici e sociali per gli operatori. Questi rischi includono stress, isolamento, errori dovuti alla pressione lavorativa, e altri fattori che possono influenzare negativamente la salute mentale e il benessere degli operatori.

2.4.1 Stress correlato alle mansioni

Gli operatori possono sperimentare elevati livelli di stress legati all'elevata responsabilità operativa e alla necessità di monitorare costantemente il funzionamento dei generatori di vapore. La pressione di non commettere errori e di garantire la sicurezza può generare stati emotivi di ansia, influenzando negativamente la salute mentale e fisica degli operatori.

L'operatore può percepire un aumento della responsabilità decisionale senza un corrispondente controllo sensoriale diretto sul processo [7], [8].

Tale pressione lavorativa può inoltre aumentare il rischio di errori operativi: addetti sottoposti a stress eccessivo possono commettere sbagli con potenziali gravi conseguenze sulla sicurezza e sul corretto funzionamento dei generatori di vapore. È pertanto essenziale fornire un opportuno supporto organizzativo, un'adeguata formazione e strumenti di gestione dello stress, al fine di ridurre la pressione lavorativa e minimizzare il rischio di errori.

2.4.2 Isolamento

L'uso di dispositivi di controllo remoto può portare a isolamento sociale e lavorativo. Gli operatori possono sentirsi distaccati dai colleghi e dall'ambiente di lavoro, il che può influenzare negativamente il loro benessere psicologico e sociale. È importante promuovere l'interazione sociale e creare opportunità di collaborazione tra gli operatori.

2.4.3 Misure di prevenzione e supporto

Per mitigare i rischi comportamentali, psicologici e sociali, è importante implementare misure di prevenzione e supporto. Queste misure includono:

1. Formazione: fornire formazione specifica agli operatori sui rischi comportamentali, psicologici e sociali e sulle tecniche per gestire lo stress e la pressione lavorativa.
2. Supporto psicologico: offrire supporto psicologico agli operatori, inclusi servizi di consulenza e programmi di benessere mentale, per aiutarli a gestire lo stress e l'isolamento.
3. Promozione dell'interazione sociale: promuovere l'interazione sociale tra gli operatori, creando opportunità di collaborazione e team building per ridurre l'isolamento e migliorare il benessere psicologico e sociale.

2.5 Rischi operativi

L'uso di dispositivi di controllo remoto introduce rischi operativi specifici che devono essere attentamente valutati e mitigati. Questi rischi includono la mancanza di feedback tattile o visivo, distrazione o uso improprio e dipendenza dal dispositivo.

1. Mancanza di feedback tattile o visivo: la mancanza di feedback tattile o visivo può portare a errori operativi. È importante che i dispositivi forniscano segnali chiari e immediati per garantire che gli operatori siano consapevoli delle azioni eseguite.
2. Distrazione o uso improprio: in ambienti rumorosi o complessi, gli operatori possono essere distratti o utilizzare i dispositivi in modo improprio. È essenziale fornire formazione adeguata e creare ambienti di lavoro che riducano le distrazioni.
3. Dipendenza dal dispositivo: la dipendenza dal dispositivo può ridurre la vigilanza attiva da parte dell'operatore. Gli operatori devono essere formati per mantenere un alto livello di vigilanza e per essere pronti a intervenire manualmente in caso di guasto del dispositivo.

3. Analisi dei rischi informatici e di processo per l'uso di dispositivi di controllo remoto wireless per generatori di vapore

3.1 Rischi informatici (cybersecurity)

Per una corretta valutazione dei rischi informatici è necessario analizzare in modo approfondito le vulnerabilità dei sistemi di automazione, esaminando le principali minacce informatiche e i fattori critici che possono esporre i dispositivi a rischi di compromissione. Nel contesto degli impianti a pressione, le minacce informatiche devono essere lette non come eventi isolati di natura IT, ma come potenziali iniziatori di scenari di rischio di processo, in grado di influenzare il comportamento del generatore di vapore e dei sistemi di sicurezza associati.

La sicurezza informatica (cybersecurity) riveste un ruolo fondamentale, in quanto eventuali attacchi o accessi non autorizzati possono compromettere la disponibilità, l'integrità e l'affidabilità dei sistemi, con potenziali ripercussioni sulla continuità operativa, sulla sicurezza degli impianti e sulla tutela delle persone. Una gestione efficace dei rischi informatici è quindi essenziale per prevenire incidenti, ridurre le vulnerabilità e garantire il corretto e sicuro funzionamento dei sistemi di automazione.

Alcune delle principali minacce sono:

1. Accessi non autorizzati: dispositivi wireless possono essere intercettati o compromessi da attori malevoli.
2. Man-in-the-Middle (MitM): intercettazione del segnale tra dispositivo e generatore.
3. Malware e ransomware: infezione del dispositivo di controllo che può propagarsi al sistema di automazione.
4. Spoofing: imitazione del dispositivo legittimo per inviare comandi falsi.
5. Denial of Service (DoS): sovraccarico del sistema di controllo per bloccare il funzionamento del generatore [4], [11].

Eventi di questo tipo possono determinare, ad esempio, l'impossibilità di impartire comandi correttivi, l'esecuzione di comandi errati o ritardi critici nella risposta del sistema, con ricadute dirette sulla sicurezza di processo.
Fattori di rischio
1. Uso di protocolli di comunicazione non cifrati.
2. Mancanza di autenticazione a più fattori.
3. Aggiornamenti software non regolari.
4. Dispositivi con firmware obsoleto.

3.1.1 Soluzioni di prevenzione e mitigazione
Per garantire la resilienza del sistema dal punto di vista della sicurezza informatica, è necessario combinare protocolli avanzati di sicurezza informatica; le strategie adottate per la mitigazione e la prevenzione possono essere così riassunte:
- Crittografia end-to-end per tutte le comunicazioni.
- Autenticazione multifattoriale (MFA) per l'accesso ai dispositivi.
- Aggiornamenti regolari del firmware e dei software.
- Segmentazione delle reti di processo affinché siano irraggiungibili dall'esterno.
- Utilizzo di sistemi Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA moderni e costantemente aggiornati come unico punto d'accesso verso la rete[1] industriale, per evitare connessioni dirette agli apparati in grado di bypassare i meccanismi di protezione ed autenticazione presenti.
- Monitoraggio continuo e sistemi di rilevamento intrusioni (IDS/IPS).

3.2 Rischi di processo (sicurezza operativa)
Le criticità operative e tecniche legate all'interazione umana e alla stabilità del segnale, possano compromettere la sicurezza e la tracciabilità del sistema.
I principali rischi che si possono riscontrare per la valutazione di tale rischio sono:
- Errore umano: uso improprio del dispositivo da parte dell'operatore.
- Comandi errati o intempestivi: invio accidentale di comandi critici.
- Perdita di segnale: interruzione della comunicazione durante operazioni sensibili.
- Interferenze elettromagnetiche: disturbi che alterano i segnali di controllo.
- Mancanza di tracciabilità: difficoltà nel ricostruire la sequenza degli eventi in caso di incidente.

3.2.1 Soluzioni di prevenzione e mitigazione
Per garantire la resilienza del sistema, è necessario combinare la sicurezza informatica con rigorose procedure operative e sistemi di fail-safe:
- Formazione continua per gli operatori.

[1] DIRETTIVA (UE) 2016/1148 art. 4 «sicurezza della rete e dei sistemi informativi»: la capacità di una rete e dei sistemi informativi di resistere, a un determinato livello di riservatezza, a ogni azione che comprometta la disponibilità, l'autenticità, l'integrità o la riservatezza dei dati conservati o trasmessi o trattati e dei relativi servizi offerti o accessibili tramite tale rete o sistemi informativi

- Procedure operative standard (SOP) per l'uso dei dispositivi.
- Sistemi di fail-safe in caso di perdita di segnale.
- Registrazione dei log di tutte le operazioni.
- Test periodici di sicurezza e simulazioni di emergenza.

3.4 Rischi di processo estesi

I rischi di processo estesi includono tutte quelle variabili esterne o collaterali che influenzano il controllo del processo stesso.
L'efficacia del sistema dipende dalla sua affidabilità tecnica, che può essere compromessa da guasti hardware del controller portatile o da errori di sincronizzazione temporale con il sistema centrale e dalla disponibilità operativa, legata alla qualità della connessione wireless. In ambienti industriali saturi, la congestione della rete o la perdita temporanea del segnale possono causare latenze critiche, particolarmente pericolose durante le fasi di avvio o arresto del generatore di vapore.
Si elencano solo alcuni punti critici di affidabilità del sistema che vanno valutati per il rischio di processo esteso:
- Guasti hardware del dispositivo: un malfunzionamento del controller portatile può impedire l'invio di comandi critici.
- Errori di sincronizzazione: differenze temporali tra il dispositivo e il sistema centrale possono causare comandi incoerenti.
- Firmware non testato: aggiornamenti non validati possono introdurre bug o comportamenti imprevisti.
Disponibilità operativa
- Perdita temporanea di connessione wireless: può interrompere il controllo in momenti critici (es. avvio o arresto del generatore).
- Congestione della rete: in ambienti industriali con molte comunicazioni wireless, la latenza può aumentare.
- Dipendenza da un singolo punto di controllo: se il dispositivo è l'unico mezzo di comando, la sua indisponibilità può bloccare l'intero processo.
Correlazione con la strumentazione di controllo:
- Incoerenza tra segnali locali e remoti: se il dispositivo remoto non è sincronizzato con i sensori locali, può agire su dati obsoleti.
- Conflitti di comando: più operatori o sistemi che inviano comandi simultanei possono generare condizioni di gara (race conditions).
- Mancanza di feedback in tempo reale: se il dispositivo non riceve conferme immediate, l'operatore può agire in modo errato.
Tali criticità assumono particolare rilevanza nella fase di esercizio, nella quale l'impianto opera in condizioni dinamiche e spesso non completamente previste in fase di progettazione.

Scenario	Rischio
Il dispositivo perde la connessione durante la fase di pressurizzazione	Sovrapressione o arresto improvviso
Il comando di spegnimento viene inviato due volte per errore	Arresto non previsto del generatore
Il dispositivo riceve dati non aggiornati dai sensori	Decisioni operative errate
Il firmware del dispositivo viene aggiornato senza test	Comportamenti anomali

Tabella 1. Esempi di scenari critici

3.4.1 Contromisure specifiche

Per garantire il corretto funzionamento del generatore anche in presenza di guasti, attacchi informatici o instabilità della rete possono essere messi in atto alcuni interventi precauzionali.

Per l'affidabilità

- Ridondanza hardware: avere più dispositivi di controllo disponibili.
- Test di regressione per ogni aggiornamento firmware.
- Controlli di integrità periodici del dispositivo.

Per la disponibilità

- Failover automatico su canali di comunicazione alternativi (es. rete cablata).
- Buffer di comandi per garantire l'esecuzione anche in caso di disconnessione temporanea.
- Monitoraggio della qualità del segnale wireless.

Per l'integrazione con la strumentazione

- Sincronizzazione temporale tra tutti i dispositivi e il sistema SCADA/DCS.
- Gestione centralizzata dei comandi con priorità e logica di arbitraggio.
- Feedback visivo e acustico sul dispositivo per confermare l'esecuzione dei comandi.

4. Conclusioni

La conduzione remota dei generatori di vapore tramite dispositivi mobili rappresenta un'evoluzione tecnologica significativa, in grado di migliorare efficienza e tempestività operativa. Tuttavia, introduce rischi specifici che richiedono un approccio di gestione integrato e multidisciplinare [5], [6].

È necessario combinare:

- misure tecniche avanzate,
- procedure operative rigorose,
- formazione continua,
- sistemi di monitoraggio e controllo,
- strategie di cybersecurity di livello industriale.

Un approccio basato su una governance solida, su procedure chiaramente definite e su una corretta integrazione tra sicurezza informatica e sicurezza di processo consente

di orientare l'adozione della conduzione remota verso criteri di buona pratica in fase di esercizio, migliorando allo stesso tempo l'affidabilità e la sicurezza complessiva degli impianti.

Bibliografia e sitografia

[1] Repubblica Italiana. 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. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 101. 30 aprile 2008.

[2] Repubblica Italiana. Decreto Ministeriale 1 dicembre 2004, n. 329. Regolamento recante norme per la messa in servizio e l'utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 27. 3 febbraio 2005.

[3] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea. 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 delle attrezzature a pressione (PED). Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L 189. 27 giugno 2014.

[4] IEC. Industrial communication networks – Network and system security – IEC 62443 series. International Electrotechnical Commission. Ginevra.

[5] ISO. ISO 31000:2018 – Risk management – Guidelines. International Organization for Standardization. Ginevra. 2018.

[6] ISO. ISO 22301:2019 – Security and resilience – Business continuity management systems. International Organization for Standardization. Ginevra. 2019.

[7] Reason J. Human Error. Cambridge University Press. Cambridge. 1990.

[8] Hollnagel E. Human Reliability Analysis: Context and Control. Academic Press. London. 1993.

[9] Leveson N. Engineering a Safer World – Systems Thinking Applied to Safety. MIT Press. Cambridge (MA). 2011.

[10] Ericson C. Hazard Analysis Techniques for System Safety. Wiley. Hoboken (NJ). 2015.

[11] Stouffer K, Falco J, Scarfone K. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. NIST Special Publication 800-82. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg. 2015.

[12] INAIL. La sicurezza degli impianti a pressione. https://www.inail.it (ultimo accesso: gennaio 2026).

Efficienza energetica e sicurezza sul lavoro nella produzione di vapore a scopi industriali

L. Cuccaro[1], M. Marengo[1]

[1]Università degli studi di Pavia - dipartimento di Ingegneria civile e architettura

Sommario
La produzione di vapore a uso industriale rappresenta un nodo strategico nel percorso di transizione energetica, in coerenza con l'obiettivo n.7 dell'Agenda 2030. I generatori di vapore, in quanto attrezzature soggette a normative stringenti in materia di sicurezza e monitoraggio, richiedono oggi un approccio gestionale evoluto che integri tecnologie innovative, metodologie di asset integrity e criteri di efficienza energetica. Il contributo presenta un modello tecnico-gestionale per impianti termici industriali che integra strumenti di diagnostica evoluta, sistemi di monitoraggio continuo, analisi integrata delle incertezze e strategie di miglioramento dell'efficienza. Il rischio non dovrà più interpretato come mera probabilità di accadimento, ma come effetto dell'incertezza legata alla disponibilità e qualità dell'informazione, assumendo un ruolo centrale nella definizione delle priorità di intervento e nelle strategie di manutenzione, in piena conformità ai principi cardini della UNI ISO 31000, gestione del rischio, per creare e proteggere valore.
La metodologia proposta definisce un semplice percorso operativo e progettuale, fondato sull'acquisizione e analisi dei dati di esercizio, sull'individuazione delle perdite energetiche e sul monitoraggio dei parametri critici del generatore di vapore. Gli esempi di conduzione e accorgimenti trattati evidenziano come l'integrazione di soluzioni adottate, sia in fase progettuale sia in fase gestionale, consenta di migliorare l'efficienza termodinamica, incrementare l'affidabilità e la sicurezza dell'impianto e degli operatori, in conformità ai principi dell'ottavo programma d'azione per l'ambiente dell'Unione Europea, vigente fino al 2030.

1. Introduzione
La produzione di vapore acqueo destinato ad applicazioni industriali (di seguito, "vapore") rappresenta un'infrastruttura energetica fondamentale in numerosi settori produttivi, tra cui quello sanitario, chimico, farmaceutico, alimentare, energetico e manifatturiero. In ambito ospedaliero, ad esempio, la disponibilità di vapore costituisce un requisito essenziale per processi quali la sterilizzazione, la climatizzazione e l'alimentazione dei servizi tecnici.
La transizione energetica in atto richiede il raggiungimento di obiettivi sempre più ambiziosi di riduzione dei consumi e delle emissioni, ed in questo scenario, gli impianti termici devono essere gestiti con un approccio integrato che consideri aspetti di sicurezza, efficienza, monitoraggio avanzato e sostenibilità.

Il presente lavoro propone un modello tecnico-gestionale in grado di coniugare asset integrity, efficienza energetica e tecnologie dell'Industria 4.0, evidenziando come un adeguato sistema informativo e un'analisi strutturata delle incertezze operative possano incrementare in modo significativo performance e sicurezza.
La gestione delle apparecchiature a pressione lungo l'intero ciclo di vita [1] è fondamentale per garantire sicurezza, affidabilità e conformità normativa. Oltre alla comprensione dei meccanismi di degrado dei materiali, è essenziale conoscere gli strumenti a disposizione per limitarne gli effetti. Le attività di manutenzione prevedono ispezioni periodiche, controlli non distruttivi e diagnosi dei fenomeni di corrosione e degrado, consentendo di prevenire incidenti, proteggere l'ambiente e assicurare la continuità produttiva, in conformità a norme UNI/TS 11325 e alla legislazione nazionale [1].
Le nuove linee guida forniscono indicazioni per valutare oltre 70 meccanismi di danno, con schede che comprendono materiali suscettibili, fattori critici, localizzazione del danno e metodi di controllo, comprese le prove non distruttive. Particolare attenzione è dedicata alle tubazioni (UNI 11325-7) e ai sistemi di monitoraggio dei parametri di esercizio (UNI/TS 11325-13), che utilizzano sensori e trasduttori per raccogliere dati continui o periodici secondo logiche PDCA, supportando l'analisi dei fenomeni fisico-chimici e la pianificazione delle verifiche.
Il quadro normativo europeo, in particolare la dir. PED, insieme alle norme armonizzate CEN (UNI EN 12952 e UNI EN 12953), definisce i requisiti essenziali di sicurezza e le modalità di integrazione dei generatori di vapore, assicurando prestazioni ottimali, affidabilità e conformità lungo tutto il ciclo di vita delle apparecchiature.

2. Gestione energeticamente efficiente di un generatore di vapore, della rete di distribuzione e ottimizzazione degli usi finali

La conoscenza profonda dell'impianto e di tutte le variabili interne ed esterne che ne influenzano il funzionamento è la condizione necessaria per produrre vapore nel pieno rispetto dei requisiti, al fine di risparmiare energia e soprattutto ridurre i costi di produzione. È importante soffermarsi su ogni singola apparecchiatura per rispettare il più possibile il funzionamento ai dati nominali: la caldaia, ad esempio, non deve essere esercita con un carico superiore a quello di targa, in quanto produrrebbe vapore ad una pressione più bassa, e si formerebbero sedimenti solidi nella condensa. Di seguito si analizzeranno in rassegna alcuni accorgimenti che miglioreranno la resa energetica.

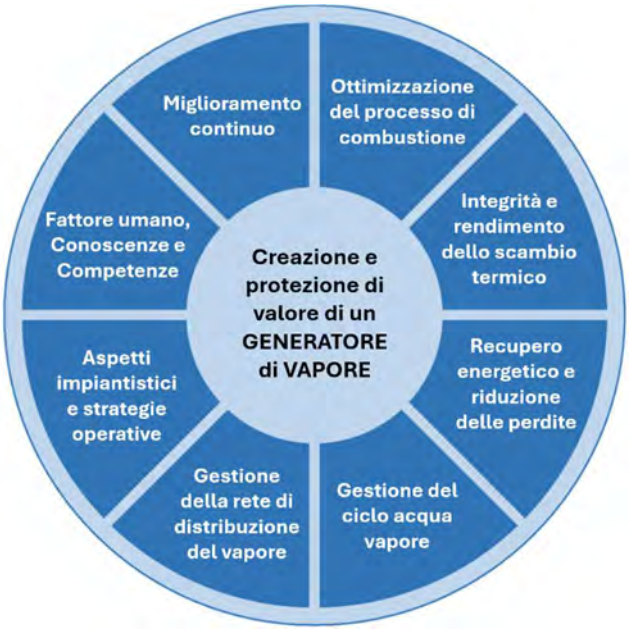


Figura 1. Principi di creazione e protezione di valore di un generatore di vapore [7]

2.1 Ottimizzazione del processo di combustione

Nei generatori che utilizzano aria come comburente è necessario fornire un eccesso rispetto al valore stechiometrico teorico. In condizioni reali, infatti, l'aria teorica non è sufficiente a garantire la completa ossidazione, a causa di fattori quali geometria del focolare, tipologia di combustibile e caratteristiche della testa di combustione. L'eccesso d'aria (E) è quindi indispensabile per assicurare la stabilità e la completezza della reazione; tuttavia, non deve essere eccessivo, poiché comporta un incremento delle perdite per calore sensibile al camino (P_{cs}), proporzionali alla differenza tra temperatura dei fumi (T_f) e temperatura ambiente (T_a), secondo la relazione che include la costante di Hassenstein (K_s) [2].

$$P_{cs} = K_s \frac{T_f - T_a}{\%CO_2} \quad (1)$$

Un eccesso d'aria elevato riduce il rendimento del generatore di vapore per maggiori perdite convettive ai fumi e favorisce la formazione di NO_x per incremento della temperatura di fiamma. Nei generatori di vapore la portata di combustibile è regolata dalla pressione del collettore tramite un trasmettitore (PIC) collegato al controllore. In caso di calo della pressione, ad esempio per aumento della domanda, la regolazione segue una logica sequenziale: prima si incrementa l'aria comburente, poi il combustibile, garantendo un adeguato rapporto aria/combustibile e la stabilità della combustione. In caso di pressione superiore al set point, la sequenza è inversa: si riduce prima il combustibile e successivamente l'aria. La verifica delle condizioni di combustione si basa sull'analisi dei fumi, anche mediante i diagrammi di Ostwald, che consentono di valutare lo scostamento dal punto di combustione ottimale e l'eventuale presenza di incombusti. Ogni combustibile è caratterizzato da un proprio diagramma; di seguito è riportato quello relativo al gasolio.

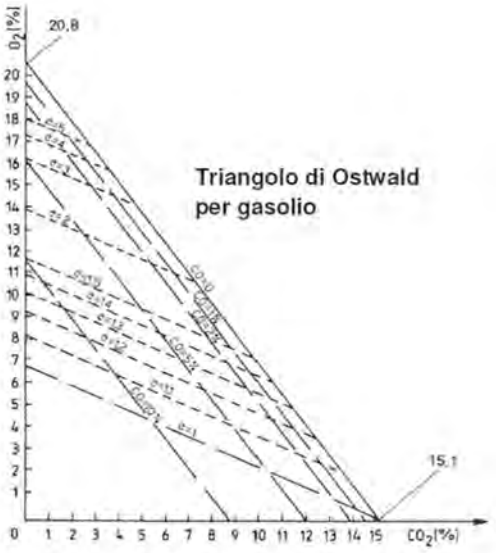


Figura 2. Triangolo di Ostwald del gasolio [3]

2.2 Integrità e rendimento dello scambio termico

Le superfici di scambio termico sono inevitabilmente soggette a fenomeni di fouling, ovvero all'accumulo progressivo di impurità e depositi (ad esempio calcarei) che si stratificano nel tempo. Tali depositi introducono una resistenza termica addizionale e rendono la resistenza termica totale del sistema variabile nel tempo, con conseguente decadimento delle prestazioni energetiche. Un indicatore qualitativo dell'accumulo di depositi è rappresentato dalla temperatura dei fumi al camino T_f: a parità di combustibile bruciato, un suo aumento segnala una riduzione dell'efficacia dello scambio termico e quindi una maggiore quota di energia dispersa in atmosfera.
Dal punto di vista analitico, per uno scambio termico attraverso una parete cilindrica il flusso si esprime mediante il coefficiente globale di scambio U:

$$Q = U\, A_{ref} \Delta T_{ml} \quad (2)$$

dove ΔT_{ml} è la differenza media logaritmica di temperatura e A_{ref} è l'area di riferimento (interna o esterna).
Il coefficiente globale U è definito attraverso l'inverso della somma delle resistenze termiche in serie.

$$\frac{1}{UA_{ref}} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_{met}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_{dep}} + \frac{1}{h_e A_e} \quad (3)$$

dove:

- h_i e h_e sono i coefficienti di convezione interna ed esterna,
- k_{met} è la conducibilità del metallo,
- k_{dep} è la conducibilità del deposito,
- r_1, r_2, r_3 sono rispettivamente il raggio interno del tubo, il raggio esterno del metallo e il raggio esterno del deposito.

Poiché la conducibilità dei depositi è generalmente molto inferiore a quella del metallo ($k_{dep} << k_{met}$), anche uno spessore modesto di fouling può determinare un incremento

significativo della resistenza termica complessiva e quindi una riduzione del coefficiente globale U.
A parità di potenza termica richiesta Q, l'aumento della resistenza totale impone un incremento del salto termico complessivo necessario allo scambio. Nei generatori di calore i coefficienti di convezione lato fumi e lato fluido sono spesso elevati; pertanto, l'incremento del salto termico tende a concentrarsi prevalentemente nello strato solido (metallo + deposito), con un aumento del gradiente termico attraverso la parete.
Ne consegue un maggiore differenziale di temperatura tra superficie interna ed esterna del tubo, che genera tensioni termoelastiche dovute a dilatazioni non uniformi. Nel lungo periodo, tali sollecitazioni possono favorire fenomeni di fatica termica e, nei casi più critici, la rottura del componente.



Figura 3. Raffigurazione della differenza del flusso di calore scambiato in una tubazione pulita e incrostata internamente [4]

L'accumulo di impurità sulle superfici di scambio lato fumi dipende in modo significativo dalla tipologia di combustibile e dalle condizioni di combustione. Nel caso di combustibili gassosi (ad esempio gas naturale), il contenuto di ceneri e particolato è generalmente trascurabile; pertanto, in presenza di una combustione correttamente regolata, i fenomeni di deposito risultano limitati. In queste condizioni, l'incremento della resistenza termica lato fumi è normalmente modesto e associato principalmente a irregolarità locali della combustione.

Nel caso di combustibili liquidi (gasolio, olio combustibile) o solidi, i fenomeni di fouling possono assumere maggiore rilevanza e si distinguono generalmente in due categorie:

Fouling secco

È dovuto alla deposizione di particolato solido, ceneri e residui carboniosi (fuliggine) sulle superfici di scambio. Tali depositi formano uno strato a bassa conducibilità termica che:

1. riduce il coefficiente di convezione lato fumi,
2. incrementa la resistenza termica complessiva,
3. comporta un aumento della temperatura dei fumi in uscita.

Il fouling secco è tipicamente correlato alla qualità della combustione (atomizzazione nei liquidi, eccesso d'aria, miscelazione) e alla presenza di impurità nel combustibile.

Fouling corrosivo

È associato alla presenza nei fumi di composti solforati (SO_2, SO_3) che, raffreddandosi al di sotto della temperatura di rugiada acida, possono generare condense contenenti acido solforico. Queste condense:

1. favoriscono la corrosione delle superfici metalliche,
2. alterano la rugosità superficiale,
3. facilitano la successiva adesione di particolato.

Il fouling corrosivo non produce solo un aumento della resistenza termica, ma può compromettere l'integrità strutturale dei componenti, riducendone la vita utile. Per impianti alimentati con combustibili liquidi o solidi è quindi necessario prevedere operazioni periodiche di pulizia (soffiature di fuliggine), generalmente effettuate mediante vapore a bassa pressione o aria compressa, al fine di contenere l'accumulo di depositi e mantenere adeguati livelli di efficienza termica e sicurezza operativa.

2.3 Recupero energetico e riduzione delle perdite

La strategia del recupero del calore in ambito termotecnico non è una novità degli anni della transizione energetica in atto. Lo dimostra il fatto che un libro scritto negli anni Quaranta descriveva ampiamente sia "l'economizzatore", sia il "preriscaldatore di aria comburente".



Figura 4. Immagini di un preriscaldatore d'aria ed economizzatore degli anni '40 del secolo scorso [5]

L'**economizzatore** è un elemento chiave per il recupero energetico nei generatori di vapore, trasferendo il calore residuo dei gas di scarico all'acqua di alimento. Le soluzioni moderne riducono le perdite di carico e la superficie di scambio, ottimizzando le prestazioni. Il **preriscaldatore** dell'aria comburente recupera anch'esso calore dai fumi tramite scambiatori aria–aria di grandi dimensioni, con significative cadute di pressione. L'uso combinato di questi dispositivi riduce il consumo di combustibile a parità di vapore prodotto, migliorando l'efficienza termica, ma richiede un compromesso tra benefici energetici e oneri manutentivi dovuti alla complessità e alla frequenza dei guasti. Le problematiche nascono quando nel preriscaldatore lato fumi si creano zone fredde che rasentano il punto di rugiada acido, variabile del combustibile adottato. La percentuale di zolfo sotto forma di anidride solforica SO_3 reagisce con il vapor d'acqua presente, generando acido solforico, con le ovvie conseguenze disastrose di corrosione. Meno impattante è la

reazione tra vapor d'acqua e anidride carbonica, con formazione di acido carbonico: è un acido debolissimo, ma la sua permanenza nel tempo contribuisce ai processi di corrosione.
Rientra nella strategia di riduzione delle perdite il **monitoraggio periodico delle pareti refrattarie** del generatore di vapore che, attraverso una metodologia di indagine non distruttiva con analisi termografica consente di riscontrare la presenza di crepe o rotture. Le immagini vanno confrontate con le precedenti archiviate, al fine di ricercare eventuali diverse colorazioni. Lo stesso controllo andrebbe effettuato per le tubazioni coibentate.



Figura 5. Esecuzione di una analisi termografica del refrattario [6]

Le **fughe di vapore** si verificano potenzialmente in qualsiasi punto dell'impianto, in particolare da accoppiamenti flangiati, valvole, tenute, raccordi, tubazioni, etc.



Figura 6. Esempi di fughe di vapore [7]

Le perdite di vapore costituiscono un rilevante problema di sicurezza per il personale presente in prossimità della fuga, comportando rischi quali esposizione a rumore, ustioni e lesioni da taglio. In particolare, gli sfiati di vapore ad alta pressione risultano particolarmente insidiosi poiché, essendo invisibili per un certo tratto, possono esercitare un'elevata capacità lesiva. In presenza di impianto in esercizio, l'intervento temporaneo avviene mediante applicazione di una scatola metallica esterna con iniezione di composto sigillante ("furmanite"), resistente fino ad una temperatura di circa 600°C. La riparazione definitiva è eseguita successivamente ad impianto fermo e depressurizzato.



Figura 7. Esempi di scatole di furmanite per contenimento provvisorio di una fuga pericolosa di vapore [10]

A differenza della fuga di vapore, lo **sfiato di vapore** è un'operazione in campo che la maggior parte delle volte deve essere eseguita perché rientra nella prassi operativa, nelle procedure o addirittura nelle disposizioni obbligatorie di legge (ad esempio provare lo sfiato di una valvola di sicurezza manualmente per poi farla richiudere subito). Gli sfiati vengono effettuati, ad esempio, quando una caldaia è in fase di avviamento; con un solo bruciatore acceso, (quello centrale possibilmente) si riscaldano membrature, refrattario e massa di acqua, la quale, iniziando man mano a riscaldarsi e vaporizzare, convoglia il primo vapore in atmosfera (appunto come sfiato). La strategia di riduzione sfiati consiste allora nel rispettare pedissequamente le istruzioni che indica il costruttore sull'intervallo di tempo necessario, e nel non far flussare per un tempo ancora maggiore.

2.4 Gestione del ciclo acqua-vapore

Il controllo della concentrazione dei sali nell'acqua di caldaia può essere effettuato tramite spurgo dal punto più basso del circuito acqua–vapore, oltre al monitoraggio dell'acqua di alimento. L'operazione consente di riportare i TDS (sali totali disciolti), silice e alcalinità entro i limiti previsti dalla normativa vigente per i generatori di vapore, ma comporta una perdita energetica significativa, poiché l'acqua scaricata è liquido saturo ad alta entalpia. Per ridurre la frequenza degli spurghi, è possibile incrementare (se non contaminata) la portata di reintegro delle condense, favorendo la diluizione dei sali. La portata massica di spurgo viene determinata tramite bilancio di massa rispetto all'acqua di alimento.

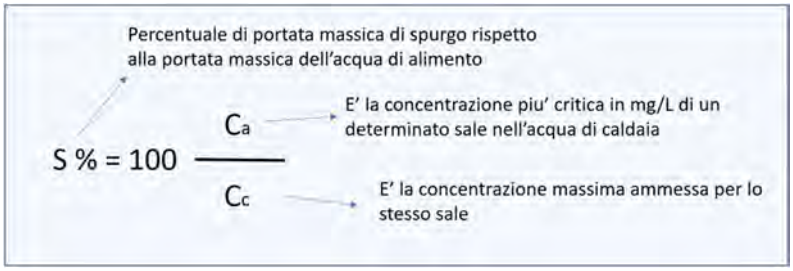


Figura 8. Formula per portata massica spurgo caldaia [3]

Controllare i flussi in un sistema di regolazione in continuo è impresa ardua, in quanto qualsiasi strumento misuratore di portata sarebbe ingannato dal passaggio all'interno del suo "disco orifizio venturi" sia dell'acqua sotto forma di vapore, sia di acqua del

liquido saturo. Si preferisce quindi stimare le portate riferendosi in proporzione alle concentrazioni e/o conducibilità.
Ogniqualvolta poi si effettua uno spurgo di acqua di caldaia, soprattutto quando questo avviene in modo continuo, è economicamente vantaggioso recuperare l'energia che lo spurgo porta con sé; in teoria essa può essere recuperata nella sua interezza: sia l'aliquota di energia termica nel vapore di flash (che può alimentare ad esempio il collettore di bassa pressione), sia il calore presente del condensato che rimane sul fondo della cassa spurghi (ad esempio per preriscaldare l'acqua di reintegro in caldaia).
Per i generatori di vapore industriali si rimane comunque in ambito di normative tecniche come le serie UNI EN 12952 (generatori di vapore a tubi d'acqua) e UNI EN 12953 (generatori a tubi di fumo), che trattano aspetti di progettazione, costruttivi e di esercizio, inclusa la gestione dell'acqua di alimento, mentre le prescrizioni qualitative dell'acqua sono integrate anche nelle indicazioni di tali serie.

2.5 Gestione della rete di distribuzione alle utenze

Una corretta progettazione della rete di distribuzione del vapore alle utenze è fondamentale per garantire il regolare funzionamento dell'impianto. Difetti progettuali possono compromettere gli sforzi per l'efficienza energetica e l'integrità dell'asset, rendendo difficile fornire vapore con le caratteristiche previste dalle specifiche di progetto. Il vapore saturo secco o surriscaldato agisce come fluido termovettore e non richiede sistemi meccanici per il trasporto, potendo raggiungere velocità di 70–80 km/h a seconda della differenza di pressione tra punto di partenza e di arrivo.
Le indicazioni progettuali vengono egregiamente strutturate nell'opera di cui al riferimento bibliografico [9].
Per quanto riguarda il dimensionamento delle tubazioni i dati necessari per il calcolo sono la portata, la velocità, le perdite di carico (di pressione), lunghezza [9].
Altri e molteplici aspetti da non trascurare [9]:

- Assicurare drenaggi con adeguati scaricatori e pozzetti di raccolta di condensa;
- La pendenza del tubo deve essere adeguata al diametro e alla lunghezza;
- Effettuare lo stacco della presa di vapore all'utenza dall'alto;
- Le riduzioni di diametro di tubazioni tali da evitare sacche di condensa;
- Distribuire dei separatori di condensa nei punti strategici per evitare colpi d'ariete;
- Si deve prevedere il riscaldamento assistito per grossi diametri;
- Prevedere sfiati d'aria nelle parti alte;
- Prevedere una buona coibentazione;
- Prevedere ancoraggi idonei e giunti dilatatori [9].

2.6 Aspetti impiantistici e strategie operative

La scelta del numero di bruciatori accesi quando si hanno più generatori in parallelo su un collettore vapore unico è compito strategico del responsabile di centrale, che deve valutare, ad esempio, tra la "disponibilità" immediata di una caldaia in "riserva calda", pronta per essere messa a pieno regime, e la "affidabilità": quest' ultima può venir meno, in quanto se la caldaia viene lasciata accesa con un solo bruciatore, questo non potrà riscaldare in maniera uniforme la camera di combustione; ciò potrebbe creare disuniformità dello stato tensionale della membratura metallica e quindi ridurre inevitabilmente il livello di affidabilità.
La scelta dovrà essere frutto di un "trade-off": favorire l'affidabilità dell'intero impianto oppure l'affidabilità del generatore di vapore in "riserva calda".

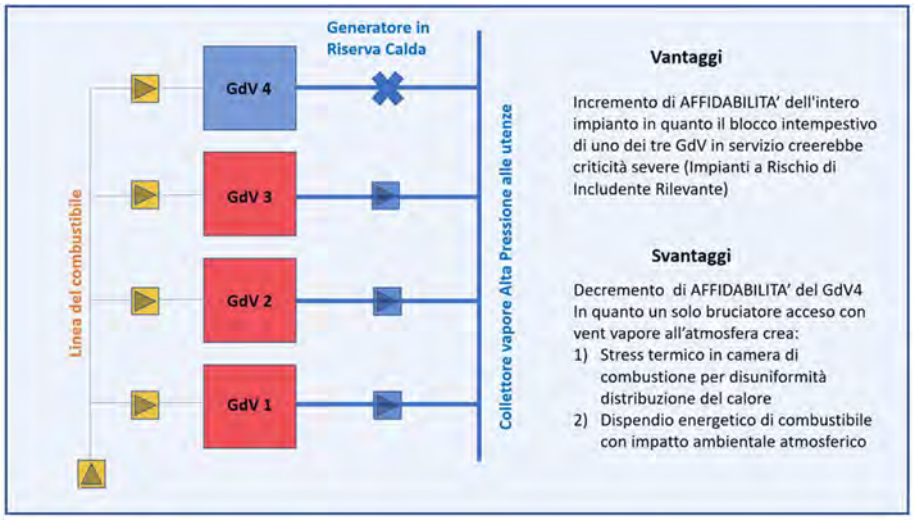


Figura 9. Schema semplificato di batteria di generatori di vapore in parallelo con riserva calda [7]

Taluni assetti vanno concordati e autorizzati dal Ministero Ambiente e Territorio, in ambito "Autorizzazione Integrata Ambientale", definendo le modalità di esercizio con l'obiettivo di scegliere sempre, caso per caso, la soluzione economicamente vantaggiosa.
La **gestione del combustibile** nei generatori di vapore industriali e nelle centrali elettriche è complessa, soprattutto in un contesto di instabilità geopolitica e nell'ambito della transizione energetica verso la progressiva eliminazione dei combustibili fossili, in linea con l'Obiettivo 7 dell'Agenda 2030. La scelta del combustibile dipende dal tipo di generatore, dalle autorizzazioni ambientali e dai piani di monitoraggio e controllo. In Italia, la maggior parte dei generatori di vapore è a piccolo volume d'acqua e può utilizzare combustibili misti, con prevalenza di gas naturale; il gasolio è impiegato principalmente per l'avviamento iniziale.
Il **degasatore termofisico**, nella stragrande maggioranza degli impianti industriali, è parte integrante del sistema di trattamento acque di alimento dei generatori di vapore. Esso è di solito l'ultimo passaggio di lavorazione ed è posizionato in quota

rispetto al baricentro della girante della pompa di alimento: questa costituisce una scelta strategica volta a creare una prevalenza netta positiva di aspirazione alla pompa, in quanto influisce sul valore di 'NPSH (Net Positive Suction Head), in modo tale da prevenire fenomeni di cavitazione all'interno della girante (supponendo che trattasi di pompe di tipo centrifugo).

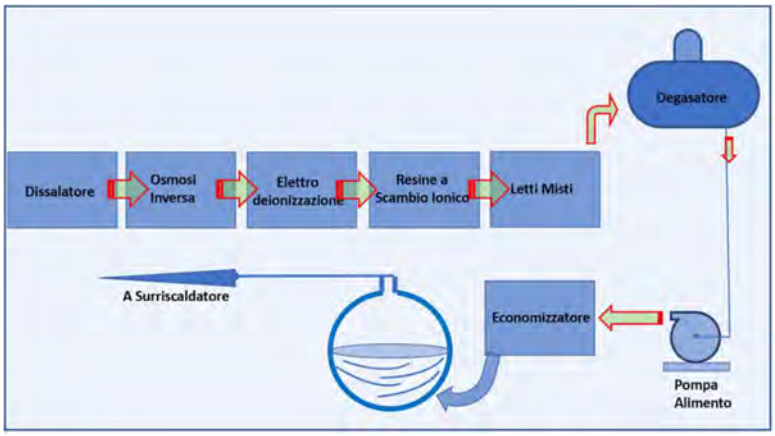


Figura 10. Schema semplificato di una ipotetica filiera del processo trattamento acqua di alimento di una centrale termoelettrica [7]

Il degasatore termofisico svolge le seguenti funzioni:

- Abbatte l'ossigeno e l'anidride carbonica;
- Preriscalda l'acqua in alimento alla caldaia;
- Serbatoio di accumulo (in quota) per l'acqua di alimento;
- Miscelare le condense pulite di ritorno dalle utenze con l'acqua di reintegro.

Il vapore di bassa pressione viene fatto flussare in controcorrente all'acqua ancora ricca di gas disciolti: essa, riscaldandosi, riduce il suo potere solubile. La separazione dei gas viene favorita se, anziché lavorare alla pressione atmosferica, si lavora ad una pressione ridotta. Il diagramma mostra il contenuto di ossigeno disciolto nell'acqua in funzione di pressione e temperatura. Alla temperatura di ebollizione di 105 °C e alla pressione di esercizio di 1,2 bar assoluti, l'ossigeno disciolto risulta essenzialmente assente.[8].

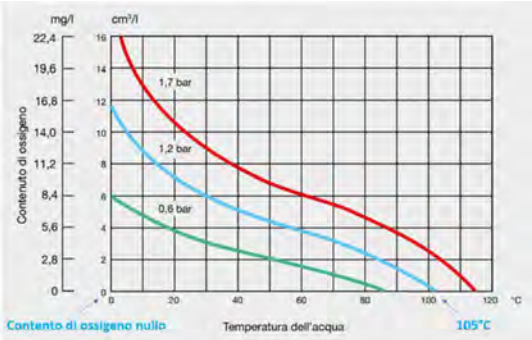


Figura 11. Andamento della concentrazione dell'ossigeno in funzione della temperatura e della pressione di lavoro [8]

Per gli **usi finali ed il recupero della condensa**, la conoscenza approfondita del bisogno energetico di una certa utenza consente di non eccedere con la fornitura inutilmente maggiorata di massa di vapore.
L'energia termica recuperata dalla condensa è concentrata in quella massa di fluido che ha ceduto calore e che deve far spazio subito ad altro vapore che svolgerà la stessa funzione: essa deve pertanto esser rimossa di continuo; non va considerata come scarto, bensì come una risorsa, in quanto ha un valore entalpico maggiore dell'acqua di reintegro in caldaia. Se non inquinata, essa non necessita di un trattamento chimico successivo.
Le apparecchiature che compongono un sistema di recupero condense sono: scaricatrici di condensa, serbatoi di recupero di flash, pompe, filtri. La fattibilità economica alla realizzazione va valutata anche in base alla dimensione dell'impianto e, soprattutto, è attuabile se la percentuale di recupero è maggiore dell'80%, sempre in processi dove non c'è vapore a perdere. Maggiore è la condensa che si recupera, minore è l'energia richiesta dal degasatore, minore sarà l'acqua di reintegro, minori sostanze chimiche per il trattamento, minori spurghi di caldaia per maggiore diluizione di acqua di buona qualità.

2.7 Fattore umano, conoscenze e competenze

L'efficacia di qualsiasi metodologia tecnica, operativa e progettuale applicata ai generatori di vapore trova il proprio limite nelle competenze di chi è chiamato a gestirli. Anche il sistema più evoluto può risultare vulnerabile se non supportato da conoscenze tecnico-normative e da capacità relazionali e decisionali. In questo ambito, l'Italia è stata tra le prime nazioni a disciplinare formalmente la formazione dei conduttori caldaie con il Regio Decreto 824/1927, introducendo un impianto regolatorio organico. Più recentemente, il Decreto Ministeriale 94/2020 ha ridefinito i percorsi di abilitazione, articolandoli in funzione della complessità impiantistica e della producibilità del generatore fagocitando i contenuti al d.lgs.81 08 e smi.
La sicurezza di persone, asset aziendali e ambiente dipende dunque non solo dal rispetto delle procedure, ma dalla consapevolezza critica dell'operatore. In particolare, l'evoluzione dei sistemi automatici e del controllo da remoto non deve generare un affidamento incondizionato: la supervisione diretta e la capacità di interpretazione preventiva restano presidi imprescindibili, anche in assenza di segnalazioni di una condizione di allarme di processo.

2.8 Miglioramento continuo

Il miglioramento continuo rappresenta un requisito strutturale nella gestione dei generatori di vapore e delle apparecchiature in pressione, in quanto condizione necessaria per garantire nel tempo sicurezza, affidabilità e rendimento.
I sistemi impiantistici complessi sono soggetti a degrado, deriva dei parametri operativi e progressiva perdita di controllo delle variabili critiche: un aumento dell'entropia tecnico-organizzativa. Il miglioramento continuo costituisce il

meccanismo di contrasto a tale tendenza attraverso monitoraggio sistematico, analisi dei dati, riesame delle condizioni di esercizio e aggiornamento delle strategie manutentive. Fondamentale è l'analisi strutturata di incidenti e quasi-incidenti, interni ed esterni all'organizzazione. Lo studio dei casi reali consente di individuare vulnerabilità latenti e criticità nell'interazione tra componente tecnica e fattore umano, trasformando l'evento avverso in conoscenza preventiva. Sebbene tali attività comportino un investimento di tempo e risorse, il loro costo è trascurabile rispetto alle conseguenze tecniche, economiche e reputazionali di un incidente rilevante. In sistemi ad alta energia come le apparecchiature in pressione, il miglioramento continuo non è un'opzione gestionale: è una condizione tecnica di sopravvivenza del sistema.

3. Conclusioni

Nel quadro dei principi della ISO 31000, l'analisi strutturata di incidenti e quasi incidenti non rappresenta un mero adempimento tecnico, ma un esercizio di responsabilità organizzativa e apprendimento collettivo. La valorizzazione sistematica delle evidenze post-evento e della letteratura specialistica nutre un processo di miglioramento continuo capace di trasformare l'esperienza in prevenzione e la criticità in conoscenza consolidata. In questa traiettoria evolutiva, il vapor d'acqua conserva il proprio ruolo di fluido termovettore e motore per eccellenza, per affidabilità tecnologica e sostenibilità economica. La sua centralità è destinata a perdurare nel tempo, in coerenza con l'Obiettivo 7 promosso dall'Organizzazione delle Nazioni Unite nell'ambito dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, quale contributo concreto a un sistema energetico accessibile, sicuro e sostenibile.

Bibliografia e sitografia

[1] G. Pinna. "Attrezzature in pressione: la gestione nel ciclo di vita". Energia & Dintorni Luglio 2023 pag 8.
[2] F. Pierini – Generatori di Vapore, pag. 308
[3] F. Andreini – F. Pierini – La conduzione dei generatori di vapore VII Ediz. – pag.401
[4] https://www. acquainforma.it/eliminare-il-calcare-di-casa-e-aziende/eliminare-calcare-nelle-tubature/ (15/02/2026)
[5] B. Setti. Cos'è e come si conduce la CALDAIA A VAPORE, anno 1939 I edizione.
[6] https://www.ispeco.it/it/servizi/controlli-non-distruttivi-avanzati_105/termografia-e-termografia-su-fornaci-tir_131(15/02/2026)
[7] L. Cuccaro. Immagini e schemi realizzati in maniera indipendente
[8] https://www.unicalag.it/upload/blocchi/X380allegatoDEPLIANT1-1X_dear_it_05-2023.pdf (15/02/2026)
[9] L. Piovan. Progettare impianti a vapore. pag 111.
[10] https://furmanitehk.com/wp-content/uploads/2020/11/Leak-Sealing.pdf; (15/02/2026)

Studio di un algoritmo per la manutenzione predittiva di attrezzature in pressione basato su principi di machine learning

F. Negri[1,2], A. Galeazzi[3], F. Gallo[1], F. Manenti[2], I. Mazzarelli[4], E. Pichini[5]

[1]Itelyum Regeneration S.p.A., Pieve Fissiraga (LO)
[2]Politecnico di Milano. Dip. di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta",
[3]Dept. of Chemical Engineering, Imperial College London, South Kensington Campus
[4]Inail - Uot di Milano
[5]Inail - Dit

Sommario
Lo studio è mirato ad illustrare lo sviluppo di un algoritmo predittivo ibrido basato su principi di machine learning nella forma dei processi gaussiani, utilizzato per la manutenzione predittiva di attrezzature a pressione. Il modello è applicato a un caso studio industriale in un processo di rigenerazione di olio minerale usato al fine di prevedere l'andamento del differenziale di pressione (ΔP) tra testa e coda della colonna di distillazione principale, indicatore del degrado dovuto allo sporcamento, con lo scopo di stabilire i corretti tempi di manutenzione per ottimizzare il processo esaminato ed utilizzare correttamente l'attrezzatura. Viene illustrata la forma del modello ibrido, comprensiva sia di una parte meccanicista espressa mediante un'equazione pseudo-fisica che impone vincoli di fattibilità, sia di una componente puramente statistica basata sull'approccio stocastico dei processi gaussiani cui è legata l'incertezza residua del modello. La manutenzione predittiva è effettuata elaborando dati di impianto in tempo reale, al fine di programmare la fermata della colonna quando la traiettoria di ΔP più probabile proposta dall'algoritmo possa superare il limite delle normali operazioni della colonna, inteso come limite al di sopra del quale l'efficienza ed i costi operativi associati al processo risultano antieconomici. Il modello proposto evidenzia ottime performance rispetto alla strategia di manutenzione storica, basata su una soglia di allarme statica e semi-empirica. Il presente modello è inoltre generalizzabile e utilizzabile per altre apparecchiature a pressione, ad esempio per studiare l'evoluzione temporale di fenomeni di creep o invecchiamento.

1. Introduzione

Nel contesto dell'Industria 4.0, la manutenzione industriale sta vivendo una trasformazione profonda grazie alla disponibilità crescente di sensori, sistemi di acquisizione dati e piattaforme di calcolo in grado di integrare informazioni eterogenee in tempo reale. In questo scenario, il Machine Learning (ML) rappresenta uno dei principali abilitatori del passaggio da strategie reattive o puramente preventive a un approccio realmente predittivo, capace di stimare l'evoluzione del degrado delle unità e anticipare guasti o perdite prestazionali prima che esse

impattino su sicurezza, qualità e costi operativi. Oltre ai modelli esclusivamente data-driven, sono particolarmente promettenti i modelli ibridi, che combinano la robustezza interpretativa di equazioni deterministiche, quali ad esempio bilanci di massa ed energia, leggi di trasporto o modelli di degradazione fisica, con la flessibilità dei modelli statistici basati sui dati, in grado di individuare andamenti non-lineari, discontinuità, periodicità, e simili. Questa sinergia consente spesso di migliorare accuratezza e generalizzazione, soprattutto in condizioni di sistemi complessi o operazioni fuori dal dominio nominale. Tra gli approcci di machine learning, i Processi Gaussiani (*Gaussian Processes, GP*) offrono un vantaggio distintivo in quanto, oltre a fornire una previsione puntuale, restituiscono una stima coerente dell'incertezza associata, elemento cruciale nelle decisioni manutentive. Grazie alla loro natura probabilistica e alla capacità di modellare funzioni non lineari con covarianza appropriata, i GP risultano particolarmente efficaci nella previsione di serie temporali e nella previsione di variabili di processo, supportando strategie di manutenzione predittiva più affidabili. Il presente studio mostra lo sviluppo di un modello ibrido basato su processi gaussiani per effettuare manutenzione predittiva, e l'applicazione a un caso studio industriale che comprende una colonna di distillazione sottovuoto, sita in un impianto di rigenerazione dell'olio minerale usato. Il modello risulta generale ed estendibile a qualsiasi apparecchiatura a pressione e ad ulteriori scopi manutentivi, come ad esempio il monitoraggio del creep e dell'invecchiamento delle unità.

2. Le norme nazionali in materia di monitoraggio delle attrezzature a pressione

L'obiettivo del monitoraggio nel contesto della presente memoria è quello di campionare ed elaborare dati di esercizio di una colonna di termodeasfaltazione sottovuoto (TDA) per la rigenerazione di olio lubrificante usato, operante in condizioni di inizio marcia a una pressione media di circa 5 mmHg e una temperatura in corrispondenza del fondo colonna pari a circa 360°C. Il fine dell'attività è quello di eseguire successive analisi del corretto andamento del processo secondo principi di ottimizzazione mirati a massimizzare la resa misurata in basi lubrificanti rigenerate. Analoghe applicazioni possono essere condotte per analizzare e valutare lo stato di conservazione e integrità di attrezzature con lo scopo di prendere decisioni sull'ulteriore esercibilità in sicurezza in presenza di meccanismi di danneggiamento (per esempio corrosione, scorrimento viscoso, fatica, ecc.). Il processo di monitoraggio è condotto mediante un campionamento continuo di specifici dati di processo, la cui elaborazione permette di predire andamenti nel medio-lungo termine del fenomeno fisico-chimico indagato. L'implementazione del modello ha previsto la scelta di una serie di elementi di un sistema di misura composto da sensori (sistema di acquisizione continuo) caratterizzati da una specifica frequenza di campionamento, un sistema di conversione dei segnali, un sistema di trasmissione ed elaborazione degli stessi, nonché un sistema di archiviazione dati a lungo termine per successiva elaborazione (post-processing). Nel contesto normativo esistono molteplici norme che trattano aspetti specifici dei sistemi sopra richiamati, fissandone caratteristiche fisiche e

tecnologiche. In ambito nazionale esiste un progetto di norma elaborato dal Comitato Termotecnico Italiano, che ha lo scopo di fornire indicazioni agli utilizzatori di impianti a pressione per la realizzazione di un sistema di monitoraggio dei dati di esercizio delle attrezzature a pressione, limitatamente alle grandezze: temperatura, pressione, livello e vibrazione. Al momento il progetto di norma si limita ai requisiti di progettazione e scelta del sistema di monitoraggio, senza fornire indicazione riguardo l'adattabilità dei sistemi al tipo di fenomeni di danneggiamento da indagare, inoltre non approfondisce oltremodo sistemi automatici decisionali sulla base dei dati acquisiti. Nel presente lavoro invece, oltre a definire il sistema di monitoraggio, verranno descritti ed approfonditi gli aspetti relativi ai sistemi di ultima generazione, che, in base all'elaborazione nel tempo dei segnali, predicono gli andamenti del fenomeno e consentono di effettuare scelte sulla gestione dell'impianto, in questo caso scelte manutentive e/o sostitutive. Il progetto di norma UNI cerca di relazionare le grandezze fisiche oggetto di acquisizione (anche in combinazione fra loro), al tipo di fenomeno di danneggiamento che potrebbe essere indagato, secondo la Tab. 1 di seguito riportata.

Grandezza	**Meccanismo di danneggiamento indagato**
Temperatura	Scorrimento viscoso, Fatica termica e termo-meccanica, Addolcimento, Infragilimento, Ossidazione, Surriscaldamento
Pressione	Deformazione plastica, Fatica
Livello	Surriscaldamento, Sovrappressione, Corrosione generalizzata e/o localizzata
Vibrazioni	Fatica non oligociclica o termo-meccanica, Corrosione generalizzata e/o localizzata Variazione dello stato di efficienza dei collegamenti di più componenti

Tabella**.** Tabella riassuntiva per relazioni tra grandezze e fenomeni di danneggiamento

È evidente che il sistema complessivo, e soprattutto l'algoritmo da implementare, deve tener conto dei principi fisici che sottendono a tali teorie dei meccanismi di danno; quindi, il sistema di monitoraggio non può non tener conto delle norme tecniche applicabili.

Le fonti di disturbo/interferenza sono rappresentate dalle sollecitazioni a cui il sistema stesso è sottoposto (es. pressione, temperatura, vibrazioni, composizione dell'olio usato in alimentazione, etc.) e dalle condizioni ambientali tipiche in cui si trova l'impianto, che in tal caso sono quelle di un clima continentale temperato umido, con temperature invernali minime intorno a -10°C, e valori massimi estivi di circa +40°C.

3. Processo e attrezzatura oggetto del monitoraggio

Il processo considerato in questo lavoro è una tecnologia brevettata di rigenerazione di oli lubrificanti usati chiamata Revivoil®, che attualmente costituisce la base delle operazioni industriali all'interno della raffineria di rigenerazione di oli usati di proprietà di Itelyum Regeneration S.p.A., a Pieve Fissiraga, Lodi. L'impianto può trattare fino a 130'000 t/anno di olio minerale usato, producendo oli base lubrificanti rigenerati di tipo spindle (FLS), leggero (FLL) e pesante (FLP), oltre a gasolio (VGO) e bitume. Il processo è composto da tre fasi consecutive: preflash, termodeasfaltazione e

hydrofinishing. Nella sezione di preflash, l'acqua e i solventi disciolti nell'olio vengono rimossi tramite riscaldamento in condizioni di vuoto moderato. Nella sezione di termodeasfaltazione, l'olio disidratato viene separato nei suoi componenti principali sotto forte vuoto (5-10 mmHg) ad alta temperatura (360°C), producendo diversi tagli semilavorati. Nella sezione di hydrofinishing, i tagli semilavorati provenienti dalla termodeasfaltazione vengono *"idrofiniti"* con idrogeno puro ad alta pressione (100 bar) e alta temperatura (300°C), ottenendo prodotti finiti completamente rigenerati. La colonna denominata T-401, rappresentata in Fig. 1, è l'unità di processo principale della sezione di termodeasfaltazione, dove avviene il frazionamento dell'olio usato, migliorato dall'impiego di un riempimento strutturato. Fenomeni complessi legati al trasferimento di massa, energia e quantità di moto, insieme allo sporcamento all'interno dell'unità (*fouling*), rendono questo sistema complesso e articolato da analizzare dal punto di vista della modellazione meccanicistica. Per questo motivo, un approccio basato su machine learning risulta particolarmente efficace, dato che è possibile studiare direttamente l'evoluzione temporale di specifiche variabili di processo senza dover modellare nel dettaglio i complessi fenomeni chimico-fisici sottostanti. Tra tutte le variabili disponibili per lo studio, una di esse emerge come la più significativa: il differenziale di pressione tra la sommità e il fondo della colonna TDA. Questa metrica rappresenta un indicatore affidabile dell'efficienza di separazione della colonna e dei consumi energetici associati. Infatti, con il procedere della marcia, lo sporcamento dovuto alla degradazione dell'olio usato causa un costante deterioramento delle prestazioni della colonna, fino a che risulta necessario fermare l'unità per procedere con opportuna manutenzione e pulizia. Lo schema estremamente semplificato della sezione del processo riportato in evidenzia il serbatoio di stoccaggio dell'olio usato disidratato proveniente dalla sezione Preflash (TK-401), la pompa di carica (P-401), il forno di processo di alimento alla colonna (PH-401B) e la colonna stessa (T-401). Sono inoltre evidenziati gli strumenti di misura usati per l'acquisizione dei segnali di interesse, ovvero la pressione di coda, (PI-4075), quella di testa (PI-4076), ed il flusso di carica in ingresso al forno (FIC-4058), pari al flusso entrante nella colonna. Infatti, la variabile oggetto di monitoraggio è il cosiddetto differenziale di pressione *specifico*, ovvero la differenza di pressione testa-coda per unità di massa, come descritto più in dettaglio nel seguito.

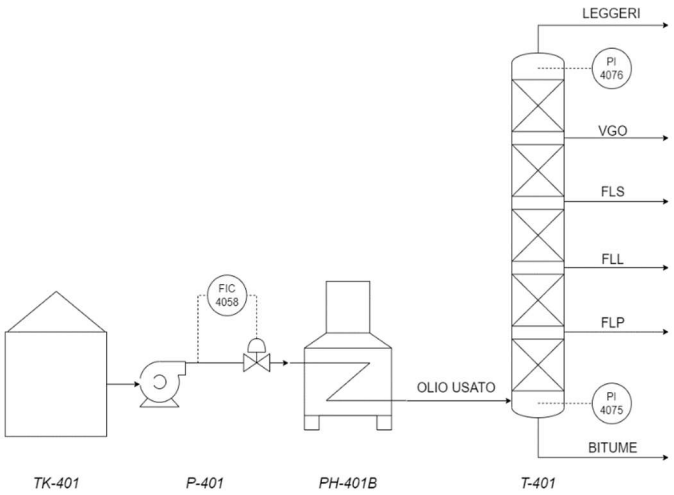


Figura 1. Rappresentazione schematica della sezione di termodeasfaltazione

4. Tecnica di monitoraggio basata su machine learning

Il sistema di monitoraggio dei dati di esercizio della colonna T-401 è stato ideato e strutturato con la finalità di stabilire in maniera ottimale il tempo di manutenzione periodica, costituite essenzialmente dalla pulizia del relativo impianto di rigenerazione dell'olio lubrificante usato. Il parametro utilizzato per il monitoraggio è il differenziale di pressione specifico per unità di massa (ΔP), come riportato in Eq. (1).

$$\Delta P = \frac{(P_{coda} - P_{testa})}{F_{olio}} \qquad (1)$$

dove P_{testa} e P_{coda} sono rispettivamente le pressioni di testa e di coda della colonna in mmHg, mentre F_{olio} è la portata di olio usato alimentata al forno in tonnellate. È dimostrato che il valore di ΔP è direttamente legato al livello di sporcamento della colonna, cui è strettamente legata la performance del processo. Lo scopo dell'attività di monitoraggio è quello di predire l'andamento nel tempo del valore di ΔP così da stimare lo stato di sporcamento della colonna e poter organizzare con opportuno anticipo le attività manutentive per la sua pulizia, evitando di agire osservando un calo delle prestazioni. Nell'impianto di rigenerazione sono stati definiti due valori fondamentali per il ΔP, intimamente legati al monitoraggio dell'unità. Il valore principale inteso come limite per le normali operazioni (*Normal Operations Limit, NOL*), corrispondente a circa 2.5 mmHg/t_{olio}. Questo limite non va inteso come una barriera oltre la quale non è possibile lavorare, ma piuttosto come un limite entro cui la colonna può essere esercita in maniera efficiente ed economicamente vantaggiosa. Lavorare oltre questo limite mantenendo la qualità dei prodotti è possibile, ma richiede consumi energetici elevati a causa dello stato di sporcamento avanzato della colonna, per cui l'esercizio della colonna diventa inefficiente. La manutenzione storica, utilizzata prima dello sviluppo del presente algoritmo, era basata sul principio di stimare "in base all'esperienza di esercizio" il raggiungimento del NOL partendo da un valore temporale di ΔP come soglia semi-empirica di preallarme pari a 2 mmHg/t_{olio}. Tale

approccio risultava eccessivamente statico, spesso non funzionando come sperato, in quanto basato appunto su una stima dell'andamento storico del ΔP, che nella realtà poi si è rilevato sovra o sottostimato, ciò conduceva ad una programmazione delle manutenzioni in modo antieconomico. Caso ancor più critico era rappresentato da rapide variazioni del ΔP non stimabili, che imponevano scelte manutentive just in time, che per loro natura presentano il rischio di inapplicabilità per potenziali problemi logistici (reperibilità di risorse umane e strumentali) ed organizzativi (gestione dei

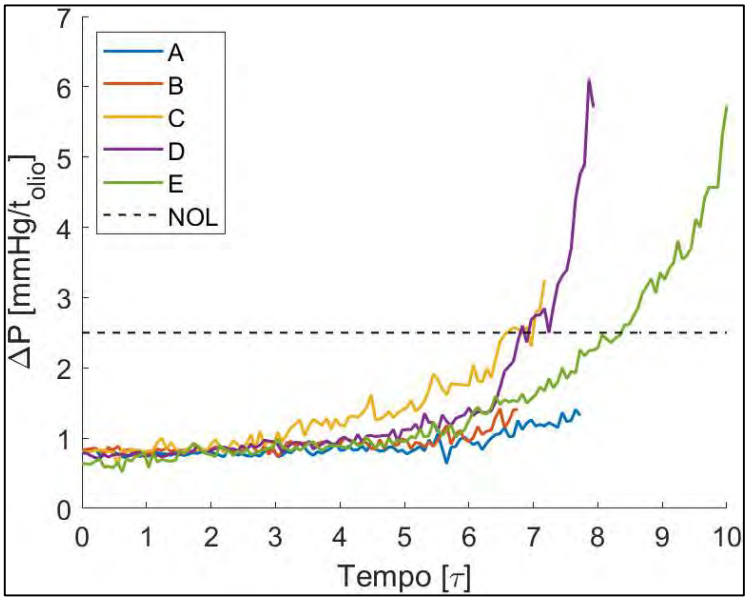


Figura 2. Andamenti di ΔP in funzione del tempo e NOL

flussi minimi da lavorare e massimi di scorta). A titolo di esempio, si riportano in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** cinque distinti andamenti del ΔP in altrettanti periodi di funzionamento ininterrotto della colonna T-401, reperibili da dati storici quando era ancora in uso la strategia di manutenzione storica (l'asse dei tempi τ è adimensionale per tutela del segreto industriale). È possibile notare come la strategia storica: nelle marce A e B non ha condotto ad una scelta (NOL non raggiunto) in quanto è sopraggiunta una fermata generale degli impianti legata ad altri motivi, nella marcia C aveva portato buoni risultati (pur avendo superato seppur di poco il NOL), mentre era risultata ampiamente inadeguata per i casi D ed E. In particolare nel caso D si era vericato un repentino e inaspettato innalzamento del ΔP rispetto a valori tipici, probabilmente a causa della lavorazione di una qualità di olio usato più propensa a dare sporcamento. Nel caso E, invece, la salita del profilo di pressione fu più contenuta nel tempo, ma la marcia si protrasse oltre i tempi stabiliti storicamente a causa di problemi logistici nel reperimento delle imprese incaricate della manutenzione, che causarono un ritardo nella programmazione della fermata. In entrambi i casi D ed E, la marcia della colonna si è protratta abbondantemente nella zona inefficiente, con impatti sull'economia del processo.

È quindi fondamentale assicurare una valutazione predittiva dell'andamento del ΔP per determinare tempi e modalità di manutenzione atti a ridurre al minimo i costi ed i rischi nella gestione del processo. La tecnica di monitoraggio mostrata con questo

lavoro si pone esattamente questo obiettivo: un modello ibrido basato su machine learning utilizzato per prevedere l'evoluzione del ΔP con notevole anticipo e maggior accuratezza, permettendo di prendere decisioni quando la colonna si trova ancora nel pieno della sua efficienza. La manutenzione a questo punto viene programmata stabilendo come data di fermo impianto il giorno τ di presunta uguaglianza tra ΔP e NOL, senza bisogno di soglie di preallarme semi-empiriche.

5. Caratteristiche e sviluppo del modello

Il modello ibrido basato sul machine learning, utilizzato nella tecnica di monitoraggio proposta, è formato da due componenti fondamentali: una pseudo-meccanicistica e una puramente statistica e data-driven (quest'ultima costituisce la parte di machine learning vera e propria). L'idea dell'approccio è quella di sviluppare un modello pseudo-fisico che contenga le principali caratteristiche del sistema sotto osservazione, in modo da fornire una base solida per l'applicazione del machine learning, che si troverà quindi a operare in uno spazio vincolato da limiti di consistenza fisica. Questo garantisce una maggiore robustezza dell'approccio rispetto a un modello completamente statistico/data-driven privo di vincoli, sebbene in genere ciò richieda una maggiore potenza di calcolo [1].

La presenza della componente di machine learning (ML), dall'altro lato, permette di poter utilizzare un modello pseudo-fisico piuttosto semplice, senza la necessità di entrare nel dettaglio di ogni termine modellato, cosa che sarebbe estremamente complessa data l'eterogeneità della materia prima olio usato. L'incertezza residua del modello è infatti gestita con il modello ML, che si prende carico dei termini ignoti e utilizza un approccio data-driven per la loro stima su base probabilistica [2]. Il modello pseudo-fisico è mostrato in Eq.(2) – tutte le quantità sono adimensionali per segreto industriale – dove λ e θ sono rispettivamente la lunghezza e lo spessore di un canale della tipologia di pacco strutturato utilizzata in colonna, α è un parametro "adattivo" che contiene tutta l'incertezza residua del modello, mentre $\delta_f(\tau)$ è lo spessore dello strato di sporcamento che cresce sulla parete interna del pacco strutturato, naturalmente in funzione del tempo.

$$\Delta P = \frac{\alpha}{\lambda}\left[1 - \frac{2}{\lambda}(\theta + \delta_f(\tau))\right]^{-4} \qquad (2)$$

In Figura 1 sono rappresentate tali grandezze in relazione a due immagini reali dove sulla sinistra è visualizzato uno strato pulito e sulla destra uno strato con un determinato grado di sporcamento. Un aspetto interessante del modello proposto è che prevede un asintoto verticale in corrispondenza di $\delta_f = (\lambda/2 - \theta)$, corrispondente a uno stato di completa ostruzione dei canali del pacco strutturato. Questo vincolo è fondamentale per la robustezza del modello, in quanto le previsioni tengono intrinsecamente conto di questo limite fisico di operabilità.

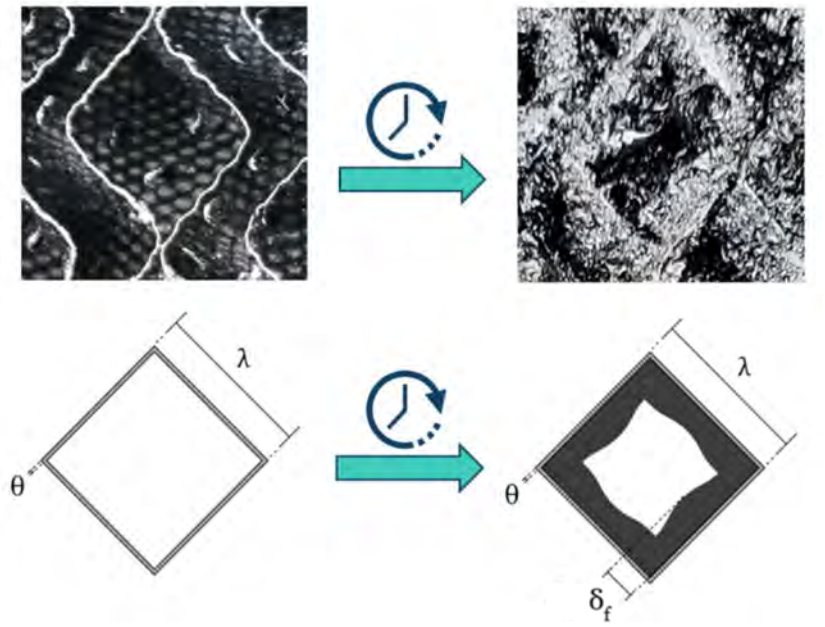


Figura 1. Rappresentazione di λ, θ, δ_f in un determinato istante

La componente machine learning del modello si occupa quindi di stimare l'evoluzione nel tempo dello spessore di sporcamento $\delta_f(\tau)$ insieme all'incertezza residua raccolta nel parametro α, dai quali automaticamente si ricava il corrispondente profilo di ΔP mediante il modello precedentemente descritto. La tecnica di machine learning utilizzata per la stima dell'evoluzione dello spessore di sporcamento $\delta_f(\tau)$ è la regressione con processi gaussiani (GPR). Questo approccio considera la variabile di interesse $\delta_f(\tau)$ come un processo stocastico in cui ad ogni istante di tempo è associata una distribuzione di probabilità con profilo Gaussiano. In questo modo, si ottiene un modello che fornisce in maniera naturale un profilo di probabilità associato alla variabile di interesse, con una traiettoria più probabile contenuta all'interno di un intervallo di confidenza probabilistico. L'approccio GPR è formalizzato in Eq.(3).

$$\delta_f(\tau) = GP(m(\tau), k(\tau, \tau')) \qquad (3)$$

Dove GP sta per processo gaussiano, m(τ) è la funzione media, e k(τ,τ') tra due istanti è la covarianza (*kernel*) del modello. La covarianza del modello riveste un ruolo fondamentale, in quanto è la componente che assume l'evoluzione temporale dello sporcamento. Ad esempio, un kernel lineare (LIN) assume che lo sporcamento cresca linearmente nel tempo, un kernel Gaussiano (RBF) assume che la funzione cresca in maniera "liscia" e infinitamente differenziabile, e una loro combinazione additiva (LIN + RBF) contiene entrambe le assunzioni. La scelta di una covarianza che rifletta correttamente le caratteristiche del sistema investigato è fondamentale per garantire una buona riuscita della regressione a processi gaussiani. Per questo motivo, il modello proposto effettua una ricerca automatica del kernel ottimale. In particolare, il modello effettua una cosiddetta "ricerca avida" (*greedy search*) strutturata come una ricerca iterativa ad albero: il modello parte da alcuni kernel di base, seleziona il migliore, e poi compone modelli di covarianza più complessi andando ad aggiungere altri kernel al modello più performante mediante somme e moltiplicazioni [3]. Questa composizione iterativa continua fino a una profondità scelta dall'utente, e mantiene in memoria il modello migliore ad ogni livello dell'albero di ricerca. Una volta terminata la ricerca, i modelli risultati migliori a ogni livello vengono confrontati, e viene selezionato il migliore in assoluto tra tutti, che verrà utilizzato come covarianza per lo spessore di sporcamento $\delta_f(\tau)$. Un'intuizione grafica della ricerca ad albero è fornita in Figura 2.

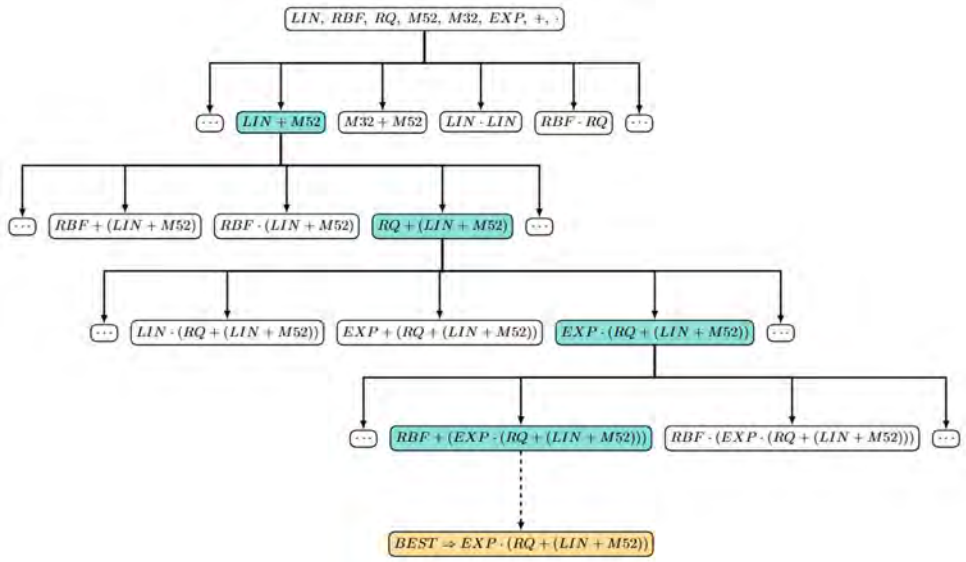


Figura 2**.** Rappresentazione grafica della *greedy search* utilizzata per la ricerca dei kernel

Un aspetto estremamente interessante dell'approccio GPR proposto è la sua assoluta generalità: la modellazione di una variabile come processo Gaussiano associato a una ricerca automatica della covarianza ottimale non richiede alcuno sforzo di modellazione da parte dell'utente, che può usare il metodo come una "scatola nera" (*black box*). Infatti, l'approccio ibrido utilizzato nel lavoro comprende un modello pseudo-fisico esclusivamente per incrementare la robustezza del metodo e le performance predittive, ma questo non è richiesto per l'applicazione del modello GPR

nella sua versione base. Infatti, il modello GPR tal quale è stato utilizzato in precedenza direttamente sui profili di ΔP della colonna e su variabili operative del forno di processo PH-401B associate (temperature, pressioni, portata di metano), modellando tutte queste quantità come processi gaussiani e dimostrando ottime capacità previsionali [4,5].

6. Applicazione del modello al processo

Il modello è applicato ai dataset di processo mediante un approccio a finestra scorrevole (*rolling window*). Tale approccio prevede la raccolta in continuo dei dati mediante il sistema automatico Yokogawa Exaquantum presente in impianto, che estrae dal sistema di controllo distribuito (DCS) i dati raccolti dai misuratori di pressione e portata precedentemente elencati. La continua raccolta di dati espande in tempo reale il dominio di training, che si comporta appunto come una finestra scorrevole che continua ad aumentare le sue dimensioni. L'algoritmo di ricerca quindi viene applicato al dataset mediante un protocollo predittivo riassumibile come segue:

- si assume un valore di primo tentativo per α e si convertono i profili di pressione ΔP in profili di spessore di sporcamento $\delta_f(\tau)$, invertendo la relazione mostrata in Eq.(2);
- l'algoritmo predittivo viene applicato al profilo di spessore di sporcamento, in modo da ottimizzare il valore del parametro adattivo α e prevedere l'evoluzione di $\delta_f(\tau)$;
- il dominio di training dell'algoritmo (ovvero i dati utilizzati per allenare l'algoritmo a trovare la covarianza più appropriata mediante la ricerca automatica ad albero) parte sempre da $\tau = 0$ e continua a crescere nel tempo, includendo i nuovi dati che vengono raccolti e aggiunti alla finestra scorrevole;
- si effettua una previsione estrapolativa che fornisce un andamento più probabile per l'evoluzione dello spessore di sporcamento, insieme a intervalli di confidenza probabilistica della previsione pari al 68% e 95%;
- si ottiene il corrispondente profilo di previsione probabilistica per il profilo di ΔP applicando il modello pseudofisico in Eq.(2), comprensivo del valore di α ottimizzato in automatico dall'algoritmo.

Il risultato dell'applicazione della procedura è illustrato in Figura 3, dove l'output dell'algoritmo è riportato ad un determinato istante di tempo. La linea spezzata continua sulla sinistra e quella tratteggiata sulla destra, entrambe di colore blu, rappresentano rispettivamente il dominio di training utilizzato per allenare l'algoritmo e un dominio di test che l'algoritmo non ha mai analizzato, utilizzato solo per verificare a posteriori la precisione della previsione. La previsione è rappresentata nel suo valore più probabile da una linea tratteggiata arancione, con i corrispondenti intervalli di incertezza statistica al 68% e 95% evidenziati rispettivamente dalle aree in verde scuro

e verde chiaro. Il sottotitolo della Fig. 5 riporta la combinazione ottimale di kernel trovata dall'algoritmo di ricerca, e il corrispondente valore ottimale del parametro α.
I valori di kernel e α riportati non sono da intendersi come costanti lungo il dominio,

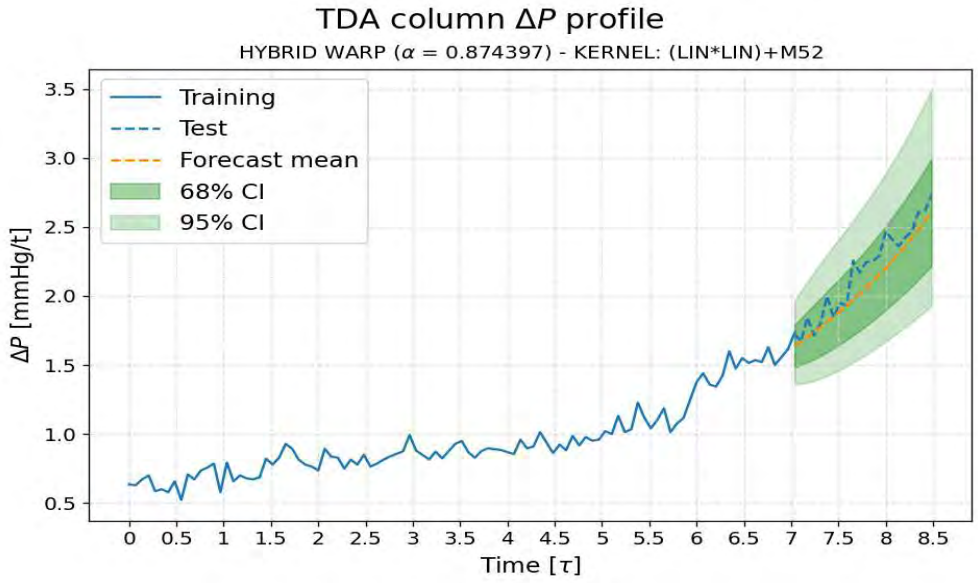


Figura 3. Esempio di output ottenuto con il modello predittivo ibrido machine

ma sono validi solo per la finestra riportata. Successive previsioni effettuate con una finestra scorrevole di dimensioni maggiori, a seguito dell'aggiunta di nuovi dati, potrebbero dare in generale risultati diversi. Questo è un vantaggio del presente metodo, che si adatta dinamicamente e automaticamente a condizioni di processo variabili nel tempo.

7. Ottimizzazione del processo e scelte manutentive in funzione dei risultati

Per valutare l'effetto di una possibile ottimizzazione legata all'organizzazione della manutenzione per la colonna T-401, l'algoritmo predittivo è stato applicato ad alcune marce precedentemente mostrate in **Errore. L'origine riferimento non è stata**

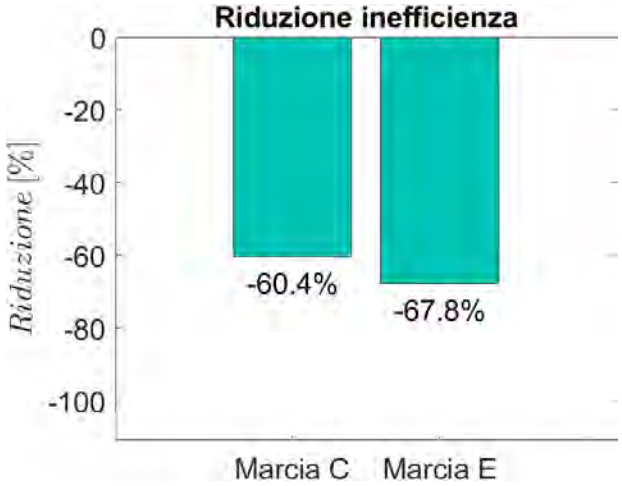


Figura 4. Riduzione del tempo di marcia inefficiente con protocollo di manutenzione

trovata., utilizzando una finestra predittiva lunga 1.5τ nel futuro. I risultati di questo protocollo di manutenzione predittiva sono illustrati in Figura 4.
La strategia di manutenzione predittiva descritta in precedenza, se implementata al posto della strategia storica, avrebbe portato a una riduzione del tempo di marcia nella regione inefficiente al di sopra del NOL di oltre il 60% in entrambi i casi in Figura 4. Si precisa che nel calcolo di questo valore è stato incluso il disagio logistico che ha protratto i tempi nella marcia E, in modo da non penalizzare eccessivamente la strategia manutentiva storica.

8. Conclusioni

L'impiego di un algoritmo predittivo basato su tecniche di *machine learning* per il monitoraggio di apparecchiature a pressione a fini manutentivi consente di supportare le decisioni con maggiore affidabilità e accuratezza rispetto alle strategie tradizionali, sia preventive sia a guasto. Infatti, queste intervengono secondo periodicità prefissate, spesso non correlate allo stato reale del processo, oppure solo a seguito del verificarsi del guasto. Al contrario, l'algoritmo proposto permette un monitoraggio continuo e in tempo reale dello stato di degradazione dell'apparecchiatura, fornendo anche una stima della sua evoluzione attesa e consentendo quindi di pianificare gli interventi sulla base delle effettive condizioni operative dell'impianto. Il modello è stato validato sui profili storici di pressione della colonna, relativi a un periodo in cui era adottata una strategia manutentiva statica basata su una soglia di preallarme semi-empirica. I risultati mostrano miglioramenti significativi associati alla strategia predittiva, con una riduzione superiore al 60% del tempo di esercizio trascorso in una regione operativa inefficiente. Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda la versatilità dell'approccio proposto. La componente di *machine learning*, fondata sui processi gaussiani, può infatti essere integrata in altri modelli pseudo-fisici analoghi a quello sviluppato per la colonna T-401, oppure impiegata direttamente per la previsione di variabili di interesse. Ciò ne evidenzia il potenziale di trasferibilità ad altri contesti applicativi. In tale prospettiva, l'algoritmo proposto potrebbe essere esteso anche a problemi di valutazione del creep o dell'invecchiamento in apparecchiature a pressione.

Bibliografia

[1] L. Swiler, M. Gulian, A. Frankel, C. Safta, J. Jakeman, A Survey of Constrained Gaussian Process Regression: Approaches and Implementation Challenges, J Mach Learn Model Comput 1 (2020) 119–156. https://doi.org/10.1615/JMachLearnModelComput.2020035155.
[2] F. Negri, A. Galeazzi, F. Gallo, F. Manenti, Enhancing Predictive Maintenance in Used Oil Re-Refining: a Hybrid Machine Learning Approach, Systems and Control Transactions 4 (2025) 1806–1811. https://doi.org/10.69997/sct.125404.

[3] D. Duvenaud, J.R. Lloyd, R. Grosse, J.B. Tenenbaum, Z. Ghahramani, Structure Discovery in Nonparametric Regression through Compositional Kernel Search, (2013). https://doi.org/10.48550/arXiv.1302.4922.
[4] F. Negri, A. Galeazzi, F. Gallo, F. Manenti, Reshaping Industrial Maintenance with Machine Learning: Fouling Control Using Optimized Gaussian Process Regression, Ind. Eng. Chem. Res. 64 (2025) 6633–6654. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04550.
[5] A. Galeazzi, F. de Fusco, K. Prifti, F. Gallo, L. Biegler, F. Manenti, Predicting the performance of an industrial furnace using Gaussian process and linear regression: A comparison, Computers & Chemical Engineering 181 (2024) 108513. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108513.

La sicurezza delle attrezzature ad aria compressa in relazione ai rischi derivanti dalla pressione e dalla temperatura

T. Scalici[1], N. Palumbo1, N. Rizzo[1], F. Rossetti[1]

[1]Inail - Uot di Brescia

Sommario

Le attrezzature a pressione inserite negli impianti ad aria compressa, rappresentano la maggior parte delle attrezzature soggette a verifiche di messa in servizio e successive verifiche periodiche, ai sensi del D.M. 329/04 e del Decreto 11 aprile 2011. Grazie alla versatilità del fluido, gli impianti ad aria compressa sono installati nelle aziende di ogni dimensione e tipologia, con differenti approcci alla sicurezza. In particolare, nelle piccole aziende, artigianali o famigliari, i rischi derivanti dall'utilizzo delle attrezzature a pressione sono tenuti in scarsa considerazione.

In questo articolo, si espongono gli errori riscontrati nella valutazione dell'analisi dei rischi e le non conformità rilevate durante le verifiche in campo, con l'intento di condividere le nostre valutazioni con i principali soggetti coinvolti: datori di lavoro, RSPP, progettisti, installatori, manutentori e verificatori pubblici e privati.

L'esperienza che condividiamo è maturata sia in campo teorico, approfondendo il calcolo dei dispositivi di sicurezza (valvole di sicurezza e dischi di rottura) per i rischi derivanti dalla sovrappressione e dalla sovratemperatura, sia in campo pratico, individuando i rischi legati al luogo di installazione.

1. Introduzione

Il Gruppo di Lavoro Attrezzature a Pressione della Regione Emilia-Romagna [1] ha eseguito la classificazione delle anomalie riscontrate nel corso delle verifiche periodiche effettuare nel territorio regionale pubblicando i risultati. Qui sotto si riportano le distribuzioni delle anomalie e delle cause che le hanno determinate. (figg. 1 e 2).

Appare evidente che la principale causa di anomalie è la corrosione, mentre l'esercizio e le sollecitazioni non previste in progetto rappresentano circa il 40% delle cause che determinano le anomalie, seguite dalla manutenzione inadeguata che rappresenta, da sola, un ulteriore 40%.

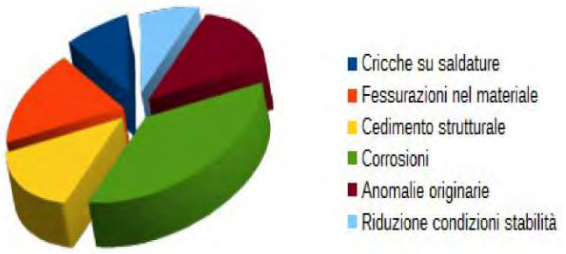


Figura 1. Anomalie [1]

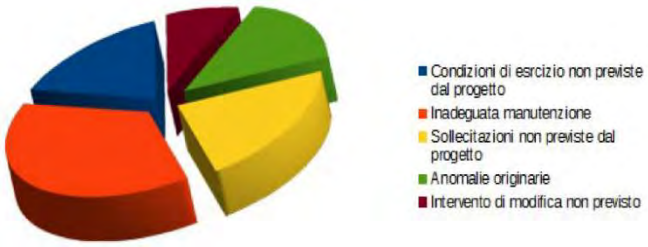


Figura 2. Cause delle anomalie [1]

Da quanto sopra discende che è essenziale esercire i recipienti a pressione entro i limii ammissibili, non solo per la pressione e la temperatura, ma anche per altre sollecitazioni (peso, fatica, vento, sisma, neve).

2. Cause di scoppio

Le cause principali di scoppio delle attrezzature a pressione sono:

- sovrappressione: determina un aumento della tensione nel materiale oltre il limite di rottura;
- sovratemperatura: determina una diminuzione del limite di rottura del materiale;
- corrosione o erosione: determinano una riduzione dello spessore del materiale e quindi un aumento della tensione oltre il limite di rottura
- danneggiamento: determinano un aumento della tensione nel materiale dovuta a concentrazioni di sforzi o allungamenti eccessivi (cricche, fatica, scorrimento viscoso, tensocorrosione e urti).

3. Esercizio delle attrezzature ad aria compressa

Con riferimento alle sopraelencate cause di scoppio, nel seguito si espongono le nostre considerazioni in merito all'esercizio delle attrezzature di aria compressa.

3.1 Pressione di mandata del compressore a vite

I compressori a vite sono la tipologia più diffusa nei normali impianti di aria compressa, e pertanto è bene chiarire, a beneficio degli estensori delle relazioni tecniche, quale sia la loro pressione di mandata.

Non è corretto ritenere che la pressione di mandata coincida con la massima pressione di lavoro, impostata sul pannello di controllo e gestita da un pressostato di regolazione; infatti, il gruppo viti del compressore può raggiungere anche pressioni superiori (es. 16 bar), in funzione della potenza del motore e delle tenute meccaniche. (Fig. 3).



Figura 3. Targa Gruppo Viti

A riprova di quanto sopra affermato, su un compressore in servizio con una pressione massima impostata a 7 bar, è stato by-passato il pressostato verificando il superamento della pressione di targa del compressore.

3.2 Calcolo della portata di scarico della valvola di sicurezza

Per il dimensionamento della valvola di sicurezza è fondamentale la corretta valutazione delle grandezze che compaiono nella formula della UNI EN ISO 4126-7:2016 [2].

In particolare, nel caso dei recipienti di aria compressa, gli estensori della relazione tecnica, prevista dall'art. 6 del d.m. 329/04 [3], non sempre effettuano il calcolo secondo la norma succitata, ma confrontano la portata da scaricare con quella fornita dal fabbricante della valvola di sicurezza. Questo modo di procedere, nel caso dei separatori d'olio non è corretto in quanto la maggior parte dei fabbricanti delle valvole di sicurezza indica nel certificato una portata di scarico riferita solitamente a 0°C o a 20°C, mentre la temperatura dell'aria all'interno dei suddetti separatori è ben più elevata: come mostrato nelle figg. 4 e 5, in cui la temperatura di esercizio è 93°C e quella di blocco è 113°C, ma può raggiungere anche i 120°C.



Figura 4. Temperatura aria esercizio



Figura 5. Temperatura aria in blocco

Il calcolo nella figura 6 dimostra che la portata di scarico della valvola con aria a 120°C (83 kg) è minore di circa il 17% rispetto a quella con aria a 0°C (100 kg/h).

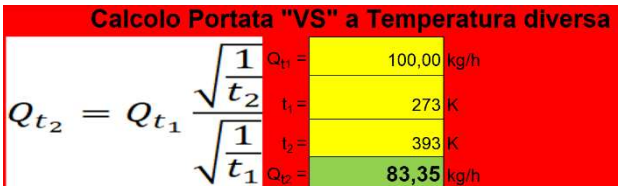


Figura 6

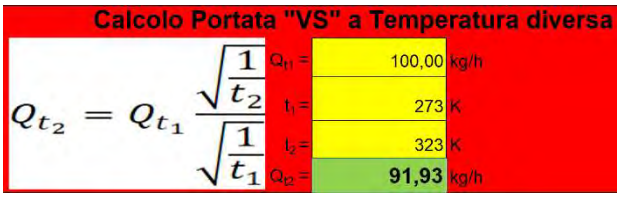


Figura 7

Pertanto, la portata di scarico della valvola di sicurezza deve essere calcolata alla temperatura massima raggiungibile dall'aria all'interno del separatore d'olio.

Nel caso dei serbatoi di accumulo il calcolo deve essere eseguito considerando la massima temperatura dell'aria proveniente dal/i compressori, tenendo conto, ove pertinente, della temperatura dell'ambiente in cui è situato il serbatoio stesso. Per esempio (figura 7), assumendo una temperatura pari a 50°C (92 kg/h), la portata di scarico è minore di circa l'8% rispetto a quella con aria a 0°C (100 kg/h).

Un altro errore commesso dagli estensori delle relazioni tecniche, pur considerando la temperatura corretta, è quello di confrontare le portate volumetriche della valvola di sicurezza e del compressore ricavandole dalla portata massica ad una certa temperatura.

Esempio: sul certificato del costruttore della valvola, indicati Q=100 kg/h Q=77,34 m^3/h riferiti a 0°C e 1 bar (ρ = 1,293 kg/m^3). Per calcolare la portata a 120°C dividono la portata Q=100 kg/h per la densità a 120°C e 1 bar (0,898 kg/m^3) ottenendo Q=111,36 m^3/h. Si nota che la portata espressa in volume aumentando la temperatura, aumenta invece di diminuire.

Calcolando invece la portata, con la formula (1) sottoindicata, alla temperatura T_0

$$Q_m = p_o C A K_{dr} \sqrt{\frac{M}{Z T_o}} \qquad (1)$$

=120°C e mantenendo invariati i valori di p_0 ,$C;A;K_{dr}$,$M, Z,$ otteniamo correttamente una riduzione della portata stessa da 100 kg/h a 83,4 kg/h.
L'errore concettuale deriva dalla mancata considerazione delle grandezze che compaiono nella formula per il dimensionamento della valvola di sicurezza, con la quale si ottiene la portata di aria in kg/h ad una certa pressione (p_0) e a una certa temperatura (T_0) e il passaggio ad una equivalente portata volumetrica a pressione atmosferica è lecito solo a parità di temperatura.
Viste le considerazioni sopra riportate, è opportuno eseguire i calcoli con le portate massiche (kg/h) in modo da evitare errori che possano nel dimensionamento dei dispositivi di scarico della pressione. Infine, per calcolare la portata massica del compressore, la norma ISO 1217:2009/Amd 1:2016 [4] definisce il valore di portata del compressore nelle condizioni di aspirazione dell'aria alla temperatura di 20°C e pressione di 1 bar assoluto (FAD - Free Air Delivery). Quindi, per convertire la portata del compressore da volume in m^3/h a massa in kg/h, qualora non indicata sulla targa, basterà moltiplicare la portata in volume per la densità di 1,204 kg/m^3

3.3 Collegamento valvola di sicurezza

Il collegamento tra la valvola di sicurezza e il recipiente di aria compressa deve essere il più possibile vicino e diretto, cioè senza intercettazioni. La presenza di un'intercettazione (Figura 8) interposta tra la valvola di sicurezza ed il serbatoio rende possibile l'esclusione della valvola stessa, mentre l'installazione del dispositivo di sicurezza lontano dal serbatoio da proteggere possono originare perdite di carico che determinano sovrapressioni oltre il limite consentito.
Inoltre, il collegamento tra attrezzatura e valvola non deve presentare riduzioni di sezione, altrimenti la portata di scarico può ridursi fino a valori insufficienti. (Figura 9)



Figura 8. Intercetto tra VdS e Serbatoio



Figura 9. Riduzione di sezione

Anche un errato montaggio della valvola può compromettere la stabilità dell'apparecchio. Come si nota in Figura 10, la valvola di sicurezza è stata avvitata con pinza a pappagallo serrata sul corpo anziché con chiave dinamometrica, come previsto dal fabbricante della stessa. Questo errore può provocare la mancata o

parziale apertura della valvola di sicurezza dovuta alla deformazione del corpo che può compromettere la corsa dell'otturatore.


Figura 10. Errato montaggio


Figura 11


Figura 12

Altra disattenzione è l'assenza di manutenzione, sostituzione o controllo di efficienza della valvola come si vede nelle figure 11 e 12 che è fondamentale effettuare qualora i dispositivi siano installati in ambienti polverosi e/o aggressivi.

3.4 Scarichi pericolosi delle valvole di sicurezza

Lo scarico delle valvole di sicurezza deve avvenire in condizioni sicure per quanto riguarda la possibilità di interferenza con gli operatori che, accidentalmente, o per manutenzione periodica, possono trovarsi a diretto contatto con l'apparecchio. Lo scarico, avvenendo per la maggioranza dei casi in modo casuale, deve essere predisposto prevedendo le migliori condizioni possibili a garanzia della salvaguardia degli operatori. Deve quindi avvenire con idoneo orientamento dell'ugello, da effettuarsi durante la fase di montaggio e installazione dell'accessorio, se lo scarico è prettamente gassoso e non prevede fasi di flash di parti surriscaldate o parzialmente liquide e il gas è non pericoloso, come nei casi in specie presi in considerazione, oppure deve essere convogliato in zona sicura a dispositivi di abbattimento o in camere di espansione/flash negli altri casi.
È sovente il riscontro di inadeguatezza delle condizioni di installazione degli accessori, in relazione allo scarico, da parte degli utenti.

3.5 Valutazione del luogo di installazione

Nella Relazione Tecnica redatta dagli utilizzatori è frequente il mancato riscontro dell'esame di rischi aggiuntivi a quelli derivanti dalla sola pressione e temperatura con cui è esercita l'attrezzatura, in particolar modo per le installazioni che insistono in zone censite e classificate con significativo rischio sismico/idraulico oppure, quando è prevista l'installazione all'aperto, per i rischi causati da sollecitazioni indotte dal vento e/o dai carichi aggiuntivi esterni, come neve/ghiaccio, e nei casi dove può rappresentare pregiudizio, in funzione del fluido contenuto e/o dello stato dei materiali e delle verniciature, anche l'irraggiamento solare.
Come si vede in figura 13, l'apparecchio non essendo ancorato a terra, in caso di sisma o qualora sia posizionato all'aperto esposto a forte vento o inondazione, potrebbe spostarsi dalla sua posizione di equilibrio ribaltandosi o mettendo in forte

stress i punti di giunzione delle connessioni che potrebbero quindi rompersi causando una imprevista fuoriuscita gassosa massiva e incontrollata dall'attrezzatura che potrebbe allora essere sottoposta ad una reazione, per deflusso massico improvviso, causa di movimenti del tutto imprevedibili.
In figura 14 si può notare che l'effetto del sole ha creato crepe nella vernice. Tale situazione, se non tempestivamente corretta, può facilitare, a seguito di intemperie, l'innesco di processi di corrosione con possibile diminuzione di spessore. Nella figura 15, si nota la mancanza di barriere di protezione atte a prevenire infortuni causati dalla rottura della tubazione flessibile.



Figura 13



Figura 14



Figura 15

Nella figura 16 si nota che il posizionamento dell'apparecchio è in prossimità di postazione di lavoro. A prescindere dal livello di rischio tale situazione è inammissibile perché anche se basso, il rischio è costantemente potenzialmente espresso nei confronti degli addetti che lavorano nei pressi dell'attrezzatura e non è classificabile tra quelli ineliminabili.
In Figura 17 si nota invece, l'attenzione a limitare ed interdire la zona a persone.



Figura 16



Figura 17



Figura 18

3.6 Qualità dell'aria aspirata dai compressori

Quando nell'ambiente in cui opera il compressore l'aria aspirata può essere contaminata da sostanze quali: polveri infiammabili, vapori acidi, vapori infiammabili miscele esplosive, o altro che possano essere causa di inneschi e scoppio deve essere valutata la contromisura da adottare per eliminare il rischio conseguente.
In fig.18 è evidente lo stato di degrado ambientale in cui risiede l'attrezzatura.

3.7 Verifica di integrità

L'articolo 12 del D.M. 329/04 e il punto 4.3.2 dell'allegato del decreto 11 aprile 2011 [5] impone, per questa tipologia di attrezzature, la verifica di integrità ogni 10 anni (salvo casi specifici con intervallo temporale ridotto per espressa indicazione del costruttore). La verifica di integrità consiste nell'accertamento dello stato di conservazione delle varie membrature da effettuarsi con ispezioni visive interne ed esterne e misurazione dello spessore delle stesse al fine di escludere fenomeni di ammaloramento progressivo nel tempo (corrosione e/o fatica oligociclica) che possano portare a condizioni di livelli di sicurezza non più rispondenti a quelli nominali previsti dal costruttore. Quando l'attrezzatura ha caratteristiche tali da non consentire adeguate condizioni di accessibilità all'interno o risulta comunque non ispezionabile esaustivamente è prevista l'esecuzione di una prova idraulica alla pressione di 1,125 PS. Se lo spessore è inferiore a un determinato limite, indicato dal costruttore, il serbatoio deve essere messo fuori servizio o eseguita una valutazione accurata di ulteriore esercibilità, anche con ripristino/riparazione del difetto e declassamento eventuale, da sottoporre al soggetto preposto alla verifica. La misura dello spessore normalmente viene effettuata con il metodo degli ultrasuoni (fig. 20) ed è importante che venga condotta secondo i criteri dettati dalle norme di settore (cit. EN ISO 16809:2019 [6] da riportare a cura del tecnico incaricato sul certificato del controllo); uno dei suddetti criteri è la corretta scelta del reticolo di misura (fig. 19) che deve essere individuato e caratterizzato dall'esecutore nelle dimensioni a partire dalla criticità, in relazione a zone di intensificazione delle tensioni (raccordi, discontinuità, etc.), prevista durante l'esercizio [7]. Generalmente, dall'esecutore del controllo viene adottato un criterio di accettabilità per confronto diretto (o metodo non statistico) di ogni singola misura col parametro nominale minimo indicato dal fabbricante al netto delle tolleranze. Questo porta alla non conformità anche in caso di singola misura (riferita ad un punto contenuto in un'area di reticolo) al di sotto del parametro minimo di confronto previsto. Diversamente nel caso di confronto statistico (o confronto combinato) è necessario individuare lo spessore minimo convenzionale, scelto come minore tra lo spessore minimo di misura e quello minimo statistico individuato a partire dai momenti primo e secondo (Media e Varianza o Dev Std) della distribuzione di probabilità adottata per il livello di significatività statistica delle misure (generalmente t di Student vista la scarsa numerosità campionaria), da confrontare con lo spessore minimo ammissibile aumentato dello spessore prevedibilmente consumabile , per corrosione o altro, nell'intervallo di esercizio adottato per le verifiche. Ciò anche al fine di rideterminare la frequenza di controllo a seguito di riscontro di fenomeno di ammaloramento evolutivo nel tempo. Questo secondo approccio è raramente riscontrato nell'esecuzione delle misure da parte dei tecnici incaricati per la fattispecie di attrezzature considerata.



Figura 19



Figura 20

3.8 Urti accidentali

Un rischio spesso sottovalutato è quello legato al posizionamento dell'apparecchio, che, se non installato in un locale tecnico espressamente dedicato, può essere esposto a interferenze con altri macchinari (muletti, gru etc.).
È evidente che se un operatore ad esempio mulettista, colpisce per errore o distrazione l'apparecchio, questo a seguito di squarcio delle membrature potrebbe esplodere compromettendo la sicurezza delle persone circostanti (fig. 21).
Altro possibile urto può avvenire se tali serbatoi sono sottostanti o interferenti al campo operativo di mezzi di sollevamento cose come ad esempio gru a ponte.

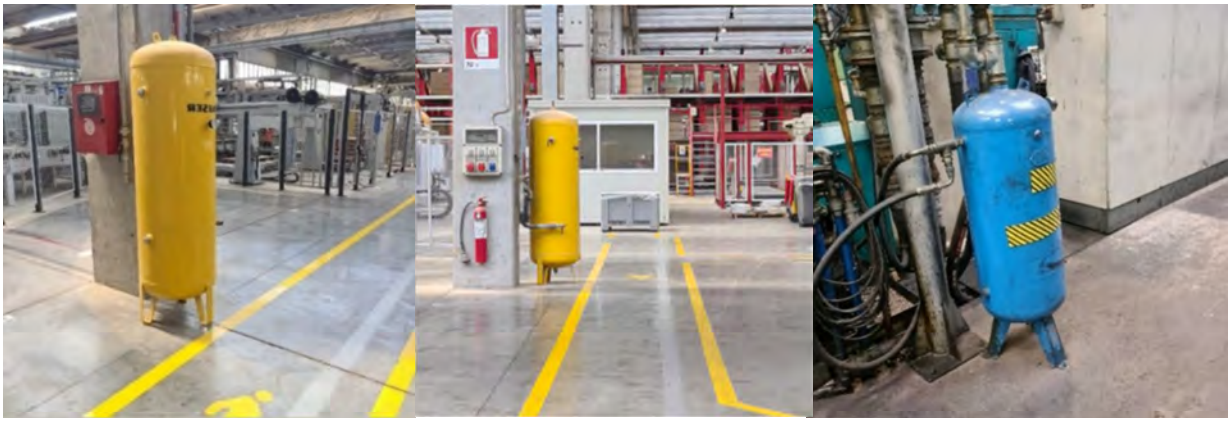


Figura 21

3.9 Incendio esterno

Talvolta i locali che contengono gli apparecchi a pressione, sono anche utilizzati come depositi di materiali combustibili (fig. 22), nonostante la relazione tecnica escluda l'incendio esterno.
In tali casi o si provvede ad uno sgombero immediato delle sostanze che possano innescare l'incendio o ad una attenta rivalutazione di questo scenario, da contemplare nella relazione tecnica dell'utilizzatore, anche in relazione al grado di protezione che possono offrire gli accessori di sicurezza installati e le procedure/impianti di prevenzione/protezione dall'incendio.



Figura 22

3.10 Uso improprio dell'apparecchio

Non è raro trovare condizioni di utilizzo dell'attrezzatura con fluidi o gas contenuti nella stessa non contemplati dal fabbricante. L'impiego di sostanze non idonee contenute all'interno del recipiente può comportare fenomeni corrosivi o comunque danneggiamento dell'attrezzatura con conseguente diminuzione della resistenza e pericolo di scoppio.
In fig. 23 si vede un apparecchio contenente un'emulsione di acqua ed altra sostanza non idonea.



Figura 23



Figura 24

3.11 Valutazione del corretto montaggio dell'attrezzatura

È buona norma eseguire prima della messa in servizio e periodicamente durante il normale utilizzo una verifica visiva delle condizioni di installazione dell'attrezzatura. Infatti, può capitare che in fase di installazione, durante il trasporto e/o montaggio la stessa possa essere danneggiata presentando graffi, ammaccature e/o deformazioni permanenti che non sono contemplate né in fase di verifica di messa in servizio né in occasione delle verifiche periodiche. Come si può notare in figura 24, il fondo superiore dell'apparecchio è stato danneggiato con una grande deformazione permanente tale da comportare la messa fuori servizio dello stesso.

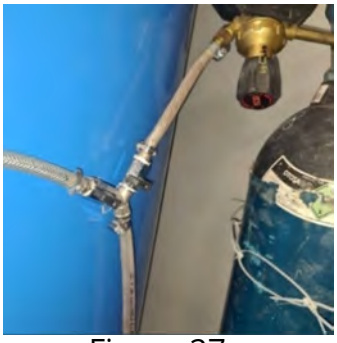
3.12 Tubazioni di collegamento non idonee

L'utilizzo di tubazioni idonee è molto importante per garantire la sicurezza degli operatori e l'integrità del serbatoio. Sarebbe infatti auspicabile un maggiore utilizzo di giunti antivibranti tra compressori ed attrezzature al fine di scongiurare rotture e/o fessurazioni dovute a fatica (fig.25). Inoltre, in occasione di verifiche di messa in servizio si rileva che il collegamento in uscita da bombole ad alta pressione sia

effettuato con l'impiego di tubazioni in materiali non idonei a resistere alla pressione cui le stesse sono sottoposte mettendo a rischio l'incolumità dei lavoratori stessi (figg. 26 e 27).


Figura 25


Figura 26


Figura 27

3.13 Corrosione ed erosione

I fenomeni di corrosione e di erosione a volte sono sottovalutati in quanto non viene fatta una corretta manutenzione all'attrezzatura. La stessa infatti, una volta installata, non è oggetto di una minima attenzione da parte del personale preposto e capita, in occasione di verifica di messa in servizio, di osservare che le stesse o attrezzature esonerate dalla verifica di messa in servizio, si presentino al verificatore in pessime condizioni come si può notare dalle immagini sottostanti (fig.28).

Da non sottovalutare anche la eventuale presenza di fusti contenenti liquidi corrosivi, di esalazioni di gas o liquami, di ambiente di lavoro erosivi come lavorazioni di anime che prevedono polveri, sabbia ecc, situati in prossimità delle attrezzature possono causare danni alle stesse o il malfunzionamento dei dispositivi di sicurezza (figg. 29 e 30).


Figura 28


Figura 29


Figura 30

Altro significativo aspetto che riguarda per lo più il fenomeno di corrosione interna (con conseguente sottospessore delle membrature dell'attrezzatura) e viene spesso riscontrato in occasione della verifica di messa in servizio è la presenza di condensa all'interno del serbatoio di accumulo e/o la difficoltà a scaricare la stessa dovuta ad un intasamento dello scarico (figg. 31 e 32).

3.14 Fonti ausiliarie di pressione

Talvolta oltre alla presenza di compressori a servizio di autoclavi possono essere presenti altre fonti di pressione (esempio bombole di azoto). Al fine di scongiurare un

possibile aumento di pressione oltre la PS del serbatoio, si dovrà considerare la portata aggiuntiva ai compressori che alimentano la rete e che viene immessa attraverso le tubazioni di collegamento con le bombole e considerarla nel dimensionamento dei dispositivi di sicurezza installati sull'attrezzatura (fig. 33).



Figura 31



Figura 32



Figura 33

Appendice 1
CHECK LIST ANALISI DEI RISCHI
Sotto è riportato un elenco di rischi da valutare in modo da non trascurare nessun pericolo potenziale per l'attrezzatura suddivisi in base alle condizioni di esercizio e il luogo di installazione.

CONDIZIONI DI ESERCIZIO

1. **Pressione interna/esterna**
   (Dispositivi previsti: pressostato, manometro, valvola di sicurezza e suo dimensionamento)
2. **Temperatura del fluido all'interno del recipiente, temperatura esterna superficiale dell'apparecchio**
   (Temperatura dell'ambiente e dell'aria compressa proveniente dal compressore)
3. **Tipo di fluido**
   (Fluido utilizzato: aria, acqua, olio)
4. **Scarico delle condense**
   (sistema di scarico automatico o manuale, verifica presenza di condensa mediante prova periodica)
5. **Verifica di integrità**
   (per apparecchi superiori a 10 anni, verifica degli spessori e confronto con quelli indicati dal costruttore)
6. **Rottura a fatica ciclica**
   (Valutazione di esercizio legato a cicli multipli di riempimento e svuotamento)

LUOGO DI INSTALLAZIONE

7. **Il montaggio, l'assemblaggio**

(Come è avvenuto il trasporto, scarico e l'installazione.Controllo visivo di integrità dell'apparecchio al fine di escludere ammaccature, graffi o deformazioni permanenti)

8. **Sollecitazioni come traffico, vento, terremoti, neve, ghiaccio, sole**
   (Presenza di locale tecnico, giunti antivibranti, ancoraggi al suolo, coibentazione, schermature)
9. **Sollecitazioni provocati da sostegni, collegamenti, tubazioni ecc.**
   (Presenza di giunti antivibranti, tubi flessibili tra il compressore e il recipiente)
10. **Valutazione di tenuta dei collegamenti a tubazioni**
    (tipo di viti, dadi, manicotti ecc.)
11. **Corrosione ed erosione**
    (Agenti esterni che possono corrodere/erodere l'apparecchio)
12. **Scarichi pericolosi delle valvole di sicurezza**
    (Presenza di scarichi convogliati o posizionati in modo da non arrecare danno a persone)
13. **Incendio esterno**
    (Presenza di sostanze infiammabili (liquidi o solidi), fonti di calore nei pressi dell'attrezzatura)
14. **Aerazione del locale**
    (Presenza di aperture verso l'esterno)
15. **Qualità dell'aria aspirata**
    (Presenza di sostanze solide o gassose corrosive, abrasive)
16. **Urti accidentali**
    (Presenza di movimentazione di carichi es. muletti, gru o persone)
17. **Accesso al luogo di installazione**
    (Installazione all'interno di un locale con divieto, gabbie contenitive, barriere)

Bibliografia e sitografia

[1] https://www.regione.emilia-romagna.it/sicurezza-nei-luoghi-di-lavoro/documentazione/studi-ricerche-documenti/2016/anomalie-attrezzature-a-pressione

[2] UNI EN ISO 4126-7:2016 "Dispositivi di sicurezza per la protezione contro le sovrapressioni"

[3] Decreto 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."

[4] ISO 1217:2009/Amd 1:2016 "Displacement compressors – Acceptance tests – Amendment 1 : Calculation of isoentropic efficiency and relationship with specific energy"

[5] Decreto 11 aprile 2011 "Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo."

[6] EN ISO 16809:2019 "Non destructive testing – Ultrasonic thickness measurement"

[7] Linea Guida INAIL "Esame visivo e spessimetria" - 2012

Sicurezza ad alta pressione: gestione degli ambienti iperbarici in cantiere e il ruolo del soccorso tecnico urgente

M.M. La Veglia[1], F. Donato[2], M. Del Gaudio[3], C. Piccolo[3]

[1]Direzione Regionale VVF Campania
[2]Comando VVF Benevento
[3] Inail - Uot di Avellino

Sommario
L'impiego di tecnologie avanzate per lo scavo meccanizzato in sotterraneo pone nuove e complesse sfide per la gestione delle emergenze, in particolare quando si opera in regime di sovrappressione.
Il presente saggio analizza l'evoluzione dei protocolli di soccorso tecnico urgente attraverso l'analisi dei dati raccolti durante un'esercitazione su larga scala svoltasi nel settembre 2025 lungo la costruenda linea ferroviaria TAC TAV della tratta Napoli-Bari.
Vengono approfondite le specifiche dei macchinari, e il necessario inquadramento normativo (Direttiva PED e D.lgs. 81/08) al fine di validare un modello di intervento multidisciplinare volto a mitigare il rischio iperbarico nei grandi cantieri infrastrutturali.



Figura 1. Sezione del corpo del Tunnel Boring Machine - TBM e della galleria

1. Introduzione e scopo

La realizzazione di tunnel autostradali e ferroviari a mezzo delle attrezzature denominate TBM (Tunnel Boring Machine), che permettono di effettuare lo scavo ed installare direttamente i conci di contenimento completando interamente il tunnel, comporta ulteriori valutazioni per i rischi per i lavoratori.

Una TBM permette di controllare eventuali giacimenti di gas e/o falde acquifere intercettate durante lo scavo. In particolare, la testa fresante può operare in condizioni di sovrappressione. Questa situazione implica che i lavoratori, in caso di accesso a questa area, debbano seguire delle procedure di decompressione in camere iperbariche installate nella TBM.
Eventuali emergenze, quindi, debbono considerare che l'evacuazione dei lavoratori avvenga in scenari molto diversi da quelli dei comuni cantieri tradizionali.

2. Dettagli sul cantiere e sulle macchine di scavo

2.1 Generalità e descrizione dell'impianto (TBM)

Il macchinario di cui trattasi, denominato fresa meccanica a piena sezione, volgarmente chiamata talpa o talpa meccanica (in inglese Tunnel Boring Machine da cui la sigla TBM), è un macchinario che permette la meccanizzazione completa dello scavo delle gallerie e la realizzazione del rivestimento delle stesse; ciò permette di lavorare in rocce anche molto resistenti oppure al di sotto di falde acquifere.
Per "scudo" si intende il cilindro metallico che chiude la macchina e su cui, ad una estremità, è montata la testa rotante dove alloggiano gli utensili di scavo veri e propri. La testa ha un diametro di 12,30 metri, ruota tra 1 e 10 giri al minuto (a seconda della sua dimensione e del materiale in cui scava) e rimuove piccole scaglie di materiale. Dentro il cilindro, alle spalle della testa rotante nella parte inferiore guardando il fronte di scavo, c'è una camera in cui viene raccolto il materiale di risulta che viene estratto miscelato al fango. Il materiale esce dalla camera su una coclea, o vite senza fine, e successivamente posto su un rullo trasportatore per essere trasportato verso l'esterno. La macchina si sposta come un lombrico: dei martinetti idraulici si puntano sugli elementi denominati conci (costituiti in materiale di calcestruzzo prefabbricato usato per il rivestimento finale) precedentemente posizionati, in maniera tale da far spostare in avanti l'intero macchinario (scudo), grazie anche al contributo dell'azione di scavo della testa rotante posta anteriormente. Tutti i servizi passano dentro lo scudo, dall'elettricità per la camera di controllo ai condotti per i fanghi di miscelazione. Sempre dentro lo scudo è presente un luogo sicuro statico con caratteristiche REI ed un'autonomia di aria respirabile per 20 persone e per 28 ore continue con annessi Dispositivi di Protezione Individuali e Collettivi (D.P.I. e D.P.C.).
Inoltre, è presente un sistema di pompaggio e filtraggio dell'aria che porta aria in pressione alla parte anteriore dove è ubicata la testa rotante che rispetto al restante corpo della macchina, lavora in sovrapressione (Pressione > 1 atm). Nello specifico, predetta parte dello scudo (testa rotante), è isolata e separata da due camere iperbariche longitudinali (con miscela respirabile ad aria 100%) poste longitudinalmente

rispetto al senso di marcia/perforazione della stessa TBM, per poter permettere una lavorazione ed uno scavo a pressioni superiori alla pressione ambiente.

3. Fondamenti di iperbarismo operativo e obiettivi del soccorso

Necessita un chiarimento sulla sfida che pone un infortunio in questo particolare contesto. Il soccorso iperbarico si basa sulla gestione della "profondità equivalente" per rapportare la pressione interna al concetto di immersione.
I principali pericoli sono la Malattia da Decompressione (MDD) e l'embolia gassosa, derivanti da una riduzione pressoria incontrollata. È inoltre critico il monitoraggio dei livelli di anidride carbonica e ossigeno in ambienti confinati.
L'Ufficio Pianificazione Soccorso della Direzione Campania dei Vigili del Fuoco ha voluto testare l'attuazione di procedure per la valutazione dei rischi specifici (respirabilità, ostacoli), l'efficacia delle comunicazioni radio sotterranee e le procedure di estricazione all'interno del "backup" della TBM (lungo 150 metri).

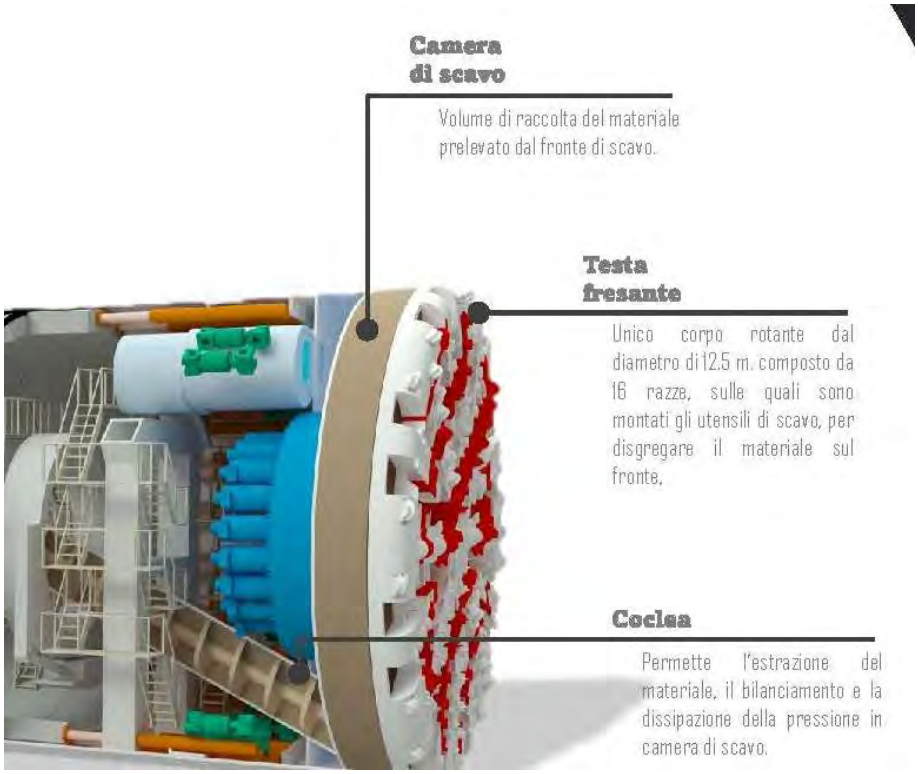


Figura 2. Sezione del corpo della TBM (tratto dalla pubblicazione di HyrpiniaAV

3.1 Obiettivi dell'esercitazione e della pianificazione

L'efficacia del soccorso tecnico urgente in ambienti iperbarici dipende da una struttura gerarchica chiara e dall'integrazione di nuclei specialistici

In fase di sperimentazione e durante le attività addestrative, ci si pongono i seguenti obiettivi primari:

- Testare l'attuazione di procedure specifiche per il soccorso in ambienti confinati e gallerie, con particolare attenzione a:
    - Valutazione dei rischi specifici, quali la respirabilità dell'atmosfera, il rischio di crolli secondari e la presenza di ostacoli fisici lungo il percorso di esodo.
    - Impiego di attrezzature dedicate per l'illuminazione e la comunicazione in galleria.
    - Procedure di estricazione e recupero di persone intrappolate o ferite all'interno del backup della TBM.
    - Gestione di scenari incidentali complessi, inclusi eventuali incendi o rilasci di sostanze pericolose in ambiente confinato.
- Testare l'efficacia delle comunicazioni in ambiente sotterraneo, verificando la tenuta e l'interoperabilità dei sistemi radio e dei collegamenti tra l'interno della camera e l'esterno.
- Verificare i tempi di risposta e l'efficacia del coordinamento tra le diverse squadre di soccorso (SMZT, USAR, SAF) e il personale tecnico di cantiere.
- Sperimentare l'utilizzo di nuove tecnologie per la localizzazione e il soccorso in galleria, come l'impiego di droni dotati di sensori specifici e sistemi di monitoraggio ambientale remoti per la telemetria dei gas.

3.2 Attori e Ruoli specialistici

Il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco organizza il soccorso con standard elevati che valorizzano le capacità dei Nuclei specialistici, chiamati in causa in questo contesto

- Nucleo Sommozzatori che costituisce l'aliquota operativa d'attacco, dedicata esclusivamente all'intervento in ambiente pressurizzato.
- Nuclei di Supporto (Urban Search and Rescue e Speleo Alpino Fluviale) che garantiscono il supporto logistico, la ricerca in strutture complesse e la progressione tecnica in ambienti ipogei angusti.

Essi troveranno integrazione sul sito con:

- Personale Tecnico di Cantiere: in cui figure come il Safety Manager e gli operatori iperbarici dell'ente gestore sono integrati nella catena di comando per fornire assistenza critica sul funzionamento degli impianti della TBM.

4. Il caso studio: Esercitazione sui cantieri della Linea TAC-TAV Napoli-Bari

4.1 Contesto operativo e scenari

Nello scorso mese di settembre 2025 si è realizzata un'esercitazione focalizzata sul soccorso in cantieri di una grande opera infrastrutturale, ovvero due cantieri della

galleria in costruzione della T.A.V. Napoli-Bari, nel comune di Apice (BN), al Km 1,200 di scavo, rispetto ad una lunghezza totale di circa 6 km, e del cantiere della Galleria di Grottaminarda (AV) di 2 km, in cui attualmente sono state concluse le operazioni di scavo con la TBM (in quel momento ancora in loco e attualmente in corso di smontaggio) e stanno per iniziare le operazioni di riempimento della superficie di base per la successiva realizzazione della strada ferrata.

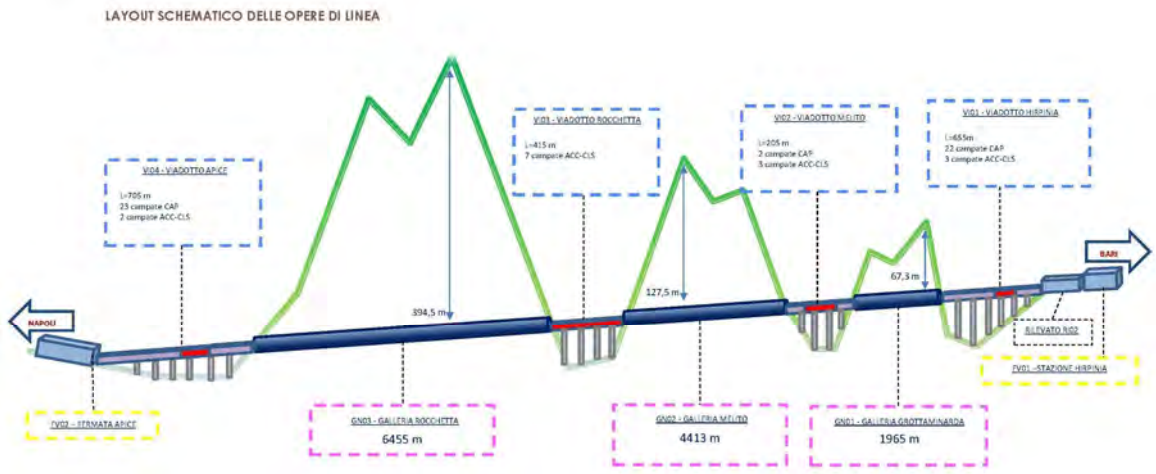


Figura 3. Le Gallerie del cantiere TAV

4.2 Scenario proposto

L'emergenza ipotizzata è relativa ad incidenti che si possono verificare durante i lavori in sotterraneo o durante le attività di manutenzione, con particolare focus sul luogo confinato costituito dal corpo della galleria e dalla TBM (diametro testa 12,30 metri e corpo backup 150 metri).

Lo scenario generale è verosimile con il contesto territoriale e del cambiamento climatico. Esso ha previsto un importante evento alluvionale diffuso tra la provincia di Avellino e Benevento, accompagnato da un dissesto idrogeologico. La cornice meteorologica è una condizione di allerta arancione per piogge intense, con conseguente rischio di allagamenti, frane, instabilità del terreno e compromissione delle comunicazioni, simulando l'assenza di copertura GSM nella zona. Per gli scopi esercitativi sono stati mobilitati i sistemi di coordinamento della Direzione Regionale VVF e le sale crisi dei Comandi; nella zona colpita si è insediato il Distretto Operativo di Area con un Posto di Comando Avanzato.

4.3 Focus Giorno 1: Galleria "GN01" (Grottaminarda)

Come da accordi presi con i Contractors il giorno "uno" dell'esercitazione lo scenario di dettaglio è stato quello presso la Galleria denominata "GN01" in comune di

Grottaminarda (AV). Durante un intervento manutentivo in prossimità della testa della TBM, un operaio viene colto da malore. L'ambiente è in sovrappressione e l'accesso al luogo dell'incidente avviene tramite il lungo corridoio tecnico di backup, con un dislivello di lavoro di circa 10 metri.
A causa del maltempo, le comunicazioni risultano fortemente disturbate e le informazioni frammentarie. Sono stati mobilitati i sommozzatori del Nucleo SMZT per garantire l'attitudine al lavoro in ambienti iperbarici. È stato sperimentato l'impiego di strumento Laser Scanner (Nucleo LSC) e attivato il modulo di comunicazioni VVF per implementare il sistema trasmissivo Indoor e Outdoor a mezzo di sistema satellitare (StarLink).

4.4 Pianificazione e Coordinamento del Personale

Un aspetto cruciale dell'evento è stato il coordinamento del personale dei Comandi dei Vigili del Fuoco della Campania, diretto e supervisionato da due degli autori del presente articolo in qualità di coordinatori delle operazioni regionali. La gestione di una macchina operativa così complessa ha richiesto una programmazione meticolosa delle risorse umane, sia in termini di competenze specialistiche che di impegno orario.
Pertanto, in prima analisi, la pianificazione del personale da impiegare in regime di straordinario (in questo modo viene utilizzato personale VVF non impegnato nelle normali attività di soccorso tecnico urgente) è partita dalla quantificazione delle ore assegnate per l'intera durata della missione. Il dispositivo di soccorso ha dovuto coprire non solo i quattro giorni della settimana esercitativa ma anche tutte le manovre preparatorie tenutesi nei mesi precedenti, necessarie per affinare le tecniche di intervento in galleria.
Il prospetto generale delle risorse pianificate ha tenuto conto dei seguenti volumi operativi:

- Impiego sul campo: Durante le fasi esercitative nei 4 giorni, è stato previsto l'impiego contemporaneo di fino a 75 operatori distribuiti tra gli scenari operativi nei cantieri e le sale operative di coordinamento.
- Fasi preparatorie: Il conteggio delle ore include le attività di addestramento preliminare volte a garantire la sicurezza del personale in ambienti iperbarici e confinati.
- Gestione imprevisti: Il piano orario ha integrato una quota di flessibilità per far fronte a eventuali scenari incidentali non programmati o difficoltà tecniche emerse durante le manovre.

Questa imponente mobilitazione di uomini e mezzi ha permesso di testare sul campo la reale capacità di risposta del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco in scenari di grande infrastrutturazione, validando l'interoperabilità tra i diversi Comandi provinciali della regione.

Il monitoraggio tecnico e la validazione dei profili di sicurezza delle attrezzature sono stati supportati dalla competenza specialistica dell'INAIL. Tale partecipazione si inquadra nel consolidato sodalizio istituzionale sancito dal Protocollo d'Intesa tra INAIL e il Dipartimento dei Vigili del Fuoco, volto a integrare la vigilanza tecnica con la risposta operativa di soccorso.

5. Inquadramento Normativo e Standard Tecnici

La sfida ulteriore è stata per i componenti il team di pianificazione di analizzare come le TBM e le relative camere iperbariche si collochino all'intersezione tra la Direttiva PED (attrezzature a pressione) e il Testo Unico sulla Sicurezza.
La gestione delle emergenze in ambienti iperbarici connessi all'uso di TBM richiede una rigorosa analisi della conformità normativa, poiché tali sistemi configurano un'intersezione complessa tra la disciplina delle attrezzature a pressione e le norme a tutela della salute dei lavoratori.
La sicurezza delle attrezzature iperbariche nelle TBM incrocia diverse normative:

- Direttiva PED (2014/68/UE): Le camere iperbariche sono recipienti a pressione certificati (RES).
- D.M. 329/04: Norme per la messa in servizio e verifiche periodiche delle attrezzature a pressione.
- UNI EN 12110: Standard specifico per le camere d'aria delle TBM (sistemi di supporto vitale e interfacce di soccorso).
- D.Lgs. 81/08: Gestione dei lavori in ambienti confinati e protezione dei lavoratori esposti a rischi iperbarici.

5.1 Il quadro legislativo nazionale ed europeo

Il riferimento cardine per la sicurezza delle attrezzature iperbariche è il **D.Lgs. 26/2016**, che recepisce la **Direttiva 2014/68/UE (PED)**. Le camere di equilibrio e di decompressione installate a bordo delle TBM sono classificate come recipienti a pressione e devono rispondere ai requisiti essenziali di sicurezza (RES) previsti dalla direttiva, inclusa la marcatura CE e la sorveglianza da parte di organismi notificati.
In ambito nazionale, l'esercizio e la verifica periodica di tali attrezzature sono regolati dal **D.M. 329/04**, che definisce i criteri per la messa in servizio e le ispezioni successive, fondamentali per garantire l'integrità strutturale dei sistemi di accesso alla testa fresante durante l'intera vita tecnica dell'opera.
In tale ambito, il contributo dell'Inail è risultato determinante: l'esperienza tecnica dell'Istituto nella verifica di integrità dei sistemi a pressione permette di traslare i requisiti costruttivi della Direttiva PED in protocolli di gestione sicura durante l'intero ciclo di vita operativa della TBM.

5.2 Sicurezza sul lavoro e standard iperbarici

Sotto il profilo della tutela dei lavoratori, il D. Lgs. 81/08 (Testo Unico sulla Sicurezza) stabilisce gli obblighi in materia di ambienti confinati (art. 66 e Allegato IV) e gestione delle emergenze. Tuttavia, data l'estrema specificità del lavoro in pressione, la norma generale viene integrata da standard tecnici internazionali e linee guida di settore:

- UNI EN 12110: Specifica i requisiti di sicurezza per le camere iperbariche utilizzate nelle macchine per lo scavo meccanizzato di gallerie (TBM), definendo i parametri per i sistemi di supporto vitale, le comunicazioni e le interfacce di soccorso.
- Linee Guida ISPESL/INAIL: Forniscono le indicazioni metodologiche per la valutazione dei rischi nelle attività subacquee e iperbariche industriali, con particolare riferimento alle tabelle di decompressione e alla formazione del personale.

5.3 Il ruolo della normativa tecnica nel soccorso

L'efficacia della Procedura Operativa Tipo (POS) descritta nel saggio risiede proprio nella sua capacità di tradurre i requisiti normativi in protocolli d'azione. Il rispetto degli standard UNI EN 13445 (per i recipienti a pressione non esposti a fiamma) garantisce che le manovre di soccorso, pur in situazioni di emergenza, non compromettano l'integrità strutturale della macchina, prevenendo rischi di cedimento catastrofico o perdite di pressione incontrollate.

L'integrazione tra la conformità delle attrezzature (PED) e la formazione specialistica dei soccorritori rappresenta, dunque, il presupposto legale e tecnico per la validazione di ogni piano di emergenza in cantieri di opere strategiche.

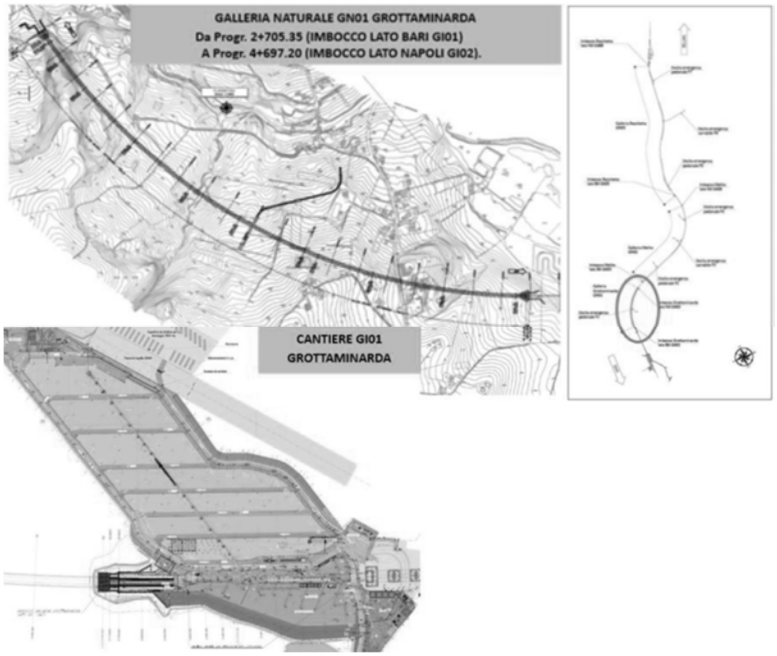


Figura 4. Cantiere di scavo (unidirezionale con TBM) della Galleria Grottaminarda

6. Risultati

L'integrazione tra le specifiche ingegneristiche della TBM e i protocolli di soccorso dei Vigili del Fuoco ha prodotto le seguenti evidenze operative:

1. Efficacia della Tecnologia: L'utilizzo del sistema satellitare StarLink e del Modulo ICT ha garantito la continuità delle comunicazioni anche in scenari di totale assenza di copertura GSM, condizione critica per il coordinamento tra l'interno della TBM e il Posto di Comando Avanzato.
2. Validazione delle Procedure Iperbariche: Le simulazioni di accesso attraverso le camere di equilibrio della testa rotante hanno confermato la necessità di impiegare in primis personale VF con specializzazione Sommozzatori (SMZT), in grado di gestire i tempi di decompressione e la stabilizzazione dei feriti in pressione.
3. Mappatura Digitale: L'impiego del Laser Scanner (Nucleo LSC) si è rivelato determinante per la mappatura degli spazi angusti del backup (150 metri di lunghezza), facilitando la pianificazione del percorso di estricazione della barella.
4. Coordinamento Multidisciplinare: La presenza di circa 75 operatori contemporanei sul campo ha dimostrato che la sicurezza nelle grandi opere del 2026 non può prescindere da una pianificazione preventiva che coinvolga Direzioni Regionali e Comandi VF in sinergia con i Contractors.

7. Conclusioni.

Il modello esercitativo analizzato conferma che la sicurezza negli ambienti iperbarici richiede un'integrazione strutturata tra progettazione ingegneristica, tecnologie di supporto e capacità operative specialistiche. In questo contesto, la sinergia tra rigore normativo (Direttiva PED, standard UNI EN 12110) e addestramento tecnico avanzato rappresenta un elemento imprescindibile per garantire livelli adeguati di sicurezza nei cantieri delle opere strategiche nazionali.

Il prosieguo delle attività prevede un coinvolgimento sempre più strutturato dell'INAIL, finalizzato alla definizione di linee guida nazionali e standard di verifica per le apparecchiature in pressione, calibrati sulle specificità del lavoro iperbarico. Tale percorso mira a consolidare una base tecnico-scientifica condivisa per la prevenzione degli infortuni e il miglioramento continuo delle pratiche di soccorso tecnico urgente.

Si ringrazia per la collaborazione T. Badalucco, A. Milone - Hyrpinia AV

Bibliografia

[1] Direzione Regionale VVF Campania. POS - Procedura operativa tipo di soccorso in camera iperbarica.
[2] D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81. Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro.
[3] D.M. 1 dicembre 2004, n. 329. Messa in servizio delle attrezzature a pressione.
[4] UNI EN 12110:2014. Macchine per lo scavo di gallerie - Camere d'aria - Requisiti di sicurezza.

Le prove di scoppio come alternativa al trattamento termico dei fondi formati a freddo nei serbatoi di GPL fino a 13 m^3

A. Rotondaro[1], R. Longo[2], A. Cosentini[2], F. Badolato[2], M. Diano[2]

[1] CPS S.R.L. Montalto Uffugo
[2] Inail - UOT di Catanzaro

Sommario
La norma EN 12542, relativa alle attrezzature e agli accessori per GPL, al punto 7.6.2.2, obbliga all'esecuzione del trattamento termico sui fondi formati a freddo, a meno che si possa dimostrare che le caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche stabilite nella specifica del materiale, mediante prove su campioni prelevati dai fondi dopo formatura a freddo, siano soddisfatte, oppure, in alternativa, mediante una prova di scoppio su un prototipo di recipiente da cui si evinca che il fondo non sia il componente più debole.
Gli autori, dopo l'esame normativo e una descrizione tecnico-scientifica del problema, descrivono i risultati delle prove di scoppio eseguite su prototipi di serbatoi presso il fabbricante CPS S.R.L. di Montalto Uffugo (CS). Tali risultati sono accompagnati da una analisi costi-benefici, utile per le scelte costruttive dei fabbricanti di serbatoi di GPL ai fini dell'applicazione del punto 7.6.2.2 della norma EN 12542.

1. Introduzione
La norma UNI EN 12542:2020 [1], che di seguito chiameremo "norma", specifica i requisiti per la progettazione e la fabbricazione di recipienti a pressione fissi cilindrici di acciaio saldato, prodotti in serie per lo stoccaggio di gas di petrolio liquefatto (GPL) con un volume non maggiore di 13 m^3 sopra e sotto terra.
Nel capitolo 4.2 la norma declina le caratteristiche dei materiali che possono essere utilizzati per la realizzazione dei fondi. In questo lavoro ci occuperemo però del capitolo 7.6 che riguarda le "*Parti in pressione formate*".

2. La formatura dei fondi
La questione del trattamento termico dei fondi formati rappresenta un tema rilevante sia dal punto di vista tecnico-economico che della sicurezza. I fondi possono essere formati a freddo o a caldo e devono essere realizzati da un unico pezzo di lamiera. La scelta tra formatura a caldo e a freddo dipende da molteplici fattori, tra cui lo spessore del materiale, il raggio di curvatura richiesto, le attrezzature disponibili e i costi di processo. La norma EN 12542, consapevole di queste problematiche, offre percorsi alternativi che meritano di essere esplorati approfonditamente sia dal punto di vista della fattibilità tecnica che della convenienza economica.
La formatura a caldo: il trattamento a caldo costituisce la soluzione tradizionale di formatura ma comporta costi significativi e complessità logistiche per i fabbricanti. Nel

caso di formatura a caldo la temperatura del pezzo in lavorazione deve essere superiore a quella del punto critico, nella regione austenitica. Il processo di austenizzazione si realizza a temperature differenti (punti critici) a seconda che si tratti di acciaio ipoeutettoide o ipereutettoide. La formatura a temperature superiori al punto critico permette una maggiore deformabilità, minori sollecitazioni residue e la possibilità di controllare la microstruttura finale tramite il raffreddamento successivo. In ogni caso la norma impone di non superare i 1050 °C.
A formatura eseguita, il paragrafo 7.6.2 della norma prevede l'effettuazione di un trattamento termico (normalizzazione o ricottura) per affinare la grana e ottimizzare le proprietà meccaniche minime previste dal punto 4.2 della norma, specie se la lavorazione avviene a temperatura minore del punto critico. Ugualmente si dovrà procedere se l'allungamento a rottura dopo la formatura è minore del 14% che rappresenta un indicatore critico della capacità del materiale di deformarsi plasticamente senza fratturarsi prematuramente.
La formatura a freddo: Durante la formatura a freddo il materiale subisce deformazioni plastiche che possono alterarne le caratteristiche meccaniche originarie, riducendo la duttilità e potenzialmente creando tensioni residue. Ciò accade perché la lavorazione avviene a temperature significativamente inferiori alla temperatura critica, senza trasformazioni di fase. Questo porta a incrudimento (aumento della durezza e resistenza, diminuzione della duttilità) e richiede successivi trattamenti di ricristallizzazione o distensione. La norma, però, prevede al punto 7.6.2.2 la possibilità di evitare il processo termico di normalizzazione in due casi: o si dimostra che le proprietà dell'acciaio elencate nel capitolo 4.2 sono soddisfatte dopo la formatura, oppure occorre che tramite una prova di scoppio sul prototipo di recipiente si possa dimostrare che il componente formato non sia la sua parte più debole. Nel primo caso è necessario effettuare delle prove sui fondi, suddividendoli per famiglia in base al materiale utilizzato, al processo di formatura e alla somiglianza geometrica che non deve differire di ± 10%. Tali prove consistono in una prova di trazione e in tre prove di impatto, effettuando il prelievo da un fondo tra i primi dieci prodotti e successivamente da un fondo ogni 1000 realizzati, con minimo uno ogni due anni. La scelta, invece, di effettuare prove di scoppio permette di verificare il comportamento dell'intero sistema serbatoio in condizioni estreme, considerando non solo le proprietà del materiale dei fondi ma anche l'interazione con le saldature, le virole e la geometria complessiva del recipiente.
Analizzati i due processi di formatura, ci si chiede, dunque, quale dei due casi è maggiormente conveniente per il fabbricante dal punto di vista economico e pratico.

3. Una analisi costi-benefici

Come detto, la norma permette di evitare, nella formatura a freddo, il trattamento termico dei fondi, non ponendo, dunque, vincoli assoluti e consentendo al produttore di scegliere, il processo economicamente più conveniente, purché siano rispettati i requisiti di sicurezza stabiliti.

Per l'analisi costi-benefici che segue si è tenuto conto dei costi medi di mercato vigenti a fine anno 2025. Nel caso che il fabbricante decida di effettuare il trattamento termico dei fondi, il costo medio per il trattamento dei due fondi di un serbatoio è pari a 300,00 €. Se invece volesse evitare il trattamento termico effettuando prove sul materiale, il costo di una prova di trazione è di 40,00 € e quello di una terna di prove di impatto è di 65,00 €.
Il costo di fabbricazione dei serbatoi da utilizzare come prototipi, nel caso il fabbricante decidesse di effettuare le prove di scoppio, dipende ovviamente dalla dimensione geometrica del singolo prototipo. Il costo dei serbatoi utilizzati per le prove di scoppio, che descriveremo nel successivo caso di studio, è il seguente:

- prototipo di diametro 800 mm, di capacità 990 litri, 260,00 €;
- prototipo di diametro 1000 mm, di capacità 1750 litri, 410,00 €;
- prototipo di diametro 1200 mm, di capacità 1650 litri, 490,00 €;
- prototipo di diametro 1700 mm, di capacità 5000 litri, 2600,00 €.

I diametri utilizzati servono a coprire tutte le famiglie di serbatoi prodotti, con un costo complessivo di 3760,00 €.
Tale cifra equivale al costo del trattamento termico di 25 fondi (3760,00 € / 150,00 €). Dunque è sufficiente produrre 13 serbatoi per compensare il costo delle prove di scoppio.
Le prove sui materiali avrebbero invece un costo di 105,00 € per i primi 10 serbatoi e poi sempre 105,00 € ogni 1000 serbatoi.
Il costo delle prove di scoppio si ammortizza pertanto dopo 35010 serbatoi prodotti (3760,00 € / 105,00 € = 35,8). Nella scelta se effettuare le prove di scoppio bisogna poi prendere in considerazione ulteriori vantaggi, non immediatamente quantificabili economicamente, che includono:

- eliminazione dei tempi morti legati all'eventuale trasporto dei fondi presso impianti esterni per il trattamento termico;
- riduzione del rischio di danneggiamento dei componenti durante le movimentazioni;
- maggiore flessibilità produttiva e riduzione dei tempi di consegna;
- validazione sperimentale dell'intero processo costruttivo, non solo delle proprietà del materiale del fondo.

È interessante notare come l'analisi economica cambi radicalmente in funzione dei volumi produttivi. Per produzioni di piccola scala (sotto i 13 serbatoi), le prove di scoppio non risultano convenienti. Per produzioni medie (tra 13 e 35.000 serbatoi), le prove sui materiali rappresentano la soluzione più economica. Solo per produzioni molto elevate (oltre 35.000 serbatoi) le prove di scoppio diventerebbero più convenienti, sebbene occorrerebbe tenere in conto gli aumenti del costo nel tempo delle prove sui materiali e i costi indiretti determinati dal fatto che per garantire la bontà delle prove occorre tenere aggiornato il sistema di qualità. Va inoltre considerato che i costi del trattamento termico tendono ad aumentare proporzionalmente ai costi energetici, mentre il costo delle prove di scoppio si affronta solo all'inizio della produzione in serie.

4. Un caso di studio

La Ditta CPS s.r.l. produce serbatoi per GPL ai sensi della Direttiva PED 2014/68/UE utilizzando il modulo H1 certificato dall'Organismo Notificato INAIL n. 0100. Le diverse tipologie di serbatoi prodotti hanno diametri variabili da 600 mm a 1700 mm. La Ditta ha deciso di eseguire prove di scoppio su serbatoi nuovi aventi diametri di 800 mm, 1000 mm, 1200 mm, 1700 mm, aventi volume rispettivamente di 990 litri, 1750 litri, 2750 litri e 5000 litri.

Preliminarmente la Ditta CPS ha redatto una procedura per l'effettuazione delle prove di scoppio, ai sensi della norma UNI/TR 11667:2017 [2], allo scopo di ridurre il rischio di infortuni degli operatori e di danni materiali all'ambiente circostante, tenendo conto anche del Foglio tecnico INAIL FT/P/05/E/rev.0 [3]. Per la prova è stata utilizzata acqua trattata, uguale a quella utilizzata per le normali prove idrauliche di costruzione, a temperatura ambiente, rispettando dunque i limiti imposti dalla UNI/TR 11667:2017 nel paragrafo 5.2. A nessuna persona è stato permesso di avvicinarsi ai serbatoi durante l'esecuzione della prova, rispettando le distanze di sicurezza determinate in base ad indicazioni della letteratura sull'argomento [4] [5]. Il manometro certificato, di tipo digitale, è stato ubicato in modo da potersi leggere da una postazione sicura, all'inizio della tubazione dell'acqua, a valle del sistema pompante per la pressurizzazione utilizzata per la sopraelevazione della pressione. Per ognuna delle prove eseguite la CPS ha redatto un rapporto di prova.

Le prove e il loro esito sono state documentate con video, fotografie e misure dirette. Si riportano alcune foto significative dei danni subiti dai serbatoi e nella tabella 1 si riportano i risultati ottenuti.



Foto 1. La zona utilizzata per le prove di scoppio

Prototipo	Pressione di scoppio (bar)	Componente sede di innesco della frattura	Lunghezza frattura (cm)	Larghezza max frattura nel punto di scoppio (cm)
⦸ 800 mm, vol. 990 litri	63,48	Virola. Frattura longitudinale sulla generatrice superiore	75	9
⦸ 1000 mm, vol. 1750 litri	67,90	Virola. Frattura longitudinale sulla generatrice inferiore	97	8
⦸ 1200 mm, vol. 1650 litri	74,68	Virola. Frattura longitudinale sulla generatrice superiore	97	8
⦸ 1700 mm, vol. 5000 litri	65,10	Virola. Frattura longitudinale sulla generatrice superiore	136	10

Tabella 1. Risultati delle prove di scoppio

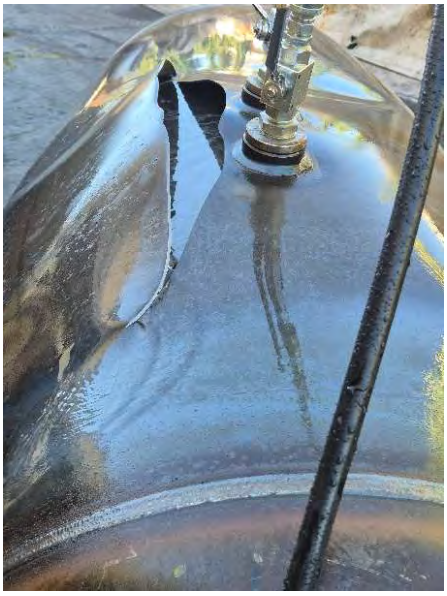




Foto 2 e 3. Rottura del serbatoio di diametro 800 mm




Foto 4 e 5. Rottura del serbatoio di diametro 1000 mm




Foto 6 e 7. Rottura del serbatoio di diametro 1200 mm




Foto 8 e 9. Rottura del serbatoio di diametro 1700 mm

L'analisi dei risultati evidenzia alcuni aspetti significativi:

– in tutti e quattro i prototipi testati, la frattura si è innescata sulla virola cilindrica e non sui fondi formati a freddo, dimostrando inequivocabilmente che i fondi non costituiscono il componente più debole del recipiente. Questo conferma pienamente il requisito richiesto dal punto 7.6.2.2 della norma EN 12542;

– le fratture longitudinali osservate sono coerenti con la teoria delle sollecitazioni nei recipienti cilindrici in pressione, dove la forza che spinge per "allargare" il diametro (tensione circonferenziale) è doppia rispetto alla forza che spinge per "allungare" il serbatoio (tensione longitudinale). La frattura si propaga lungo l'asse del cilindro, ossia segue la linea di minor resistenza, perpendicolare alla direzione della massima sollecitazione;

– l'esame visivo post-prova conferma che i fondi formati a freddo non hanno mostrato segni di cedimento, cricche o deformazioni anomale, mantenendo la loro integrità strutturale anche a pressioni ampiamente superiori a quelle di esercizio.

4.1 I risultati attesi

La norma UNI EN 12542:2020 al punto E.2.2 dell'appendice E "Formule di progettazione per recipienti a pressione" riporta la storica formula per il calcolo dello spessore del corpo cilindrico:

$$e_{min} = \frac{p\ D_0}{2fz + p} \qquad (1)$$

in cui p è la pressione di progetto, D_o è il diametro esterno del corpo cilindrico, z è il coefficiente del giunto di saldatura, f è la sollecitazione nominale di progetto.

Dalla formula (1) si ricava la formula inversa:

$$p = \frac{2efz}{D_0 - e} \qquad (2)$$

che possiamo utilizzare per determinare la probabile pressione di scoppio se sostituiamo ad f la sollecitazione di rottura del materiale desunta dal certificato del materiale e considerando il coefficiente di efficienza delle saldature pari a 1.

PROTOTIPO	Spessore virola (mm)	Rm sollecitazione di rottura (Mpa)	Pressione di scoppio attesa (bar)	Pressione di scoppio reale (bar)
⦸ 800 mm, vol. 990 litri	4	524	52,66	63,48
⦸ 1000 mm, vol. 1750 litri	5	564	56,68	67,90
⦸ 1200 mm, vol. 1650 litri	6	577	57,99	74,68
⦸ 1700 mm, vol. 5000 litri	8	576	54,47	65,10

Tabella 2. Confronto tra i valori di scoppio teorici e reali

Dalla tabella si evince uno scarto medio tra pressione di scoppio teorica e reale del 22,16%, a dimostrazione dei coefficienti di sicurezza utilizzati nelle formule di progetto e dell'importanza del fattore di forma del recipiente. Tale differenza può essere attribuita a diversi fattori:

– le caratteristiche di resistenza del materiale estrapolate dai certificati sono riferite a valori minimi garantiti, mentre il materiale reale può presentare caratteristiche superiori;

– è probabile che nella formatura a freddo si realizzi, come descritto in precedenza, un processo di incrudimento dell'acciaio con conseguente aumento della resistenza meccanica;

– si osserva che lo scarto percentuale tende ad essere maggiore per i diametri più piccoli (800 mm: 20,5%) rispetto a quelli più grandi (1700 mm: 19,5%), fenomeno che potrebbe essere correlato alla diversa distribuzione delle tensioni per dimensioni differenti dei serbatoi.

È importante sottolineare che tale scarto può essere considerato come il margine di sicurezza intrinseco del progetto e giustifica l'adozione dei coefficienti di sicurezza prescritti dalle normative. La coerenza dei risultati ottenuti su diverse geometrie valida, inoltre, l'applicabilità del metodo delle prove di scoppio all'intera gamma produttiva del fabbricante.

Sono stati messi a confronto nel grafico 1 i valori di pressione di scoppio attesa (da calcolo) con quelli di pressione reali ottenuti dall'esperienza delle prove di scoppio.

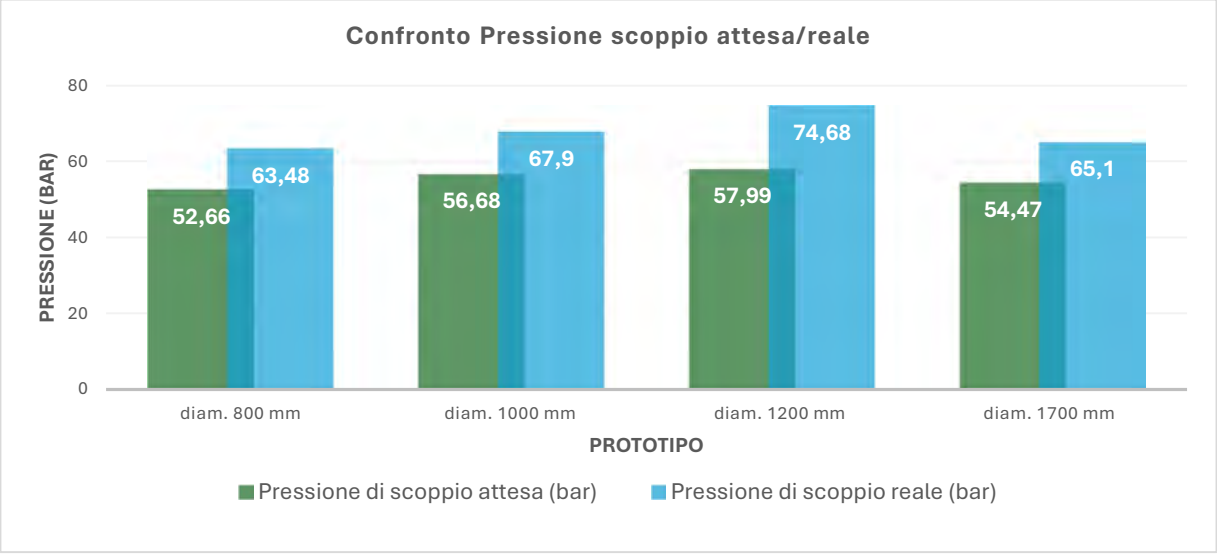


Grafico 1. Confronto pressione scoppio attesa/reale

Questo grafico delle sollecitazioni di rottura mette in evidenza il best performer, ossia il serbatoio che ha ottenuto i migliori risultati. È risultato essere quello con diametro 1200 mm, spessore 6 mm e Rm pari a 577 Mpa. Si sottolinea che anche il prototipo con diametro 1700 mm ha un materiale con qualità tecniche similari (576 Mpa) ma la

sua resistenza finale è minore a causa del diametro maggiore che genera tensioni superiori sulla parete.
È stato poi definito un valore indicizzato di "efficienza strutturale" andando a mettere in correlazione la pressione in bar e lo spessore della virola (elemento debole). Questa analisi è stata eseguita nelle due differenti condizioni di pressione (da calcolo e reale).

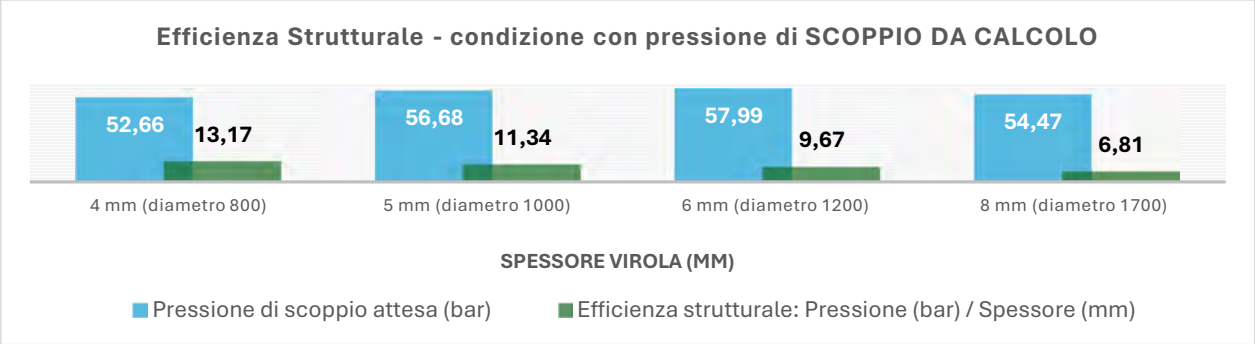


Grafico 2. Correlazione tra pressione di scoppio da calcolo e spessore virola

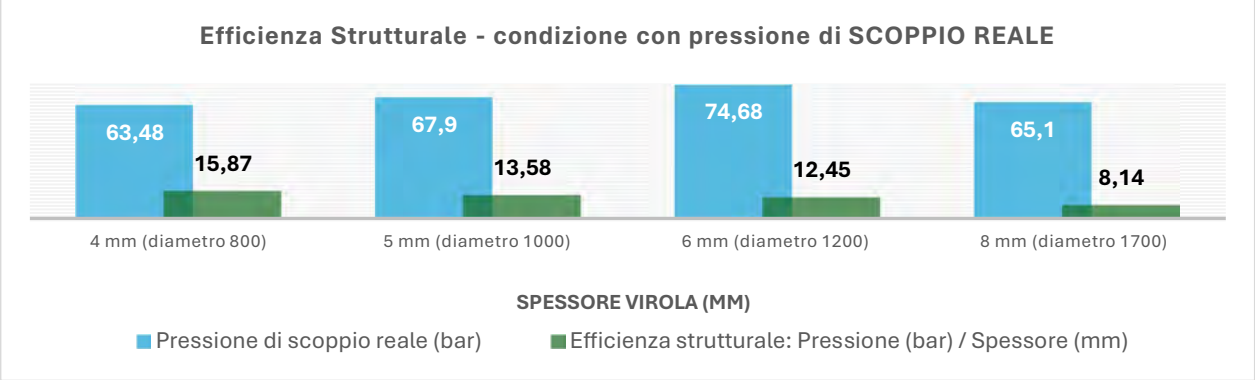


Grafico 3. Correlazione tra pressione di scoppio reale e spessore virola

Quello che ne deriva è la considerazione che anche per i prototipi analizzati vale la legge dei rendimenti decrescenti (spessori / resistenza) nei tubi, ossia passando da 6 mm di spessore virola del prototipo con diametro 1200 mm a 8 mm di spessore virola del prototipo con diametro 1700 mm la pressione di scoppio tende a scendere invece che a salire. Questo accade perché l'aumento del diametro (da 1200 mm a 1700 mm) ha un impatto negativo sulla resistenza molto più forte di quanto l'aumento di spessore riesca a compensare.
Si conferma, quindi, che tra i prototipi analizzati e caratteristici di una produzione di serie, lo sweet spot (il punto di ottimo) è quello con il diametro da 1200 mm e spessore di virola pari a 6 mm poiché sfrutta al meglio le proprietà del materiale. Oltre questa dimensione la geometria inizia a lavorare contro la resistenza del materiale stesso.
Sarebbe interessante verificare, con ulteriori dati, quest'ultima analisi andando ad effettuare ulteriori prove (a parità di condizioni tecniche del materiale base) su prototipi con diametri ancora maggiori. Tale condizione, con molta probabilità, non

risulterebbe economicamente conveniente per il fabbricante a causa dei numeri prodotti/anno con queste geometrie.

5. Conclusioni

Il presente lavoro ha analizzato l'applicabilità e la convenienza delle prove di scoppio come alternativa al trattamento termico dei fondi formati a freddo nei serbatoi per GPL fino a 13 m³, ai sensi del punto 7.6.2.2 della norma EN 12542:2020.

I risultati sperimentali ottenuti sulle quattro famiglie di serbatoi prodotti da CPS S.R.L. hanno dimostrato in modo inequivocabile che i fondi formati a freddo non costituiscono il componente più debole del recipiente. In tutti i prototipi testati, la frattura si è innescata sulla virola cilindrica a pressioni significativamente superiori a quelle di progetto.

Dal punto di vista economico, l'analisi costi-benefici ha evidenziato che per produzioni superiori a 13 serbatoi, le prove di scoppio rappresentano la soluzione più conveniente rispetto al trattamento termico sistematico dei fondi. Il break-even rispetto alle prove sui materiali si raggiungerebbe per volumi produttivi di circa 35.000 serbatoi. Però, oltre ai vantaggi economici diretti, le prove di scoppio offrono diversi benefici indiretti (flessibilità produttiva, riduzione dei tempi di consegna ed eliminazione dei rischi legati alle movimentazioni dei componenti verso impianti esterni di trattamento termico). Inoltre, forniscono una validazione sperimentale dell'intero sistema costruttivo, aumentando la confidenza nella qualità del prodotto finale.

Il confronto tra i valori teorici e sperimentali di pressione di scoppio ha confermato l'adeguatezza dei coefficienti di sicurezza adottati dalle formule di progetto normative, con scarti medi del 22,16% che evidenziano margini intrinseci di sicurezza.

Sulla base dei risultati ottenuti, si può affermare che le prove di scoppio rappresentano una valida ed affidabile alternativa al trattamento termico dei fondi formati a freddo.

Bibliografia

[1] Norma UNI EN 12542:2020. Attrezzature e accessori per GPL – Recipienti a pressione fissi cilindrici di acciaio saldato, prodotti in serie per lo stoccaggio di gas di petrolio liquefatto (GPL) con un volume non maggiore di 13 m^3 – Progettazione e fabbricazione.

[2] Norma UNI/TR 11667:2017. Verifiche di integrità di attrezzature / insiemi a pressione. Prove a pressione.

[3] INAIL – Foglio tecnico FT/P/05/E/rev.0 Prova a pressione di liquido. A cura di G. Gurnari, N. Palumbo, L. Ricciardi.

[4] G. Gurnari, G. Mulè, N. Palumbo. La valutazione del rischio nella prova a pressione di attrezzature metalliche. Atti convegno SAFAP 2008.

[5] G. Saville, S. M. Richardson, B. J. Skillerne de Bristowe. Pressure test safety. HSE Books. Sheffield, 1998.
[6] Linea guida su L'esecuzione in sicurezza delle prove di pressione condotte su attrezzature in esercizio. INAIL 2020.

Rischi di sovrapressurizzazione nelle autoclavi di sterilizzazione

C. De Toro[1], G. Battista[1], R. Luciano[1], M. De Mattia[2], A. Viviano[3]

[1]Inail - Uot di Avellino
[2]Inail - Uot di Milano

Introduzione

La sterilizzazione dei dispositivi medici rappresenta uno dei momenti principali nel processo di prevenzione e controllo delle infezioni in ambito ospedaliero; tale processo chimico-fisico porta all'eliminazione di ogni forma microbica vivente, sia essa patogena o meno.
Il processo di sterilizzazione mediante autoclave si avvale del vapore saturo in pressione; è una delle tecniche più diffuse essendo poco costosa e non tossica, oltre alla sua buona capacità di penetrazione.
L'utilizzo di tale attrezzatura può, tuttavia, avere implicazioni sulla sicurezza soprattutto per rischi legati alla sovrapressurizzazione.
Comprendere tali rischi, le cause e le possibili conseguenze, permette di adottare misure di prevenzione efficaci, soprattutto in ambito ospedaliero.
Lo scopo del presente lavoro è quello di presentare le cause comuni di sovrapressurizzazioni delle autoclavi di sterilizzazione, le possibili conseguenze, le misure necessarie per evitarle o contenerne gli effetti ed evidenziare l'importanza delle decisioni prese, sia per quanto concerne la tipologia di prodotto acquistato, sia per quanto concerne la manutenzione e la formazione specifica del personale addetto all'utilizzo dell'attrezzatura, al fine di ridurre il fattore di rischio in esame.

1. Il processo di sterilizzazione

1.1 La sterilità di un prodotto

In modo semplificato, con il termine sterilizzazione si intende qualsiasi processo, fisico o chimico, che determina la distruzione (quasi) totale di qualsiasi forma microbica, cioè l'uccisione di tutti i microrganismi patogeni, sia nella forma vegetativa che sotto forma di spore.
Esistono diversi riferimenti normativi che disciplinano tale processo, sia per quanto concerne le Direttive Europee che le norme tecniche internazionali.
La sterilità di un prodotto è definita dalla probabilità della presenza di microrganismi vitali sul prodotto dopo la procedura di sterilizzazione. Questa probabilità viene indicata come livello di garanzia di sterilità (SAL – *Sterility Assurance Level*). Un SAL viene normalmente espresso come 10^{-n}, con i valori 10^{-3} o 10^{-6} storicamente utilizzati con maggior frequenza per la sterilizzazione. L'espressione "SAL 10^{-n}" è un valore quantitativo per garantire la sterilità.

In particolare, la norma tecnica UNI EN 556-1:2002 stabilisce che per dichiarare un prodotto sterile si deve avere la probabilità che sia "non sterile" solo un prodotto su un milione di prodotti sterilizzati, cioè un SAL pari a 10^{-6}.

1.2 Le tecniche di sterilizzazione

Ogni strumento che viene in qualche modo a contatto con l'organismo umano, in particolare con le sue mucose o cavità sterili, deve essere sottoposto a un processo di sterilizzazione per evitare infezioni.
È possibile individuare quattro principali agenti sterilizzanti:

1. il **vapore saturo** - la tecnica di sterilizzazione sfrutta l'azione del vapore fluente, scaldato fino a 134 °C, per una durata dai 5 ai 7 minuti;
2. l'**ossido di etilene** - gas che impregna a lungo gli oggetti trattati e, mediante l'alchilazione, si sostituisce a livello atomico alle particelle dei microrganismi potenzialmente infettanti, causandone la morte; tale tecnica richiede tempi lunghi, costosi e personale altamente specializzato, data l'alta infiammabilità e la tossicità del gas;
3. l'**acido paracetico** - l'oggetto viene immerso in una soluzione con l'acido e con pH neutro, in un'apparecchiatura a circuito chiuso; anche questa sostanza presenta un'elevata tossicità e non tutti i tipi di materiali possono subire questo processo di sterilizzazione;
4. il **perossido di idrogeno** - sotto forma di gas plasma o vapore; si tratta di un metodo di sterilizzazione molto avanzato che permette di sterilizzare diversi tipi di materiali con un rischio per gli operatori molto basso.

2. I vantaggi dell'autoclave di sterilizzazione

L'utilizzo del vapore saturo per la sterilizzazione mediante autoclave è, sicuramente, la tecnica più diffusa in quanto consente di ottenere i migliori risultati, non è tossica e, oltretutto, ha bassi costi di gestione.
La sterilizzazione a vapore si ottiene mediante l'intervento combinato di tre fattori: PRESSIONE, TEMPERATURA, TEMPO. La temperatura del vapore sottoposto a pressione aumenta progressivamente in proporzione alla pressione del vapore; il calore derivante avvolge i prodotti nello sterilizzatore e uccide i microrganismi. La durata del ciclo di sterilizzazione è determinata dai valori di pressione e temperatura ma anche dalla specificità dei prodotti da trattare.
La macchina sterilizzatrice è realizzata generalmente in acciaio inossidabile per garantire requisiti di igiene all'interno del processo, funzionalità ottimali, lunga durata e il massimo della sicurezza; è conforme, oltre che alla Direttiva Macchine 2006/42/CE, anche alla Direttiva Dispositivi Medici 93/42/CEE e sue revisioni successive, nonché a numerose altre norme e standard tecnici, come la EN 285 e ISO/TS 17665, riferimenti normativi relativi all'ambito sanitario. È altresì conforme alla Direttiva sulle attrezzature a pressione (PED) 2014/68/UE, essendo presenti, tra i

componenti costruttivi, attrezzature in pressione necessarie allo svolgimento del processo di sterilizzazione, in particolare:

- la CAMERA DI STERILIZZAZIONE: camera pressurizzata che combina calore, vapore e pressione per raggiungere e mantenere una temperatura elevata per il periodo di tempo necessario al processo di sterilizzazione;
- l'INTERCAPEDINE: componente in pressione in cui circola il vapore;
- il GENERATORE DI VAPORE: inietta vapore saturo nella camera di sterilizzazione.

Detti componenti in pressione hanno, generalmente, caratteristiche (pressione e volume) tali da rientrare nel campo di applicazione del Decreto Ministeriale 329/2004 (denuncia all'INAIL per quanto concerne la verifica/dichiarazione di messa in servizio) e del Decreto Ministeriale 11 Aprile 2011 (modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di funzionamento e conservazione dell'attrezzatura in pressione).

Nonostante la sterilizzazione a vapore sia un processo consolidato da tempo, l'innovazione tecnologica e l'utilizzo di sensori e sistemi di automazione migliorano l'efficienza e la sicurezza dei cicli, riducono i tempi di processo, il consumo di utenze e l'esposizione a diversi fattori di rischio per l'operatore.

Oggi le autoclavi di sterilizzazione sono munite di applicazioni software "web based" che consentono di visualizzare in tempo reale le informazioni dei dispositivi secondo i diversi livelli di accesso degli utenti. Consentono inoltre di accedere allo storico dei cicli eseguiti e di eventuali allarmi. Tutto questo permette di avere una percezione più puntuale dello stato dell'attrezzatura, migliorandone l'efficienza e la sicurezza.

I moderni modelli di autoclavi sono particolarmente attenti anche alle crescenti esigenze di sostenibilità ambientale, prevedendo sistemi ECO per il risparmio idrico, e molto spesso l'utilizzo di acqua refrigerata da un gruppo chiller dedicato; ciò consente la riduzione di oltre il 90% dei consumi di acqua dell'autoclave per il funzionamento della pompa del vuoto grazie ad un set di scambiatori di calore ad alta efficienza che raffreddano anche le acque prima del loro scarico.

Le fasi del processo di sterilizzazione possono essere sintetizzate nello schema in Figura 1.

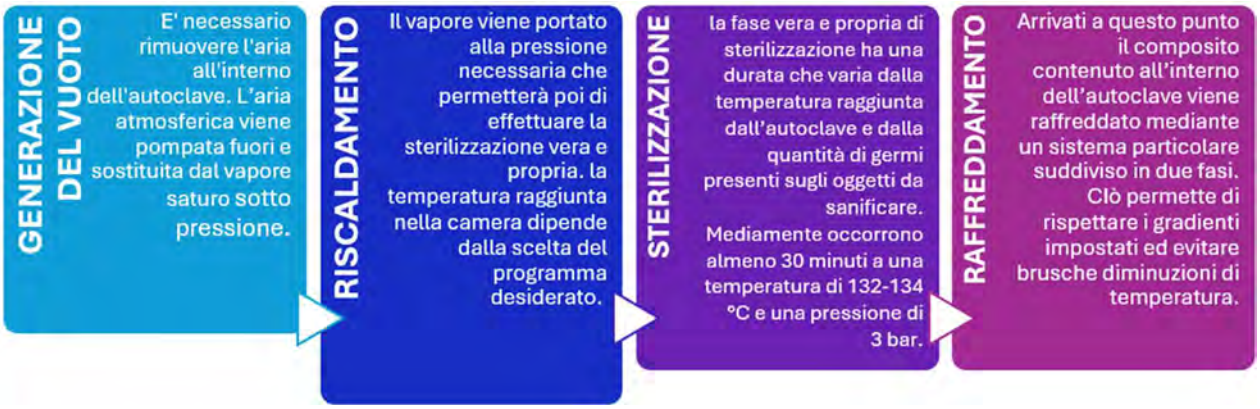


Figura 1. Le fasi del processo di sterilizzazione

2.1 Monitoraggio del processo di sterilizzazione

La presenza di ossigeno, ammoniaca, anidride carbonica ed altri gas disciolti nell'acqua, può comportare la formazione di incrostazioni e corrosione all'interno delle caldaie e delle tubazioni degli impianti a vapore. Le sostanze generate dalla corrosione possono formare, precipitando, depositi che contaminano il vapore da distribuire e le sue aree di utilizzo. I gas possono, inoltre, dar luogo anche ad una minore efficienza di scambio termico e ad altri effetti indesiderati nell'impianto.
Per questi motivi tali gas devono sempre essere monitorati e mantenuti entro limiti accettabili e questo lo si può fare mediante un opportuno trattamento dell'acqua di alimento e prevedendo dispositivi dedicati.
Il test "Bowie & Dick" è un test meccanico da eseguire all'inizio della giornata per verificare la capacità di rimozione dell'aria e di penetrazione del vapore in una camera vuota senza carico. Il test B&D è stato un notevolissimo passo in avanti nel controllo del processo di sterilizzazione, ma è un miglioramento che risale a oltre 50 anni fa. Era il 1963 e gli strumenti cannulati erano piuttosto rari e il confezionamento tipico degli stessi prevedeva l'uso di teli e panni (spesso di tipo Huckaback) e le modalità di penetrazione del vapore nei tessuti differiscono radicalmente da quelle dei corpi cavi dello strumentario.
Tuttavia, il test di Bowie & Dick:

- non assomiglia in alcun modo alle condizioni di lavoro a pieno carico di uno sterilizzatore;
- non fornisce informazioni riguardo alle condizioni della fase di sterilizzazione del nostro processo, ma solo a quanto è accaduto all'interno di una camera vuota all'inizio della giornata lavorativa.

Poiché ogni processo di sterilizzazione può considerarsi unico, quale decisione si dovrebbe prendere qualora il risultato del test Bowie & Dickd fosse "positivo" un giorno e "fallito" il giorno successivo? Si dovrebbero ragionevolmente richiamare tutti i carichi processati nel frattempo. Queste sono solo alcune delle limitazioni del test B&D attuale (senza contare sul fatto che la metodologia è tutt'altro che ecofriendly).
Ecco perché il futuro è rappresentato da sensori che effettuano un monitoraggio continuo della quantità di gas non condensabili (NCG) in ogni processo. Il principio di funzionamento si basa sul trasferimento di calore del vapore di condensazione all'interno del sensore. Il vapore si condensa contro la parete interna del sensore. Questo rilascia calore, che viene dissipato dal sensore. La quantità di calore dissipata al secondo viene misurata dal sensore. Se non c'è aria nel vapore, il vapore si condensa nella parte superiore del sensore. Se è presente aria, il vapore non si condensa fino alla parte superiore del sensore. Maggiore è la quantità di aria presente nel vapore, minore è il calore dissipato. Esiste quindi una relazione diretta tra la quantità di aria nel vapore nella camera di sterilizzazione e il segnale di uscita del sensore NCG. Gli NCG vengono misurati direttamente in questo modo. Il sensore misura la saturazione del vapore, il parametro che garantisce sia la presenza di sufficiente vapore che l'assenza di residui eccessivi di gas non condensabili. La

misurazione avviene all'estremità chiusa di un corpo cavo sottile a sezione costante (70 cm) che simula anche un canale aperto di lunghezza doppia (140 cm).
Questo esempio spiega il principio di funzionamento del sensore:
A. Esposto alla luce diretta del sole, i raggi UV-B abbronzano il corpo fino addirittura ad ustionare la pelle.
B. Esposto alla stessa luce, ma dietro un vetro, il corpo percepisce il calore dei raggi ma l'effetto abbronzante è minore perché la radiazione UV-B viene filtrata dal vetro.
Il sensore 4D ad infrarossi sfrutta un fenomeno simile: la luce ad infrarossi IR riesce ad attraversare l'aria ma non si trasmette attraverso il vapore. Il vapore "filtra" la radiazione infrarossa IR in funzione del suo livello di concentrazione.
I vantaggi sono diversi:

- maggiore sicurezza del paziente grazie al fatto che viene monitorato ogni singolo processo;
- la combo "NCG+IR" non solo è conforme agli standard attuali, ma li sostituisce sulla base di ricerche scientifiche sottoposte a revisione paritaria e, soprattutto, su principi termodinamici reali. La raccolta dei dati viene eseguita in ogni ciclo e fornisce tutte le informazioni pertinenti (tempo, temperatura, rimozione dell'aria, quantità di NCG, qualità del vapore e penetrazione del vapore nel carico effettivo).
- risparmio di tempo e risorse; la verifica dei cicli di sterilizzazione con indicatori biologici e/o chimici di processo può essere tralasciata. Ciò garantisce un notevole risparmio sui costi per il CSSD (Central Sterile Services Department) della struttura sanitaria. A seconda dell'applicazione degli indicatori di processo, che possono variare da Regione a Regione, è possibile un risparmio sui costi di circa € 20.000 all'anno. Senza l'esecuzione di singoli cicli di test, il consumo di acqua ed energia si riduce con una media di circa il 12% per sterilizzatrice/anno (250 giorni lavorativi, 8 cicli al giorno). Si tratta di un enorme contributo alla sostenibilità della CSSD e dell'ambiente;
- completa digitalizzazione della tracciabilità.

2.2 I rischi di sovrapressione

La presenza di sensori, sistemi di automazione e software conformi a standard europei garantiscono la sicurezza della macchina, dell'attività dell'operatore e anche del dato.
Tali macchine sono conformi a diverse norme tecniche che garantiscono la sicurezza elettrica (EN 61326-1, IEC EN 60204-1, CEI EN 61010-2-040); utilizzano standard internazionali per lo sviluppo del software, come IEC 62304 e HL7, con un corretto approccio dalla fase di progettazione del prodotto software fino alla corretta gestione e conservazione del dato, garantendo robustezza, integrità e condivisione del dato stesso. Tuttavia, sono comunque composte da attrezzature che lavorano ad alta pressione che, se non correttamente gestite, possono generare rischi significativi. La sovrapressurizzazione in un'autoclave può essere determinata dal

malfunzionamento delle apparecchiature oppure da un errore umano o da reazioni chimiche impreviste durante il processo di sterilizzazione.
Come accennato in precedenza, le autoclavi vengono realizzate generalmente con acciaio inossidabile AISI 304 e 316L, proprio per la loro qualità di robustezza e resistenza alla corrosione. Tuttavia, anche questi materiali, se sottoposti a pressioni superiori alle specifiche di progettazione, presentano delle limitazioni; in particolare possono manifestarsi deformazioni, incrinazioni o addirittura rotture. Ciò può avere diverse implicazioni:

- DANNI STRUTTURALI o POSSIBILE ESPLOSIONE: una pressione eccessiva può causare deformazioni permanenti o screpolature del corpo dell'autoclave; questo danno potrebbe non essere immediatamente evidente ma può indebolire la struttura, rendendola più suscettibile a futuri guasti, oppure, in casi estremi, si può determinare la rottura violenta dell'autoclave e provocare danni fisici al personale presente;
- ESPOSIZIONE CHIMICA: un rilascio improvviso e incontrollato del contenuto può includere sostanze chimiche, gas o materiali biologici pericolosi e quindi esporre l'operatore a gravi rischi per la sua salute e sicurezza;
- RISCHI TERMICI: la sovrapressurizzazione può causare un rapido rilascio di vapore o liquidi surriscaldati, causando gravi ustioni o lesioni da scottatura;
- CONTAMINAZIONE DEL PRODOTTO: può essere compromessa la sterilità o la qualità dei prodotti oggetto di sterilizzazione.

La progettazione e la costruzione dell'apparecchiatura con funzionalità avanzate, come i sistemi automatizzati di monitoraggio della pressione, meccanismi di arresto di emergenza e progetti di sicurezza, garantiscono elevati livelli di protezione contro gli incidenti da sovrapressurizzazione. In casi estremi, in cui questi sistemi non riescono ad impedire l'aumento di pressione nell'impianto, i vari componenti in pressione sono muniti di idonei dispositivi di sicurezza (Fig. 2) in grado di intervenire per scaricare il fluido in eccesso ed evitare danni o rischi per l'impianto.



Valvola di sicurezza

Manometri per camera, intercapedine e generatore di vapore

Figura 2. I dispositivi di sicurezza e controllo

La presenza dei manometri permette di misurare la pressione di esercizio dei singoli componenti a pressione; quando questi valori superano la soglia stabilita dal

fabbricante, la macchina va in “blocco” per permettere il ripristino del corretto funzionamento da parte del personale autorizzato. Il sistema di protezione critico, in questo caso la valvola di sicurezza, interviene solo in casi estremi per evitare esiti disastrosi derivanti da condizioni di sovrappressione, rilasciando un volume controllato di fluido dal sistema quando viene raggiunta la pressione massima predefinita, riducendo così la pressione in eccesso in modo sicuro.
In ogni sistema a pressione, il dimensionamento corretto delle valvole di sicurezza è cruciale per prevenire incidenti dovuti all'eccesso di pressione. Determinare la capacità di scarico richiesta di una valvola di sicurezza comporta la considerazione de flusso potenziale attraverso tutti i rami a monte della valvola. Per determinare il flusso durante uno scenario di guasto è necessario considerare il valore della pressione di taratura, e la capacità di scarico richiesta della valvola di sicurezza che può essere influenzato dagli scenari esterni che si possono verificare; in particolare per questa tipologia di attrezzatura due sono gli eventi principali da considerare:

- Guasto del regolatore di pressione;
- Impianto esposto al fuoco: i metodi di dimensionamento descritti in API 521 e nella Raccolta E ISPESL possono aiutare a definire il flusso di guasto in caso di incendio esterno che porta all'eccesso di pressione dell'impianto.

La gestione dei livelli di pressione richiede un approccio che deve prevedere il mantenimento delle apparecchiature in condizioni ottimali mediante solidi programmi di manutenzione, rispetto delle linee guida del produttore e una formazione completa agli operatori.
Nello specifico, le possibili misure di prevenzione da adottare ordinariamente dal personale tecnico preposto e formato sono:

- rispetto delle istruzioni d’uso del manuale, rilasciato in fase di collaudo;
- monitoraggio, durante l’intero ciclo di sterilizzazione, dei parametri fisici di pressione e temperatura, riportati a display o da indicatori specifici;
- predisposizione della camera tale da consentire e garantire una corretta circolazione del vapore e della sterilizzazione;
- esecuzione regolare di test del vuoto, ossi di tenuta, e di test del tipo Bowie & Dick, ossia di penetrazione del vapore;
- utilizzo di indicatori chimici e/o biologici per la validazione di ogni ciclo.

3. Conclusioni

Prevenire la sovrapressurizzazione richiede un approccio articolato che tenga conto di tutte le potenziali cause. Implementando protocolli di sicurezza completi, effettuando le necessarie attività di manutenzione e utilizzando in modo appropriato la macchina si può raggiungere un elevato livello di sicurezza. L’evoluzione tecnologica, l’automazione e la sensoristica hanno dato un contributo rilevante per quanto concerne la sicurezza di queste attrezzature. Tuttavia, per un coretto utilizzo è necessario un puntuale intervento di manutenzione in grado di garantire l’efficienza dei vari componenti.

Si ringrazia per la collaborazione F. Addabbo - Innomed innovazioni mediche srl

Bibliografia

[1] Linee Guida sull'attività di sterilizzazione quale protezione collettiva da agenti biologici per l'operatore nelle strutture sanitarie (D.Lgs. 81/2008 e s.m.i.)", ISPESL - Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro – Dipartimento Igiene del Lavoro
[2] LA STERILIZZAZIONE OSPEDALIERA un approccio in qualità, Appunti del Corso N. 5 del XIV Congresso Nazionale AIIC VENEZIA - anno 2014 - Vol 5
[3] Quali sono i potenziali rischi della sovrapressurizzazione in un'autoclave in acciaio inossidabile? - https://it.achievechem.com/news/what-are-the-potential-risks-of-over-pressuriz-84257958.html
[4] EN 285 – Sterilizzatrici a vapore – Grandi sterilizzatrici.
[5] ISO/TS 17665 – Sterilizzazione dei prodotti sanitari.
[6] CEI EN 61010-2-040 – Prescrizioni di sicurezza per apparecchi elettrici di misura, di controllo e per utilizzo in laboratorio – Parte 2-040: Prescrizioni particolari per sterilizzatori e disinfettatici usati nel trattamento di materiale medico.
[7] IEC EN 60204-1 Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements.
[8] IEC 62304 - Medical Device Software.
[9] EN 61326-1 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use EMC requirements - Part 1: General requirements.

Qualifica del procedimento di giunzione e del personale nelle tubazioni in PEAD

E. Albarelli[1], G. Vaccaro[2], A. Carnaccini[3], A. Carro[3]

[1] Libero professionista
[2] Inail – U.O.T. di Palermo
[3] Inail – U.O.T. di Forlì

Sommario
Le tubazioni in Polietilene ad Alta Densità (PEAD) sono ampiamente utilizzate per il trasporto di gas e fluidi in pressione, grazie alla loro flessibilità, resistenza alla corrosione e lunga vita utile. Un aspetto cruciale per garantirne l'integrità è l'esecuzione corretta delle giunzioni.
La memoria intende porre l'attenzione sia sulle normative di qualificazione dei procedimenti di giunzione (es. ISO 21307 ed UNI 10520 o UNI 10521) che sulla possibilità di certificazione ai sensi della direttiva PED di tali attrezzature.
Parallelamente, in conformità alle norme UNI EN 13067 ed UNI 9737 gli operatori devono ricevere una formazione teorica e pratica approfondita sulle tecniche di giunzione specifiche e superare esami teorici e pratici, ottenendo una certificazione che ne attesti la competenza e l'abilità in relazione al procedimento adottato e seguire la procedura qualificata.
Infine, l'affidabilità delle giunzioni è verificata mediante Controlli Non Distruttivi (CND). Il metodo principale include l'ispezione visiva (es. in conformità alla UNI EN 13100-1), che valuta il giunto durante tutte le fasi di preparazione, esecuzione e finali comprese le eventuali riparazioni. Tecniche avanzate, sebbene meno comuni rispetto all'ispezione visiva per il PEAD, possono includere metodi ad ultrasuoni per rilevare eventuali discontinuità interne.
Un rigoroso processo di qualifica sia del procedimento che del saldatore, combinato con i CND e con la registrazione della produzione, è la chiave per la sicurezza e la durabilità del sistema di tubazioni in PEAD.

1. Introduzione

In Italia la regolamentazione afferente alle reti di trasporto e distribuzione gas naturale, non ricadenti entro la dir. 2014/68/UE PED, è definita dal d.m. 16 aprile 2008 e qui fra i materiali ammessi per la realizzazione delle reti di trasporto gas naturale con densità fino a 0,8 e MOP (Pressione Operativa Massima) minore o uguale a 5 bar è previsto l'impiego del polietilene e può, quindi, essere preso come utile riferimento guida.
Il d.m. 16 aprile 2008 indica che le fasi di progettazione, costruzione, collaudo, manutenzione e risanamento delle linee esistenti delle infrastrutture del gas devono essere eseguite in ottemperanza alla norma UNI 9165 ed indica inoltre che i materiali

impiegati per la realizzazione delle condotte e relative tecniche di giunzione devono essere conformi alla norma tecnica UNI 9034.
Proseguendo nell'analisi della norma UNI 9034 con focus specifico sul polietilene si evince che sono ritenuti materiali adeguati allo scopo tutti i materiali conformi alle seguenti specifiche:

- Tubi in polietilene – UNI EN 1555-2
- Raccordi in polietilene – UNI EN 1555-3
- Valvole – UNI EN 1555-4

Secondo la norma UNI EN 1555-2, i tubi in PE sono classificati con la denominazione PE XXX dove XXX indica l'MRS (resistenza minima richiesta dopo 50 anni di vita a 20°C) del compound costituente il tubo. In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche delle gradazioni ammesse per i tubi trasporto gas.

Tipo PE	**MRS** [MPa]	**MOP** [bar]		**Colore**	
		SDR 17	**SDR 11**	**Righe**	**Tinta unita**
PE 80	8,0	1,5	3,0	Giallo	Giallo
PE 100	10,0	3,7	5,0	Giallo	Arancione

Tabella 1. Gradazioni PE ammesse per GAS [5]

Sul mercato da anni si osserva una sempre minore disponibilità della gradazione PE80 (essendo un materiale più flessibile con modulo elastico inferiore che si adatta all'impiego in rotoli) a favore della gradazione PE100 (più rigido e resistente alla propagazione della frattura e ai carichi a lungo termine).
A livello geometrico le tubazioni in PE sono classificate con il Diametro Nominale DN e con il valore SDR determinato dal rapporto fra DN e lo spessore nominale e_N.

2. Qualificazione del procedimento di giunzione: UNI ISO 21307, UNI 10520, UNI 10521

Secondo quanto riportato nella norma UNI 9034 (prospetto 12), i processi di giunzione permanente ammessi per la saldatura di tubi in PE in pressione per il trasporto di gas combustibile sono due:

- Saldatura ad **Elementi Termici per Contatto** (Testa a Testa), cod. 661 secondo UNI EN ISO 4063
- Saldatura per **Elettrofusione**, cod. 611 secondo UNI EN ISO 4063

Questi due processi di saldatura presentano prestazioni meccaniche equivalenti per l'impiego e capita di sovente che possano trovarsi applicati entrambi alla medesima linea di distribuzione.
La saldatura ad Elementi Termici per Contatto (ammessa solo per DN > 63mm) viene generalmente impiegata per la fabbricazione di linee nuove i cui tronconi vengono, quando possibile, realizzati fuori dallo scavo. La saldatura ad Elettrofusione, generalmente realizzata entro lo scavo, viene impiegata per piccoli e medi diametri (generalmente con $D_N \leq 125 \div 160$mm, ma non è una regola) in quanto di più semplice

e di veloce esecuzione e, in linea di massima, più economica oltre ad essere impiegata nella chiusura o riparazione di linee ove occorre giuntare due tronconi di tubo fissi.
La qualificazione del processo di saldatura per le condotte in PE, seppur simile, risulta essere leggermente più articolata rispetto al settore della saldatura degli acciai. Nello specifico, esistono norme di processo di saldatura unificate – medesimo approccio della norma UNI EN ISO 15612 per la saldatura degli acciai – che, se applicate puntualmente, garantiscono la conformità meccanica della giunzione senza che vi sia la necessità che il fabbricante/ installatore proceda preventivamente alla qualificazione del procedimento di saldatura – WPQR – che intenderà applicare nello specifico cantiere.
Nel caso in cui il fabbricante scelga di non applicare le norme di processo di saldatura unificate disponibili, egli dovrà procedere con la preventiva qualificazione del processo di saldatura che intende applicare mediante l'impiego della norma UNI 11508 – di rarissimo impiego per la parte WPQR.
Gran parte delle Non Conformità nella saldatura del PE è imputabile a errori operativi rispetto ai requisiti definiti dalla norma di processo applicata.

2.1 Elettrofusione: processo di saldatura e qualificazione del procedimento.

La giunzione per elettrofusione avviene sfruttando contemporaneamente due delle principali caratteristiche del PE:

- Elevato coefficiente di dilatazione termica – pari a 0,2 mm/°C/m;
- Bassa conducibilità termica – per tubi e/o lastre $\lambda \approx 0{,}40 \div 0{,}50$ W/m·K.

La giunzione dei tubi avviene mediante l'impiego di manicotti ad inserimento nei quali vengono inserite le due teste dei tubi da giuntare. Nei manicotti, nelle aree all'interfaccia con le superfici dei tubi innestate, sono annegate delle resistenze elettriche le quali sottoposte al passaggio di corrente continua riscaldano il materiale che le circonda. Grazie alla presenza di queste due forti contropressioni si avrà la compenetrazione del PE fuso tra manicotto e tubo e la saldatura dei tre componenti che costituiranno il giunto saldato. Una schematizzazione del processo di saldatura ad elettrofusione è riportata nella figura 1.

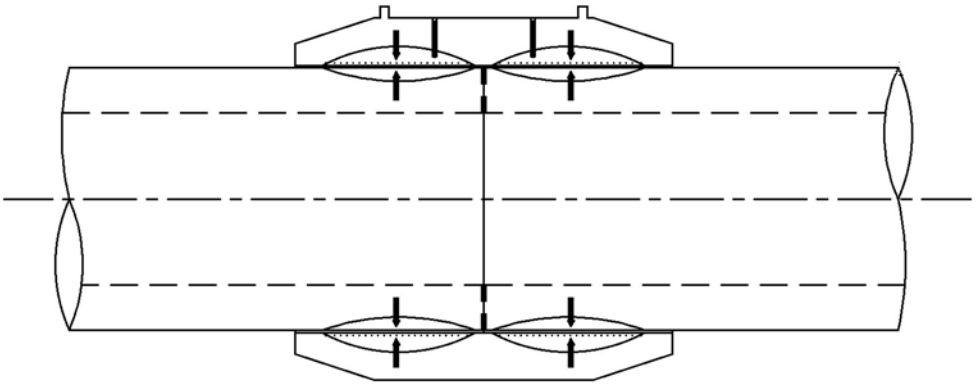


Figura 1. Schema processo saldatura ad elettrofusione [5]

La saldatura dei manicotti viene eseguita mediante l'impiego di specifiche saldatrici elettroniche (esempio in figura 2), le quali applicano puntualmente il ciclo di fusione previsto dal fabbricante del raccordo. La gestione del ciclo di saldatura è definita mediante una specifica modulazione dell'erogazione della corrente continua al manicotto da parte della saldatrice e non è in alcun modo modificabile dall'operatore.



Figura 2. Saldatrice ad elettrofusione durante la saldatura di un manicotto D_N355mm [5]

Si evince così che la definizione della procedura, meglio detta ciclo, di saldatura per elettrofusione è dettata dal fabbricante del raccordo da saldare il quale, prima di immettere i prodotti sul mercato, esegue specifiche prove e verifiche pratiche del processo di giunzione definito eseguendo test di laboratorio standardizzati secondo le indicazioni della/e norma/e di validazione ed approvazione dei raccordi elettro saldabili, quale ad esempio la UNI EN 1555-3 per raccordi per applicazioni gas, e valida così il processo di saldatura relegando al operatore esclusivamente l'onere di preparare ed assemblare correttamente i tubi ed i raccordi prima della saldatura, di applicare e rispettare i tempi di saldatura e i tempi e i metodi di raffreddamento previsti.

La norma di processo unificata applicabile per la saldatura ad elettrofusione è la norma UNI 10521 la quale al suo interno definisce la procedura operativa che il saldatore deve seguire nelle fasi di posa e giunzione delle condotte in PE. Le principali fasi operative sono:

- Controllo preliminare dei materiali da saldare (es. verifica ovalizzazione delle teste dei tubi);
- Controllo preliminare delle attrezzature e loro stato di conservazione e manutenzione (es. che la taratura biennale della saldatrice secondo UNI 10566 sia in corso di validità);
- Procedura di preparazione dei tubi e dei manicotti (es. raschiatura teste dei tubi e pulizia con idoneo detergente);
- Metodo di bloccaggio dei componenti da saldare al fine di evitarne lo spostamento durante la fase di saldatura (es. uso allineatori);

- Esecuzione del ciclo di saldatura composto da ciclo fusione definito dal fabbricante del manicotto più raffreddamento entro i sistemi di bloccaggio;
- Controlli di conformità dopo saldatura (es. esame visivo);
- Definizione di prove meccaniche eventualmente applicabili a campioni di saldatura prelevati dalla produzione;
- Rapporto delle attività pratiche di saldatura.

Le saldatrici per elettrofusione se ben configurate all'avvio delle attività di posa hanno la possibilità di registrare automaticamente le attività di saldatura permettendo successivamente il download dei dati su PC e la stampa dei verbali per ogni singola saldatura garantendo così anche la rintracciabilità del cantiere e del saldatore che le ha eseguite; alcune saldatrici di ultima generazione sono dotate di sistema di tracciabilità GPS così da avere, con una precisione di circa 2 m, il posizionamento della saldatura una volta interrata.

2.2 Elementi Termici per Contatto: processo di saldatura e qualificazione del procedimento.

La giunzione ad Elementi Termici per Contatto avviene sfruttando contemporaneamente due delle principali caratteristiche del PE:

- Bassa temperatura di rammollimento del PE – $T_R \approx 120 \div 130°C$;
- Bassa conducibilità termica – per tubi e/o lastre $\lambda \approx 0{,}40 \div 0{,}50$ W/m·K.

La giunzione dei tubi avviene, dopo un'accurata preparazione, mediante la compressione e compenetrazione delle due teste dei tubi da giuntare preventivamente portate ad una predefinita temperatura di riscaldamento superiore alla temperatura di rammollimento. Con questo procedimento le teste dei tubi vengono compenetrate una nell'altra ad una determinata pressione e per un determinato tempo generando una giunzione monolitica. Una schematizzazione del processo di saldatura ad elettrofusione è riportata nella figura 3.

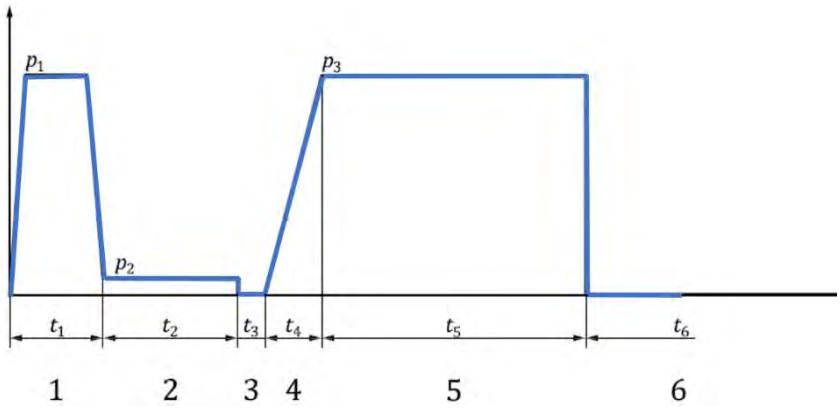


Figura 3. Schema di base saldatura testa a testa [5]

Le fasi costituenti il processo di saldatura, secondo il grafico in figura 3, sono:

- Fase 1: Riscaldamento ad altra pressione delle teste dei tubi da giuntare. Attività eseguita mediante l'interposizione di un elemento riscaldante fra le due superfici spinte una verso l'altra;

- Fase 2: Riscaldamento a bassa pressione delle teste dei tubi da giuntare. Attività eseguita mediante l'interposizione di un elemento riscaldante fra le due superfici ma con l'eliminazione della pressione di spinta fra le due facce;
- Fase 3: Rimozione dell'elemento riscaldante;
- Fase 4: Saldatura, ovvero compenetrazione delle due teste dei tubi rammollite una nell'altra;
- Fase 5: Raffreddamento in alta pressione le due superfici spinte una verso l'altra;
- Fase 6: Raffreddamento a bassa pressione fuori macchina.

La macchina saldatrice è composta da due carrelli, uno fisso ed uno mobile, quest'ultimo permette la movimentazione di un tubo e lo schiacciamento sull'altro.



Figura 4. Macchina saldatrice Testa a Testa [5]

Dopo il posizionamento dei tubi da giuntare sulla macchina saldatrice essi devono preparati nelle teste mediante un'attenta fresatura realizzata con una fresa a due facce che le rende parallele.
La norma di processo unificata applicabile per la saldatura ad elettrofusione è la UNI ISO 21307 la quale definisce la procedura operativa che il saldatore deve seguire nelle fasi di posa e giunzione delle condotte in PE.
A completamento della UNI ISO 21307, è stata emanata la norma tecnica UNI 10520 che specifica le modalità per la verifica delle condizioni ambientali, delle attrezzature e dei materiali utilizzati. L'applicazione della norma UNI 10520 non è ad oggi obbligatoria, ma volontaria a meno che una norma di progettazione o di prodotto non ne richieda esplicitamente l'applicazione, cosa che avviene, ad esempio, con la UNI 9034.
Anche in questo caso rimane essenziale definire come deve avvenire la raccolta delle evidenze delle attività di saldatura realizzate, ovvero la compilazione di specifici verbali di saldatura a raccolta delle impostazioni macchina (tempi e forza di spinta di saldatura) applicati in produzione al fine di poterli paragonare con quanto previsto dalla WPS di produzione applicata e redatta secondo le indicazioni di norma – un esempio di verbale di saldatura è reperibile nell'Allegato C della norma UNI 10520.

Le macchine saldatrici ad Elementi Termici per Contatto – siano esse manuali a molla, idrauliche o elettriche – sono macchine meccaniche e molto raramente hanno funzioni di registrazione, per cui risulta, rispetto al processo ad elettrofusione, ancora più importante ed essenziale che la registrazione dei parametri di saldatura avvenga con precisione.

3. Qualifica del personale/operatori

La norma UNI EN 13067 risulta ad oggi essere l'unica applicabile per la qualificazione del personale per le giunzioni permanenti di materiali termoplastici e, come le sue omologhe applicabili per le giunzioni in acciaio, definisce tutte le regole inerenti all'accesso all'esame, esecuzione della sessione d'esame e relativi requisiti per la qualifica del personale, testing dei campioni, classi di qualifica e validità, certificazione dei saldatori, regole di gestione e durata delle certificazioni.
La UNI EN 13067 non risulta completa in tutte le sue parti e per alcuni aspetti ne demanda la definizione e gestione ad altri documenti esterni alla norma stessa. A titolo di esempio la norma rimanda alla linea guida EWF N 581-01 o a norme nazionali che potrebbero essere utilizzate a completamento. L'Italia ha pubblicato la norma UNI 9737 la quale chiarisce ed integra i requisiti minimi previsti dalla UNI EN 13067 e definisce:

- Allegato A: Definizione dettagliata dei centri di Formazione per saldatori condotte in PE, requisiti richiesti e metodi di valutazione ed approvazione;
- Allegato B: Definizione della modalità di svolgimento dei corsi per la preparazione dei saldatori alla prova di qualificazione, programma dei corsi, durata, prove pratiche da eseguire, ecc.

Ad oggi la norma UNI 9737 non è più applicabile autonomamente ma per come è strutturata deve essere sempre affiancata alla UNI EN 13067.
La sua applicazione è volontaria e non obbligatoria ai fini della definizione dei percorsi formativi per i saldatori, salvo i casi in cui una specifica norma di prodotto non ne richieda l'applicazione. È questo il caso della norma UNI 9034 dove alla *nota b)* del *prospetto 12* indica che nel caso in cui l'impianto ricada entro il campo di applicazione della Direttiva 2014/68/UE, allora il saldatore deve essere qualificato secondo UNI EN 13067 ed UNI 9737.

3.1 Classi di qualifica e campi di validità

La norma UNI EN 13067 definisce le regole e le procedure per la verifica della manualità dei saldatori per tutti i materiali termoplastici (PE, PP, PVC, PVDF, ecc.) in tutte le loro forme di prodotto (tubi o fogli) e tutti i procedimenti di giunzione applicati a livello industriale per i vari materiali e non propone un focus esclusivo per le condotte in PE saldate con i procedimenti 661 (elementi termici per contatto) e 611 (elettrofusione) applicabili per la giunzione di condotte in pressione. Di seguito si farà riferimento esclusivamente al sottogruppo materiali 3PE, alle classi di qualifica ed ai processi di saldatura riportati in Tabella 2.

CLASSE	PROCESSO DI SALDATURA		ABILITAZIONE D_N [mm]
3PE – 3.4	UNI EN ISO 4063 – 661	Elementi termici per contatto	≤ 315
3PE – 3.5	UNI EN ISO 4063 – 661	Elementi termici per contatto	> 315
3PE – 3.6	UNI EN ISO 4063 – 611	Elettrofusione	≤ 315
3PE – 3.7	UNI EN ISO 4063 – 611	Elettrofusione	> 315
3PE – 3.8	UNI EN ISO 4063 – 611	Elettrofusione	Tutti

Tabella 2. Classi di qualificazione saldatori tubazioni PE [5]

Un'ulteriore variabile definita dalla UNI 9737, da tenere in considerazione in sede di definizione e/o valutazione di una qualifica del saldatore, applicabile solo per le qualifiche delle classi 3.4 e 3.5 (661 – Elementi termici per contatto) è riferita al grado di meccanizzazione come indicato in tabella 3.

MACCHINA USATA PER ESAME	MACCHINE UTILIZZABILI IN PRODUZIONE		
	Manuale	Semiautomatica	Automatica
Manuale	X	X	X
Semiautomatica		X	X
Automatica			X

Tabella 3. Grado automazione saldatrici 661 [5]

3.2 Esame di qualificazione e certificazione del personale

Secondo quanto previsto dalla UNI EN 13067 ed UNI 9737 per ottenere il certificato di qualificazione il saldatore deve superare una prova teorico/pratica.
Sono ammessi alle prove di qualificazione esclusivamente i candidati che rispondono ad almeno uno dei seguenti tre requisiti:

- Aver completato un apprendistato presso un produttore di componenti per sistemi di tubazioni in polietilene, avente a oggetto i processi di saldatura per i quali il saldatore richiede la qualificazione (da dimostrare mediante attestazione del produttore). L'apprendistato presso un datore di lavoro che svolge installazione/ saldatura di condotte in PE non è ritenuto valido ai fini del soddisfacimento del presente requisito per l'ammissione all'esame;
- Possedere, negli ultimi quattro anni, almeno due anni complessivi (730 giorni reali) di esperienza documentata come saldatore di materie plastiche (da dimostrare mediante dichiarazione del datore di lavoro con elenco cantieri, clienti, giorni d'impiego e tipologia di attività svolte);
- Aver frequentato un corso di addestramento presso un centro di formazione operante in conformità ai requisiti della UNI 9737 e riconosciuto dall'organismo di certificazione (da dimostrare mediante attestato di frequenza e registrazione delle prove di saldatura svolte durante il corso).

Quest'ultimo requisito prevede che il centro di formazione operi a seguito di verifica ed approvazione da parte di un Organismo di Certificazione accreditato secondo le norme UNI CEI ISO/IEC 17021-1 ed UNI CEI EN ISO/IEC 17024.
Qualora il saldatore opti per frequentare il corso di addestramento, va tenuto presente che la UNI 9737 prevede due differenti livelli di accesso al corso:

- Entry Level 1: Candidati che non possiedono i requisiti dell'Entry Level 2, e che pertanto devono frequentare il corso in forma completa.
- Entry Level 2: Candidati già in possesso di certificato di qualificazione, con qualifica coincidente con quella per la quale il candidato intende sostenere il nuovo esame di qualificazione. Detto certificato può essere in scadenza o anche scaduto, purché da non oltre sei mesi rispetto alla data prevista per la nuova prova di qualificazione. Tali candidati possono frequentare il corso in forma ridotta.

Al termine del corso, il centro di formazione rilascia ad ogni partecipante un attestato di frequenza, non sostitutivo del certificato di qualificazione del saldatore, mediante la presentazione del quale il saldatore può essere ammesso alle sessioni d'esame entro un tempo massimo di sei mesi dalla data di conclusione del corso.
In sede di sessione d'esame il saldatore candidato deve sostenere un esame quiz a risposta multipla con numero di domande definito in funzione del numero di processi di saldatura per i quali voglia conseguire la qualifica e di seguito deve sostenere una prova che prevede la realizzazione di un campione di saldatura, predefinito per ogni classe di qualifica che intende conseguire. Superato l'esame visivo eseguito dall'esaminatore (PWE – Plastic Welding Examiner) vengono eseguiti i test distruttivi previsti dalla norma UNI EN 13067 e ad esito positivo il saldatore risulta qualificato.
Secondo UNI 9737, i certificati di qualifica del personale devono essere emessi da un organismo di certificazione che deve operare secondo UNI CEI ISO/IEC 17024 con riferimento specifico all'attività oggetto delle norme UNI EN 13067 ed UNI 9737.

4. Valutazione e classificazione dei difetti di giunzione

Noti i principi di base che caratterizzano i processi di saldatura applicabili per l'esecuzione delle giunzioni permanenti di condotte in PE è necessario definire come valutare le imperfezioni che possano presentarsi nelle giunzioni e la loro accettabilità come da tabella 4.

ARGOMENTO	NORMA TECNICA	APPLICABILITA'	
		EF[1]	T/T[1]
Classificazione delle imperfezioni	UNI EN 14728	X	X
Livelli accettabilità imperfezioni	UNI EN 16296	X	X
Controllo Visivo	UNI EN 13100-1	X	X
Controllo Radiografico	UNI EN 13100-2	--	X
Controllo Ultrasuoni	UNI EN 13100-3	X[2]	X[3]
[1] EF = Elettrofusione; T/T = Elementi Termici per Contatto.			

[2] In caso di esecuzione di controlli con la tecnica phased array suggeribile l'integrazione della ISO/TS 16943.
[3] In caso di esecuzione di controlli con la tecnica phased array suggeribile l'integrazione della ISO/TS 22499.

Tabella 4. Principali norme per controlli qualità [5]

La definizione dell'impianto normativo applicabile per ogni singola linea/ impianto e la conseguente definizione dei requisiti qualità e del piano dei controlli da eseguire deve avvenire già in sede di definizione delle specifiche di progetto e non può essere demandata alla produzione, risulta pertanto essenziale che il progettista operi in tal senso definendo anche tutti questi aspetti – prassi questa ad oggi consolidata per le giunzioni permanenti degli acciai.

5. Caso studio con iter certificativo in corso di svolgimento.

Un particolare caso di studio è inerente alla realizzazione di una linea di adduzione gas metano per alimentazione di una caldaia industriale da realizzare in piazzale portuale carrabile secondo lo schema rappresentato in figura 5a ed esemplificato in figura 5b. Partendo dal punto di consegna della rete gas, posto sul confine della proprietà, alla pressione di 12 bar il gas metano viene veicolato entro una cabina di decompressione dove viene portato alla pressione di 4 bar e da qui veicolato mediante una condotta privata fino al punto di utilizzo posto a circa 600m di distanza. Il primo tratto di condotta di lunghezza pari a circa 50m sarà realizzato con una tubazione aerea in acciaio, la quale verrà collegata, mediante specifico giunto di transizione Acciaio-PE secondo UNI 9736, ad una condotta in PE interrata. La richiesta al fabbricante è quella di fornire la cabina di decompressione e la condotta gas in conformità alla Direttiva 2014/68/UE.

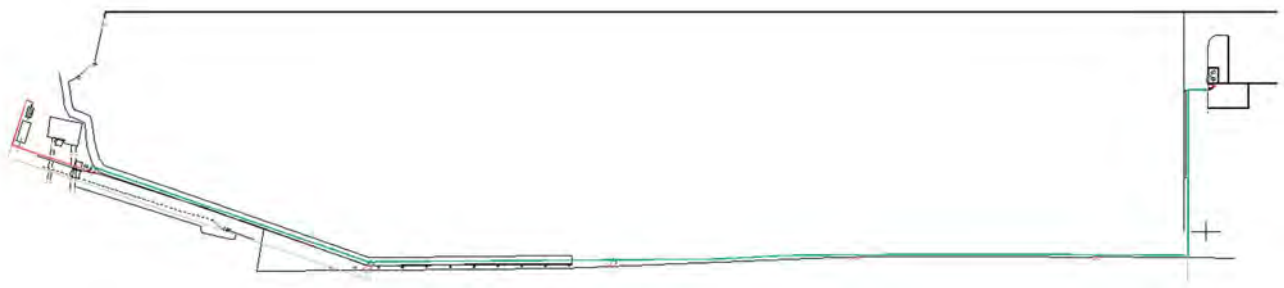


Figura 5a. Estratto disegno condotta privata trasporto gas metano

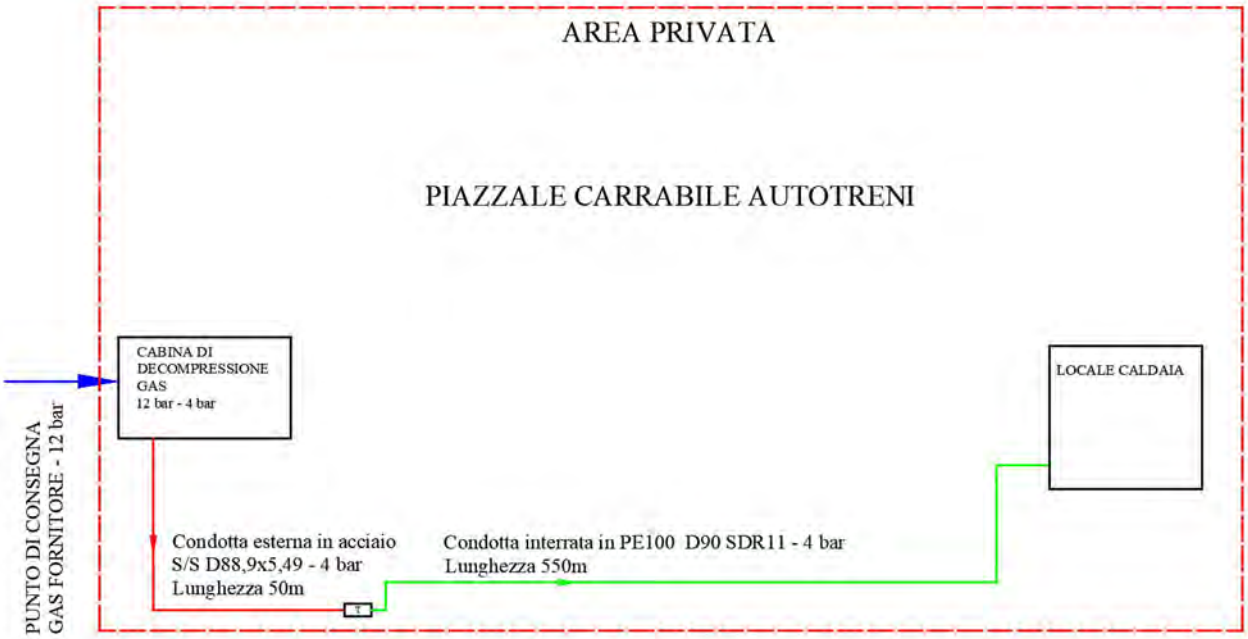


Figura 5b. Schema di massima di progetto condotta privata trasporto gas metano

Con riferimento alla sola parte di condotta in polietilene, le specifiche di progetto sono:

a. Tubo DN90 SDR 11 S5 in PE100 secondo UNI EN 1555-2 fornito in verghe da 12m;
b. Giunzioni da eseguirsi mediante saldatura ad elettrofusione;
c. Impiego di raccordi in PE secondo UNI EN 1555-3;
d. Posa entro canaletta protettiva prefabbricata specifica annegata in soletta in c.a. alla profondità di 1m dal piano di calpestio ricoperta da terra con cordolo finale in c.a. fino al piano di calpestio carrabile con inserimento di n.6 sfiati;
e. Installazione di giunti dielettrici ad inizio e fine linea;
f. Specifiche di collaudo della condotta secondo UNI 9165.

In sede di analisi preliminare di progetto sono state richieste le seguenti implementazioni:

- Determinazione della categoria PED per la condotta in PE;
- Definizione della norma di progetto applicata (UNI 9165 + UNI 9034) con verifica del rispetto dei requisiti minimi imposti dalla norma armonizzata UNI EN ISO 15494.
- Redazione di PMA[1] specifiche per tubi e raccordi;
- Definizione del livello di accettabilità delle imperfezioni secondo UNI EN 16296 ed UNI 10521;
- Definizione del piano dei controlli da applicare in produzione;
- Definizione della documentazione di attestazione della qualità da produrre e fornire (es. verbali di controllo della produzione, certificazione del personale,

[1] Particular Material Appraisal

certificati di taratura delle saldatrici impiegate, documentazione di qualità inerente ai materiali impiegati quali tubi, raccordi e manicotti, verbali di collaudo, ecc.)

Ad oggi l'iter di certificazione da parte del Fabbricante risulta in corso di svolgimento, la tubazione in esame ricade in I categoria per la quale non è previsto l'intervento di un Organismo Notificato ma rimane obbligatoria la redazione del Fascicolo tecnico completo da parte del Fabbricante.

6. Conclusioni

La verifica delle attività di posa e saldatura delle condotte in PE risulta essere in assoluto la fase più critica ai fini della garanzia di una corretta esecuzione delle attività di saldatura a dimostrazione del rispetto delle indicazioni fornite dalle norme di processo unificato o dalle WPQR dell'impresa esecutrice su cui è necessario si concentrino i principali sforzi di gestione e verifica.

La regolamentazione delle attività di saldatura e monitoraggio delle tubazioni in PE è stata attenzionata mediante l'emanazione della norma di sistema per le imprese UNI 11024 che definisce i requisiti di qualità per la saldatura di condotte in PE in pressione – omologa del pacchetto normativo UNI EN ISO 3834 per la saldatura ad arco degli acciai, ma ad oggi non certificabile autonomamente ed impiegabile come specifica tecnica da inserire entro un sistema di gestione UNI EN ISO 9001 – e della norma UNI 10761 che definisce i compiti e responsabilità del personale addetto al Coordinamento delle Attività di Saldatura di condotte in PE in pressione. Queste ultime due norme sono ad oggi assolutamente volontarie ed esclusivamente nazionali, risultano comunque ottime basi per lo sviluppo di un futuro impianto normativo completo, efficace ed auspicabilmente armonizzato in tutta la comunità europea.

Un ultimo aspetto doveroso di attenzione è inerente alla conformità del PE per gli impieghi in ambito della dir. 2014/68/UE PED. Nello specifico, come emerso nel caso di studio, all'impresa esecutrice viene richiesta la redazione di PMA per i materiali previsti per la fabbricazione in quanto le norme UNI EN 1555-2 per i tubi e UNI EN 1555-3 per i raccordi non sono norme armonizzate alla direttiva. Va osservato che nella dir. 2014/68/UE PED l'impiego di materiali termoplastici è previsto dalla norma armonizzata UNI EN ISO 15494 il cui campo di applicazione però non è direttamente applicabile al caso di studio in quanto incentrato sulle tubazioni per applicazioni industriali e, oltretutto, non è specifica per il trasporto del gas naturale. La norma tecnica adatta alle applicazioni per trasporto gas è, come visto, la UNI 9165 per cui al fine di garantire la conformità della fabbricazione con i requisiti di progetto l'approccio proposto nel caso di studio è coerente con la norma di progetto. L'accettazione dei materiali, richiesti in ambito PED, deve avvenire mediante redazione di specifica PMA utile per la valutazione della conformità dei materiali previsti a progetto con i requisiti della norma armonizzata. Tale indicazione è inserita nel capitolo 1 della norma UNI EN ISO 15494, dove come primo aspetto prevede che siano previste applicazioni della norma in aree diverse da quelle dalla stessa indicate (es. gas) con il vincolo che siano

pienamente rispettati tutti i requisiti della norma stessa e delle norme nazionali applicabili e come secondo aspetto, sempre nel capitolo 1, indica che componenti conformi a norme nazionali, se applicabili, posso essere impiegati come componenti conformi alla norma armonizzata se sono conformi ai requisiti della norma armonizzata. La PMA dei materiali, es. tubi secondo UNI EN 1555-2, deve quindi riportare la valutazione delle caratteristiche dei materiali impiegati e l'analisi di conformità con le caratteristiche richieste dalla norma armonizzata.

Bibliografia

[1] D.M. 16 aprile 2008. Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e dei sistemi di distribuzione e di linee dirette del gas naturale con densità non superiore a 0,8

[2] UNI 9165:2020. Infrastrutture del gas - Condotte con pressione massima di esercizio minore o uguale a 5 bar - Progettazione, costruzione, collaudo, conduzione, manutenzione e risanamento

[3] UNI 9034:2022. Tubazioni per la distribuzione del gas con pressione massima di esercizio (MOP) minore o uguale 0,5 MPa (5 bar) - Materiali e sistemi di giunzione

[4] UNI EN 1555-2:2025. Sistemi di tubazioni di materia plastica per la distribuzione di gas combustibili - Polietilene (PE) - Parte 2: Tubi

[5] EA Engineering di Ing. Enrico Albarelli - QUADERNO TECNICO del Saldatore di Condotte in Polietilene e Polipropilene

[6] UNI 10521:2021. Saldatura di materie plastiche - Saldatura per elettrofusione - Saldatura di tubi e/o raccordi di polietilene per tubazioni in pressione

[7] UNI ISO 21307:2020. Tubi e raccordi di materia plastica - Procedure per giunzioni mediante saldatura testa a testa per sistemi di tubazioni di polietilene (PE)

[8] UNI 10520:2021. Saldatura di materie plastiche - Saldatura ad elementi termici per contatto - Saldatura di giunti testa a testa di tubi e/o raccordi di polietilene per il trasporto di gas combustibili, di acqua e di altri fluidi in pressione

[9] UNI EN 13067:2021. Personale per la saldatura di materie plastiche - Qualificazione dei saldatori - Assiemi saldati di materiale termoplastico

[10] UNI 9737:2021. Qualificazione dei saldatori di materie plastiche: saldatori di componenti di polietilene e/o polipropilene, per il convogliamento di gas combustibili, di acqua e/o di altri fluidi in pressione, che utilizzano i procedimenti ad elementi termici per contatto e a elettrofusione - Istruzioni complementari per l'applicazione della UNI EN 13067

[11] UNI EN ISO 15494:2021. Sistemi di tubazioni di materia plastica per applicazioni industriali - Polibutene (PB), polietilene (PE), polietilene ad elevata resistenza alla temperatura (PE-RT), polietilene reticolato (PE-X), polipropilene (PP) - Serie metrica per specifiche per i componenti e il sistema

[12] UNI EN 1555-3:2025. Sistemi di tubazioni di materia plastica per la distribuzione di gas combustibili - Polietilene (PE) - Parte 3: Raccordi

[13] UNI EN 1555-4:2025. Sistemi di tubazioni di materia plastica per la distribuzione di gas combustibili - Polietilene (PE) - Parte 4: Valvole
[14] UNI EN 16296:2021. Imperfezioni nelle giunzioni saldate di materiale termoplastico - Livelli di qualità
[15] UNI EN ISO 4063:2023. Saldatura, brasatura e taglio - Nomenclatura dei processi e numeri di riferimento
[16] UNI EN 13100-1:2017. Prove non distruttive di giunti saldati di prodotti semifiniti di materiale termoplastico - Parte 1: Esame visivo.

Utilizzo e valutazione dello stato di integrità nel tempo di reattori smaltati

F. Taurasi[1], M. Di Pietro[2], G. Ianziti[3], A. Corsi[3]

[1]Inail - UOT di Campobasso
[2]F.I.S. – Fabbrica Italiana Sintetici S.p.A.
[3]Saipex S.r.l.

Sommario
Nell'industria chimica, le attrezzature a pressione con rivestimento vetrosmaltato sono ampiamente impiegate per l'elevata resistenza alla corrosione, sia nelle fasi di sintesi che nello stoccaggio e trasporto di fluidi. Tali attrezzature richiedono tuttavia particolari adempimenti per la valutazione dell'integrità e il monitoraggio dell'invecchiamento. Il presente contributo riassume le proprietà qualitative dei rivestimenti smaltati, propone i protocolli di controllo più efficaci e suggerisce le soluzioni di ripristino per la correzione delle difettosità.

1. Introduzione

Nell'industria chimica l'adozione di processi di sintesi sempre più aggressivi espone le attrezzature a severi fenomeni corrosivi, richiede l'utilizzo di attrezzature in grado di garantire un'alta resistenza ai suddetti meccanismi di danno. In questo scenario, l'utilizzo di recipienti con rivestimenti smaltati giocano un ruolo fondamentale: si tratta di materiali compositi ottenuti dalla fusione di un rivestimento vetroso o porcellanato su un substrato metallico. Lo smalto, una massa inorganica composta principalmente da ossidi, viene applicato tramite un processo di sinterizzazione a temperature comprese tra i 450°C e i 950°C, garantendo una protezione strutturale e funzionale d'eccellenza.

2. Realizzazione e macro caratteristiche qualitative degli smalti

Le proprietà chimico-fisiche dello smalto dipendono strettamente dalla sua composizione, la sua formulazione infatti, rimane un campo di ricerca in costante evoluzione. Chimicamente classificabili come boro-silicati alcalini, questi materiali sono ottenuti tramite la fusione delle materie prime seguita da un rapido raffreddamento che genera la tipica struttura amorfa dei vetri. L'adesione metallo-vetro è garantita da un primo strato (fondo), ottimizzato per sviluppare solidi legami chimico-fisici con la membratura in acciaio durante la cottura a circa 900°C. Il ciclo prosegue con l'applicazione di successivi strati di copertura (solitamente tre o quattro), che conferiscono al rivestimento le sue caratteristiche funzionali. La qualità del prodotto finito si misura principalmente attraverso la resistenza alla corrosione e agli shock termici, requisiti che verranno approfonditi nei paragrafi seguenti.

2.1 Resistenza alla corrosione degli smalti

Le proprietà degli smalti sono determinate dalla loro composizione chimica, i rivestimenti vetrificati offrono un'eccezionale inerzia verso la quasi totalità degli acidi organici e inorganici, siano essi ossidanti o riducenti. L'unica eccezione rilevante è l'acido fluoridrico il quale, anche se presente in tracce, aggredisce severamente la struttura silicea del vetro. La velocità di degradazione del rivestimento smaltato dipende dalla natura del reagente, dalla sua concentrazione e dalla temperatura. In linea generale, l'effetto della concentrazione varia fortemente con il tipo di sostanza corrosiva e dipende sensibilmente dalla temperatura. Alle basse temperature la sua influenza è meno sensibile che alle alte. Per valutare l'invecchiamento di uno smalto si possono utilizzare i seguenti valori di riferimento: il valore di 0,15 mm/anno corrisponde al limite massimo di solito suggerito per un servizio continuo. Il valore di 0.25 mm/anno corrisponde al limite massimo per un servizio saltuario mentre 0.5 mm/anno corrisponde al limite massimo ammissibile per lavorazioni particolarmente aggressive, da eseguirsi in via eccezionale.

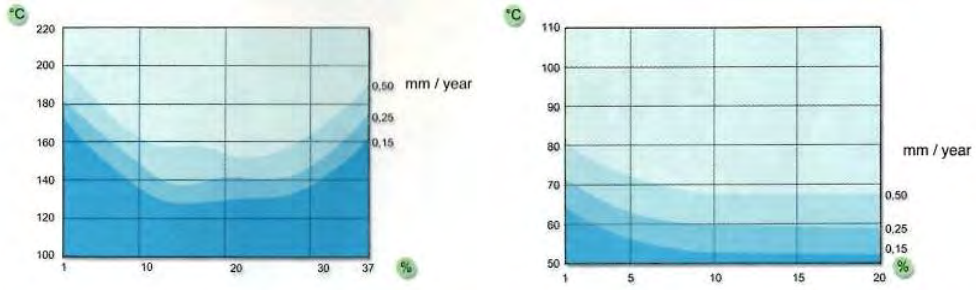


Figura 1. diagrammi andamento rateo di corrosione HCl e NaOH [2]

La temperatura gioca un ruolo cruciale in entrambi i casi: per le basi, in particolare, la velocità di corrosione tende a raddoppiare per ogni incremento di 10°C. Il grafico seguente illustra i limiti di impiego, di una specifica tipologia di smalto, in funzione del pH e della temperatura:

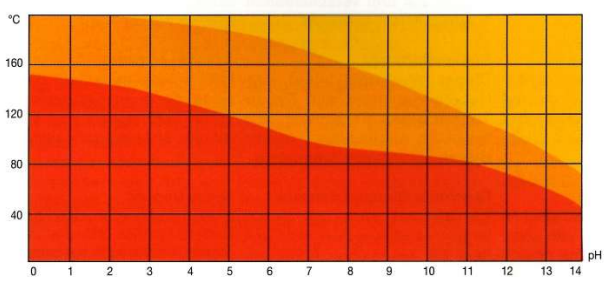


Figura 2. diagramma resistenza alla corrosione al variare della temperatura [1]

In rosso le zone con eccellente resistenza, in arancio le zone a resistenza variabile (in base al prodotto) ed in giallo le zone in cui l'utilizzo dello smalto è sconsigliato.

2.2 Resistenza degli smalti allo sbalzo termico

Nel processo di fabbricazione, lo smalto viene fuso sulla membratura dell'attrezzatura, creando così un'interfaccia definita sia meccanicamente che

chimicamente. A causa del differente coefficiente di espansione termica e delle diverse proprietà meccaniche dei due materiali, si generano tensioni interne strettamente dipendenti dalla temperatura. Se le attrezzature smaltate vengono esposte a escursioni termiche repentine e violente (shock termici), tali deformazioni possono compromettere l'integrità del rivestimento, innescando la formazione e la propagazione di cricche. Questo limite critico di resistenza è definito 'crack formation temperature'. Un diagramma molto utile a prevedere ed evitare tale meccanismo di danno è il cosiddetto diagramma di shock termico. Questo definisce i limiti termici a cui può essere sottoposta un'attrezzatura smaltata durante i processi di riscaldamento e/o raffreddamento al fine di non incorrere in rotture dello smalto. Il diagramma mette in relazione la temperatura della parete THC (y) e la temperatura del prodotto Tp (X).

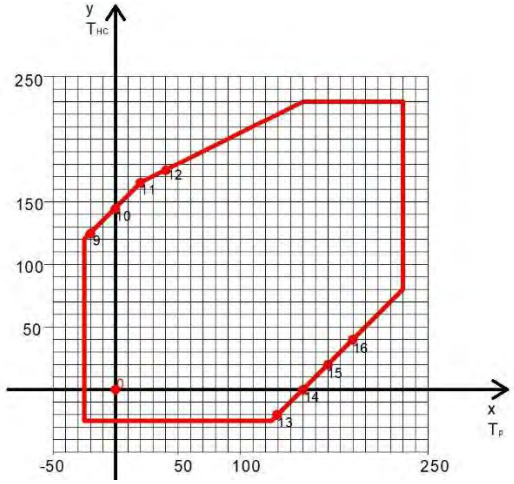


Figura 3. diagramma di shock termico per un'attrezzatura in acciaio smaltata riscaldata/raffreddata sul lato del metallo

Il diagramma, ad esempio, indica i seguenti limiti operativi:

Punto	Temperatura prodotto Tp	Massima temperatura di un fluido termovettore T_{HC}
	°C	°C
9	-20	125
10	0	145
15	160	20
16	180	40

Table 1. Introduzione di un fluido termovettore caldo in camicia con un prodotto freddo

Se le temperature di scambio superano i valori limite del diagramma, il processo deve essere necessariamente diviso in step.

3. Danneggiamento dello smalto, criteri di valutazione

La valutazione dell'integrità dello smalto passa necessariamente dall'analisi del suo spessore e dalla valutazione di eventuali discontinuità, rilevate durante il controllo. Per quanto riguarda lo spessore dello smalto, la norma di prodotto UNI EN ISO 28721-1 [6] afferma che deve essere compreso tra 1mm e 2,2mm con le seguenti eccezioni:

si può superare questo range di un valore pari a 0,2 mm sulle superfici concave oppure lo smalto può essere 0,2 mm più sottile del valore minimo in aree limitate e su superfici convesse. Un'altra eccezione è legata agli smalti su piccoli componenti e/o con raggi di curvatura molto piccoli, questi possono avere uno spessore minimo pari a 0,6 mm. La presenza di difetti sul rivestimento smaltato delle membrature è una situazione critica da valutare visto che potrebbe danneggiare in maniera rilevante l'attrezzatura anche nel breve periodo. Le ispezioni periodiche di legge e quelle previste dal fabbricante sono fondamentali, permettono di rilevare eventuali danni e procedere al ripristino delle condizioni iniziali dello smalto come riportato dal fabbricante sul manuale d'uso e dalle norme, tra cui dal DM 329/04 all'art. 14. Dall'analisi svolta, con riferimento alla norma UNI EN ISO 28721-1:2019 [6] i difetti dello smalto si distinguono in:

- Ripristinabili, secondo le indicazioni specifiche del fabbricante. Tra questi troviamo ad esempio quelli con profondità <25% dello spessore dello smalto, i cosiddetti "blisters", fori circolari sullo smalto che espongono la superficie metallica sottostante oppure aree sulle quali il test ad alto voltaggio ha rilevato archi elettrici.
- Tra i non ripristinabili abbiamo quelli che si estendono per un'area con diametro > 8mm, difetti riguardanti recipienti e colonne in numero superiore a quelli mostrati nella Tabella 2 e difetti rilevati con lo statiflux test.

4. Controlli non distruttivi per la valutazione dello stato di conservazione di uno smalto

Per le attrezzature in pressione appartenenti al gruppo GVR, la verifica di integrità consiste nell'accertamento dello stato di conservazione delle membrature in pressione. Tale controllo prevede sia un esame visivo delle parti interne ed esterne ispezionabili che rilievi spessimetrici. Come già anticipato, lo stato dello smalto risulta critico per l'integrità dell'attrezzatura. Eventuali difetti, infatti, esporrebbero il metallo sottostante al contatto diretto con i fluidi di processo, che se non compatibili con il metallo base, innescherebbero estremi fenomeni di corrosione localizzata, come ad esempio pitting o crateri di corrosione. Nel caso di recipienti smaltati, tra i controlli aggiuntivi in sede di verifica di integrità, ad integrazione dell'esame visivo interno, viene eseguito un test ad alto voltaggio e/o statiflux test per la verifica della continuità dello smalto in modo da escludere eventuali difetti.

4.1 Esame visivo interno

Per le verifiche periodiche, sia quelle previste dal fabbricante/utilizzatore che quelle a norma di legge (DM 329/04, allegato VII D.Lgs. 81/08), l'esame visivo delle membrature interne è parte fondamentale. Tra le principali specifiche a disposizione dei tecnici per l'esecuzione di un esame visivo troviamo sicuramente la linea guida redatta da INAIL "l'*esame visivo su attrezzature a pressione ai fini delle verifiche di costruzione e di esercizio*" [3]. Questa afferma che l'esame visivo deve effettuarsi anche sull'eventuale rivestimento che alcune attrezzature a pressione possono presentare

sulla superficie interna per protezione dal danneggiamento da corrosione e/o erosione. Da un'analisi dello storico manutentivo messo a disposizione dallo stabilimento, è emerso che tra i componenti maggiormente colpiti da fenomeni di attacco chimico troviamo quelli con un piccolo raggio di curvatura come ad esempio gli agitatori. Questi, infatti, sono maggiormente sollecitati durante il processo di miscelazione. Il fenomeno abrasivo generato in combinazione con l'impossibilità di avere spessori ottimali nel rivestimento smaltato, vista la complessa geometria, ne facilità l'usura e l'esposizione del metallo sottostante ai solventi potenzialmente corrosivi.

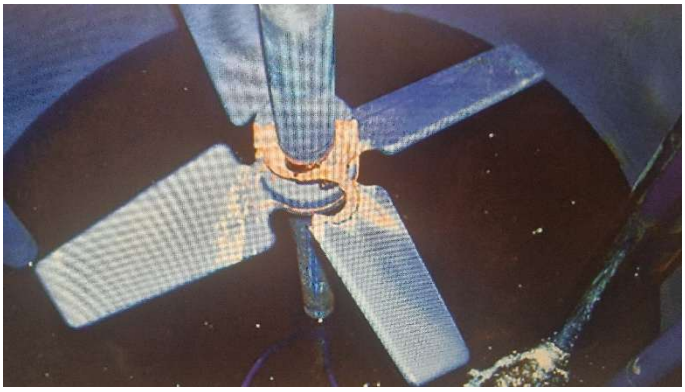


Figura 4. esempio di attacco corrosivo su di una girante interna ad un reattore [4]

4.2 Test alta tensione (high voltage test)

La prova ad alta tensione è un controllo di resistenza degli smalti porcellanati regolato dalla norma UNI EN ISO 2746 [7]. Il metodo A, da considerarsi come non distruttivo, si esegue utilizzando corrente continua o corrente continua pulsata. Un elettrodo ad alta tensione è fatto passare sulla superficie dello smalto. I difetti sono rilevati da una scintilla e simultaneamente da un segnale ottico e/o acustico. La tecnica ad alta tensione può pertanto non essere applicabile sulle zone di confine dove lo spessore dello smalto è basso. Per una corretta determinazione di questi difetti, la tensione di prova deve essere dipendente dallo spessore dello strato di smalto. Una tensione troppo bassa non permetterà di localizzare tutti i difetti. Una troppo alta darà luogo alla distruzione dei sottili strati residui di smalto (prova distruttiva).

4.3 StatiFlux test

Lo statiflux test è condotto se l'attrezzatura smaltata è stata sottoposta a shock termici o altre particolari condizioni di stress che potrebbero aver generato cricche nello strato di smalto che sono impossibili da rilevare attraverso un esame visivo o un test ad alto voltaggio. Di solito durante questo test, viene utilizzato una speciale polvere di talco caricata elettrostaticamente e che una volta spruzzata sulla superficie dello smalto evidenzia i difetti.

5. Riparazione e ripristino dello smalto, obblighi dell'utilizzatore

Dalla definizione di riparazione, indicata nel D.M. 329/04 all'Art. 14 e dai chiarimenti e le precisazioni indicati nella lettera circolare n. 14/05 dell'ISPESL possiamo estrarre le informazioni utili a chiarire quando le procedure di riparazione dello smalto devono essere necessariamente considerate come riparazioni, innescando quindi la procedura descritta nel decreto e nella circolare prima citati. Per rispondere a tale domanda occorre quindi distinguere i seguenti casi:

1. Danneggiamento dello smalto, i cui difetti rientrano tra quelli ripristinabili indicati nel manuale d'uso e manutenzione del fabbricante
2. Danneggiamenti dello smalto non ripristinabili in sede di esercizio dall'utilizzatore.

Nel primo scenario, come specificato dalla circolare, le riparazioni o modifiche non sostanziali già previste dal fabbricante nel manuale d'istruzioni (o in specifici accordi tecnici allegati alla Certificazione CE) sono classificate come manutenzione ordinaria. Pertanto, l'utente può eseguirle in autonomia, a patto di rispettare rigorosamente le procedure indicate dal fabbricante.

5.1 La riparazione dello smalto secondo art. 14 del D.M. 329/04

Il D.M. 329/04 ed in particolare all'art. 14 è possibile gestire il processo di rismaltatura tramite le procedure operative indicate nelle circolari di riferimento. La lettera circolare n. 14/05 pubblicata il 6 dicembre 2005 (10 mesi dopo l'entrata in vigore del Dm 329/2004) ed i suoi successivi aggiornamenti ed integrazioni forniscono le linee guida per la maggior parte dei casi operativi. quesiti pervenuti. Da queste infatti si evince che la riparazione è possibile solo se non vengono cambiate le caratteristiche originali, il tipo o il progetto di un'attrezzatura a pressione ed i dati di targa. La criticità della "rismaltatura" risiede nel processo di essiccazione che avviene in forni elettrici con cicli termici fino a +900°C. In tali condizioni, un'attrezzatura la cui temperatura di progetto sia inferiore a quella massima del ciclo termico, subisce uno stress termico prolungato che va monitorato e valutato poiché potrebbe modificare quella che è la resistenza meccanica delle membrature stesse. Quando l'acciaio viene riscaldato a temperature superiori a 900 °C, la dimensione dei grani aumenta significativamente, con conseguente riduzione del limite di snervamento e della durezza. È quindi indispensabile valutare se la struttura del grano cristallino del metallo non abbia subito alterazioni metallurgiche significative. Tra i principali effetti indesiderati troviamo l'accrescimento dei grani, il calo della tensione critica di propagazione di una cricca e l'abbassamento del limite di snervamento. Poiché il fabbricante originario ha progettato e costruito l'attrezzatura basandosi su coefficienti di sicurezza globali da lui determinati e rispettati, se l'utente (o il riparatore) dimostra che la modifica apportata non ha comportato il peggioramento del coefficiente di sicurezza globale ed originario della/e membratura/e sottoposte a trattamento termico, in tal caso avrà dimostrato che si è in presenza di una modifica non importante e perciò di una "riparazione".

5.2 Principali procedure di ripristino consigliate dai fabbricanti ed escluse dal concetto di "riparazione"

Come anticipato il concetto di "riparazione", definito dall'art. 14 del D.M. 329/04, non si applica alle operazioni di manutenzione (o modifiche non importanti) già previste dal fabbricante nel suo manuale di istruzioni operative (o in uno specifico documento tecnico tra fabbricante ed utente allegato ai documenti della Certificazione CE). In relazione ai materiali e al procedimento impiegato, i ripristini dello smalto si distinguono in: riparazioni con tappi metallici o smaltati, con piastre metalliche, con manicotti metallici ed infine otturazioni in oro.

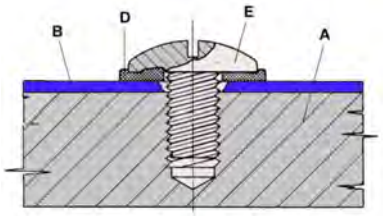


Figura 5. esempio di riparazione con tappo e guarnizione [5]

Al solo fine di avere un'idea sulla numerosità di riparazioni applicabili su di uno smalto possiamo fare riferimento alla norma ISO 28721-1. Secondo questa, il numero massimo di difetti riparabili con il metodo tappo-guarnizione è il seguente:

Volume nominale [m³]	**Numero massimo di difetti ammissibili**			
	Recipienti agitati			**Altri recipienti**
	Tipo AE		**Tipo BE e CE**	
	Parte bassa del recipiente	**Copertura principale**		
Fino a 4	0	0	0	0
Maggiore a 4 fino a 10	1	1	1	1
Maggiore a 10 fino a 20			2	3
Maggiore a 20 fino a 32			3	4
Maggiore a 32 fino a 40			4	5
Maggiore a 40 fino a 80				6
Maggiore di 80				7

Tabella 2. Numerosità massima difetti in sede di fabbricazione

6. Il caso reale del reattore smaltato

Andremo ad analizzare nel dettaglio 2 casi reali di rismaltatura. Riassumendo, i casi verteranno su:

- Reattore 1: su questo, oltre al processo di rismaltatura è stata eseguita la sostituzione di una membratura in pressione meccanicamente compromessa. Analizzeremo la procedura di riparazione secondo l'art. 14 del DM 329/04.
- Reattore 2: oltre alla rismaltatura è stata eseguita una modifica sostanziale si di un elemento che ha modificato la volumetria dell'attrezzatura. Analizzeremo la procedura di nuova certificazione PED.

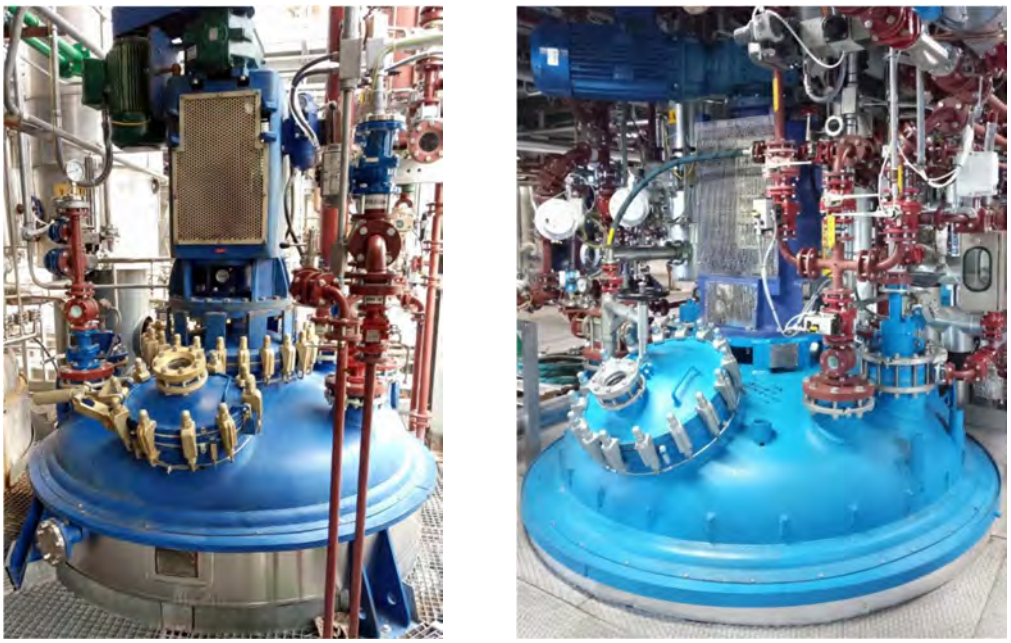


Figura 6. reattore 1 e 2

6.1 La riparazione del Reattore 1

L'attrezzatura in pressione che andremo ad analizzare nel dettaglio è un reattore vetrificato modello CE da 8000 Lt con PS -1/+6 bar e TS -10/+200°C. L'attrezzatura è stata correttamente esercita a partire dal 1988 in conformità ai requisiti imposti dal Titolo I del D.M. del 21maggio 1974, contenente le norme integrative del regolamento approvato con R.D. 824/27. Nel 2019 a seguito di un assottigliamento del rivestimento smaltato e della comparsa di fenomeni di corrosione generalizzati sulla camicia esterna di termoregolazione, è stata aperta una pratica di riparazione ai sensi dell'articolo 14 comma 2 lettere a) e b) del D.M 329/04. La pratica ha previsto l'utilizzo delle linee guida presenti in VSR ed in Raccolta M ed S essendo stata fabbricata antecedentemente la Direttiva P.E.D. La proposta di riparazione è stata richiesta dall'utilizzatore mentre il riparatore è stato identificato nel fabbricante della membratura e dello stesso reattore. A valle del benestare di detta proposta dall'UOT territoriale e successivamente all'esito positivo dei sopralluoghi e dei test in sede di riparazione la procedura di riparazione si è conclusa con esito positivo. In merito alla valutazione di integrità del rivestimento smaltato il fabbricante, in qualità di fabbricante e riparatore ha fornito, oltre alla documentazione e alle attività, previste all'art. 14 del D.M 329/04 le evidenze sull'integrità del nuovo smalto realizzato. L'esecuzione della vetrificazione in conformità alla UNI EN ISO 28721-1 che ha previsto l'applicazione dei seguenti controlli non distruttivi: misura dello spessore (conforme alla UNI EN ISO 2808) e controllo dielettrico (conforme alla UNI EN ISO 2746), entrambi svolti con esito positivo. Questa documentazione è stata messa a

disposizione dell'utilizzatore finale e resta fondamentale per il monitoraggio del suo invecchiamento.

6.2 La nuova certificazione del Reattore 2

L'attrezzatura in pressione che andremo ad analizzare nel dettaglio è un reattore vetrificato tipo BE da 14000 Lt con PS -1/+6 bar e TS -25/+200°C. L'attrezzatura è stata correttamente esercita a partire dal 2017 a valle dell'applicazione degli articoli 4 e 6 del DM 329/04. Nel 2023 durante una delle ispezioni interne, derivanti dalla prassi manutentiva a carico dell'utilizzatore, l'esecuzione dei test ad alto voltaggio sulla superficie dello smalto a protezione della membratura interna del corpo del reattore hanno portato ad una serie di segnalazioni. Sono stati riscontrati un numero consistente di punti di contatto sparsi su fasciame, stelo e pale agitatore, frangionda e pescante. Non sono state rilevate sfogliature dello smalto, corrosione del metallo sottostante o punti con metallo scoperto. In questi casi il processo di valutazione dell'integrità dello smalto richiederebbe un incremento dei controlli mirato a scovare gli eventuali difetti presenti, principalmente tramite statiflux test ed esame visivo approfondito. Considerando però, lo stato dei rilevamenti e lo storico manutentivo dell'attrezzatura l'utilizzatore ha deciso di procedere con una nuova smaltatura del reattore. Sulla superficie, infatti, erano presenti n°2 tappi in tantalio utilizzati per altrettante riparazioni dello strato, numerosità che come consiglia la norma UNI EN ISO 28721-1 e mostrato in Tabella *2*, raggiungono il valore limite. Si è scelto quindi di disinstallare l'attrezzatura e trasportarla presso l'officina del fabbricante per permetterne il ripristino. Quello che però ha innescato la necessità di una nuova certificazione è stata la necessità di andare a modificare un elemento strutturale dello stesso reattore, modifica mirata a facilitarne l'impiego che però ha incrementato il volume utile dell'attrezzatura. A seguito di questa modifica sostanziale, come indicato nella guida blu all'attuazione della normativa UE sui prodotti 2016 – Punto 2.1 [8]: devono essere considerati prodotti nuovi ai sensi della normativa di armonizzazione dell'Unione e devono pertanto essere sottoposti nuovamente alla valutazione della conformità. L'attrezzattura, una volta tornata presso lo stabilimento dell'utilizzatore, è stata reinstallata ed ha svolto un nuovo iter di messa in servizio secondo gli obblighi previsti dal DM 329/04.

7. Conclusioni

Il presente articolo illustra le proprietà distintive dei rivestimenti smaltati, tecnologia essenziale per l'impiego di apparecchiature a pressione in ambienti altamente corrosivi. Partendo dalle condizioni operative, sono state fornite le linee guida per la selezione del rivestimento ottimale, definendo i parametri chiave per valutarne l'invecchiamento, con particolare attenzione allo shock termico e ai tassi di corrosione. L'analisi prosegue con l'indicazione dei controlli necessari per il monitoraggio dell'integrità, concludendosi con due casi studio che evidenziano l'importanza della sinergia tra conformità legislativa e corretta prassi manutentiva.

Per concludere, la valutazione di integrità delle attrezzature smaltate non può limitarsi ai soli requisiti del DM 11/04/2011, ma richiede analisi supplementari specifiche per la natura dei materiali coinvolti. I CND (controlli non distruttivi) e le valutazioni eseguite nel processo di fabbricazione dello smalto possono supportare i tecnici nella valutazione di integrità. Per garantire la sicurezza operativa, è dunque fondamentale:

- Monitorare l'invecchiamento delle membrature in pressione tramite il rilievo degli spessori e la stima dei ratei di corrosione.
- Eseguire CND specifici mirati alla rilevazione delle defettologie del rivestimento, come l'esame visivo, i test ad alta tensione e lo Statiflux test.
- Gestire i ripristini secondo le indicazioni del fabbricante e nei limiti consigliati della norma di riferimento.
- Attuare le procedure di riparazione con INAIL ogni qual volta è necessario rismaltare e per tutti gli altri casi indicati nelle norme e circolari di riferimento prima citate.

8. Bibliografia e sitografia

[1] Autore: Tycon Technoglass, Titolo del catalogo: *Emaillierungstechnik – Gli smalti e le tecnologie di smaltatura Tycon,* pag. 18.
[2] Autore: Tycon Technoglass, Titolo del catalogo: *Emaillierungstechnik – Gli smalti e le tecnologie di smaltatura Tycon,* pag. 22.
[3] Autori: Carlo De Pretis, Canio Mennuti, Corrado Delle Site, Titolo della linea guida: *L'esame visivo su attrezzature a pressione ai fini delle verifiche di costruzione e di esercizio.*
[4] Autore: GMM PFAUDLER, Titolo del catalogo: *Glass – Lined Instrumentation for Highest Standards,* pag. 30.
[5] Autore: GMM PFAUDLER, Titolo del manuale: *Manuale di uso e manutenzione Apparecchiature smaltate – Riparazioni del rivestimento smaltato OM-AP-05-I-03,* pag. 09.
[6] UNI EN ISO 28721 Vitreous and porcelain enamels - Glass-lined apparatus for process plants
[7] UNI EN ISO 2746:2015 Vitreous and porcelain enamels - High voltage test
[8] The 'Blue Guide' on the implementation of EU products rules 2016

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

L. Comel[1]

[1]G.M.A. srl

Sommario
L'articolo illustra un approccio di manutenzione integrata per gli scambiatori di calore a fascio tubiero, componenti critici nei sistemi di refrigerazione industriali, civili e navali. Il corretto funzionamento di questi apparati è spesso minacciato da fenomeni quali la corrosione galvanica, l'erosione da sovravelocità e il fouling (sporcamento), che compromettono l'efficienza termica e possono causare guasti sistemici.
La metodologia proposta si basa su tre pilastri fondamentali:
Pulizia avanzata: sistemi ottimizzati per la rimozione di depositi e sedimenti.
Diagnosi non distruttiva (CND): utilizzo di tecniche come la Riflessometria ad Impulsi Acustici (APR) e la videoendoscopia per identificare fori e ostruzioni.
Protezione con rivestimenti: applicazione di resine epossidiche su piastre e interno tubi per garantire resistenza elettrochimica e meccanica.
I risultati del progetto di ricerca CLEAN dimostrano che tali rivestimenti riducono la rugosità superficiale e la bagnabilità, trasformando il calcare da aragonite cristallina in una forma amorfa meno aderente. L'efficacia è confermata da vari casi studio: in ambito navale, l'intervento ha portato a un incremento dell'efficienza di scambio termico del 20%, mentre in impianti chimici e nucleari ha bloccato fenomeni corrosivi persistenti. In conclusione, questo approccio non solo estende la vita utile degli scambiatori, ma garantisce un significativo risparmio energetico e manutentivo.

1. Introduzione

Gli scambiatori di calore a fascio tubiero, come condensatori ed evaporatori, sono componenti essenziali nelle unità di refrigerazione (chiller) utilizzate in ambito industriale, civile e navale. Il loro corretto funzionamento determina l'affidabilità dell'intero ciclo produttivo o di condizionamento.
Attraverso l'esperienza maturata con i prodotti anticorrosivi Phencote, è stato sviluppato un approccio integrato alla manutenzione che comprende:

- Sistemi ottimizzati per la pulizia dei tubi.
- Diagnosi avanzata mediante controlli non distruttivi (CND).
- Sistemi di protezione per piastre tubiere e superfici interne dei tubi (full-length lining).

L'obiettivo è risolvere problematiche comuni quali la corrosione galvanica all'interfaccia tubo/piastra, l'erosione da sovravelocità e il fouling (sporcamento), garantendo un'efficienza di scambio termico superiore nel lungo periodo.

1.1 Problematiche riscontrate in esercizio

Gli scambiatori sono spesso esposti lato acqua a fluidi aggressivi contenenti cloruri, solfuri, sabbia o fango. Lo sporcamento aumenta la resistenza termica, riducendo il rendimento e innescando processi corrosivi "sotto deposito". Le conseguenze di un guasto possono essere gravi:

- Settore Power/Oil&Gas: La foratura di un tubo in un condensatore a servizio di una turbina può causare fermate non pianificate dell'impianto e contaminazione del fluido lato processo.
- Sistemi HVAC: Una foratura microscopica causa la perdita di gas refrigerante, mettendo fuori servizio l'intero impianto.

Le ispezioni rivelano spesso:

- Erosione legata a sovravelocità e particolato in sospensione.
- Corrosione galvanica causata dall'interazione tra materiali con diverso potenziale elettronegativo (es. tubi in rame e piastre in acciaio al carbonio).
- Danni meccanici agli imbocchi o alle superfici di tenuta delle piastre durante precedenti manutenzioni.

Nelle seguenti immagini vengono presentati alcuni casi a nostro avviso significativi osservati negli anni.



Figura 1. Fenomeni erosivi legati a sovravelocità in combinazione con particolato in sospensione in tubi in Al-brass



Figura 2. Foratura per sovravelocità in tubi in rame di condensatore di gruppo frigorifero. Si noti come la presenza del frammento di materiale plastico (proveniente da torre evaporativa) bloccato nella spirale del tubo è stato la causa della problematica

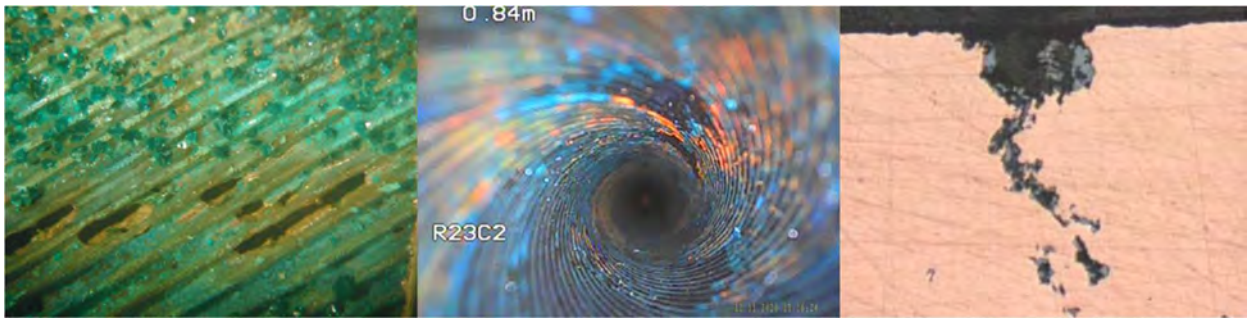


Figura 3. Corrosione localizzata (ant-nest) in tubi in rame di gruppo frigorifero. Fenomeno di difficile diagnosi anche con strumentazione avanzata per CND

3. Metodi e Tecnologie

3.1 Tecnologie di Rivestimento

La protezione dei fasci tubieri prevede l'impiego resine epossidiche o epossifenoliche applicate su piastre tubiere, interno tubi e casse d'acqua. Queste soluzioni resistono fino a 180°C e ad agenti chimici aggressivi. Una tecnologia distintiva è la macchina semi-automatica per la verniciatura interna dei tubi (piena lunghezza), dotata di sonde mobili e ugelli radiali che garantiscono uno spessore uniforme di circa 50 micron a passata su diametri interni a partire da 12 mm.

3.2 Diagnosi e CND

L'approccio integrato prevede l'uso di tecniche diagnostiche quali:
Riflessometria ad Impulsi Acustici (APR): Consente di rilevare fori, ostruzioni, erosioni e vaiolature analizzando gli echi riflessi di un segnale sonoro.
Vacuum Leak Detection (VLD): Verifica la tenuta ermetica dei singoli tubi creando una depressione pneumatica; una caduta rapida della pressione indica la presenza di fori o crepe.
Videoendoscopia digitale: Fornisce una conferma visiva dello stato di sporcamento e dell'integrità delle superfici, integrando i risultati dell'analisi APR

3.3 Studi di Efficacia e Progetto CLEAN

Il progetto di ricerca CLEAN (Coating Life Extension for ANticorrosive applications) approfondisce le proprietà antifouling e di scambio termico. I test dimostrano che il rivestimento riduce drasticamente la rugosità superficiale e la bagnabilità rispetto al metallo nudo (inox, Cupronichel e Al-brass), limitando l'adesione di depositi biologici e carbonatici.
Lo studio ha previsto la realizzazione di un simulacro di scambiatore di calore, con flusso di acqua mare a velocità controllata di 1,6 m/s e riscaldata a 50°C, con monitoraggio in continuo delle condizioni di processo.
La sperimentazione ha avuto una durata di 6 mesi, al termine della quale si evidenzia nei tubi rivestiti la formazione di carbonato di calcio amorfo, con spessore di circa 2 micron, mentre nei tubi non rivestiti dei vari materiali si osserva la crescita di aragonite cristallina, con spessore di diverse decine di micron.



Figura 4. Setup di prova per la simulazione del flusso di acqua mare a confronto in tubi rivestiti e non

4. Risultati dei Test di Laboratorio

I risultati dello studio CLEAN dimostrano l'efficacia dei rivestimenti polimerici nel limitare la deposizione del calcare nei tubi degli scambiatori di calore. Le misurazioni della rugosità superficiale hanno mostrato una riduzione significativa nei tubi rivestiti. Una superficie meno ruvida riduce le aree di adesione per i depositi calcarei, diminuendo così il rischio di formazione di incrostazioni. L'analisi della bagnabilità ha evidenziato che i tubi rivestiti presentano angoli di contatto più elevati, indicando una superficie più idrofoba. Questa proprietà contribuisce a ridurre l'adesione dell'acqua e, di conseguenza, la deposizione dei sali e calcare. L'analisi spettrofotometrica UV-VIS ha rilevato una crescita batterica significativamente inferiore sui tubi rivestiti rispetto ai tubi non rivestiti. Le immagini SEM hanno mostrato che, dopo sei mesi, i tubi rivestiti contengono principalmente carbonato di calcio amorfo , mentre i tubi non rivestiti già dopo un mese presentano la formazione di aragonite. Questo suggerisce che il rivestimento non solo ritarda la deposizione calcarea ma ne modifica anche la struttura, mantenendo il carbonato di calcio in una forma amorfa non stabile.

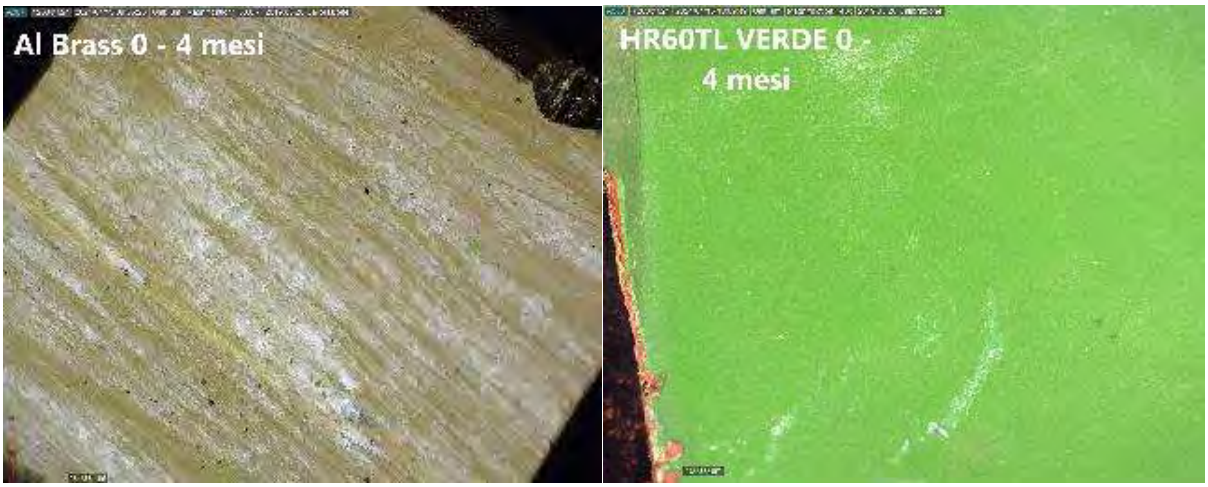


Figura 5. Confronto tra tubo non rivestito in bronzo all'alluminio e campione rivestito a 4 mesi, al microscopio ottico

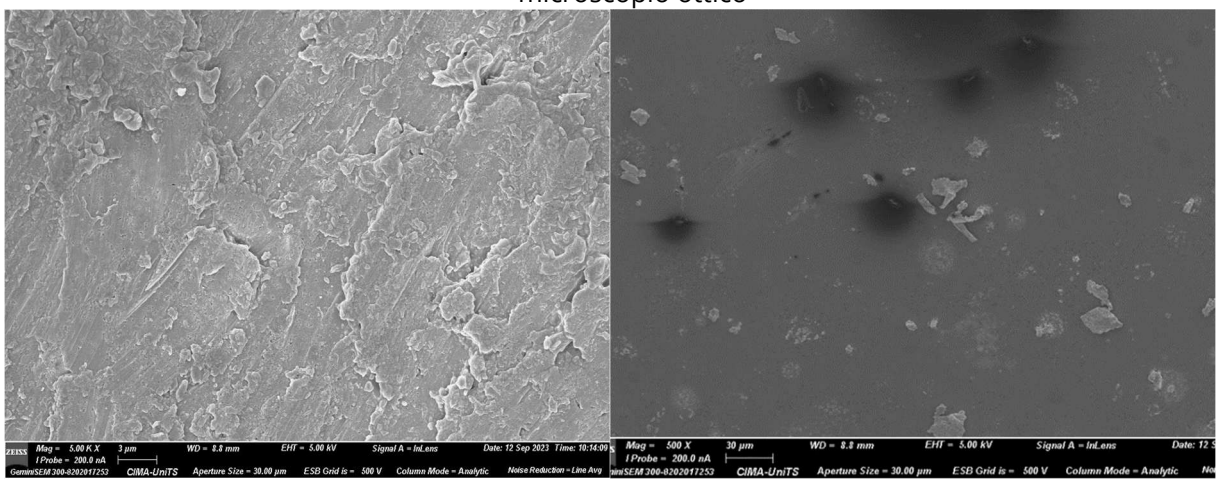


Figura 6. Confronto al microscopio a scansione elettronica tra campione non rivestito in Cu-Ni e tubo con rivestimento epossidico

Tali evidenze mostrano quindi che l'applicazione del rivestimento possa rallentare in maniera significativa l'adesione di depositi organici ed organici nei tubi, contribuendo a mantenere costante lo scambio termico nel tempo. Precedenti studi svolti hanno mostrato come lo scambio termico di fasci tubieri rivestiti appaia migliore rispetto a quelli non rivestiti già dopo pochi mesi dalla messa in servizio, nonostante l'effetto potenzialmente isolante del pur sottile strato di coating applicato. In alcune applicazioni su scambiatori già eserciti (vedi successivo caso di studio 2), si è osservato un miglioramento significativo della resa subito dopo l'applicazione: tale risultato si può spiegare con l'effetto combinato, a livello di asportazione di sedimenti, del lavaggio idrodinamico e preparazione superficiale, unitamente all'ottimizzazione del profilo di ingresso dei tubi mediante applicazione del rivestimento.

5. Case study

5.1 Caso 1: Manutenzione integrata in uno stabilimento chimico (Italia)

Contesto: Intervento su un gruppo centrifugo (condensatore ed evaporatore) presso la centrale utilities di un'industria chimica. Problematiche: L'ispezione visiva ha mostrato severi fenomeni di corrosione galvanica sulle piastre tubiere e corrosione generalizzata nelle calotte. L'endoscopia ha rivelato un moderato fouling dovuto a ossidi e carbonati. Sono state svolte le seguenti attività:

1. Lavaggio idrodinamico a 300 bar con ugelli rotanti e corpi pulenti in materiale plastico.
2. Controlli CND con tecnica APR e videoendoscopia.
3. Trattamento anticorrosivo: Preparazione superficiale mediante granigliatura. Applicazione di rivestimento in alto spessore (Phencote 2000 T.S. e HR60).

Risultati: Il lavaggio ha rimosso efficacemente i sedimenti; il rivestimento ha riportato le superfici in acciaio al carbonio in condizioni ottimali, risolvendo le criticità legate alla corrosione.



Figura 7. Aspetto piastra tubiera prima e dopo l'intervento di anticorrosione

5.2 Caso 2: Manutenzione integrata su evaporatori (Settore Navale)

Contesto: Pulizia , CND e rivestimento lato tubi di 6 evaporatori a bordo di una nave passeggeri (totale 8000 tubi)

Problematiche: Molti tubi presentavano deformazioni e piegature agli ingressi causate da impatti meccanici durante manutenzioni passate. Erano presenti anche danni alle superfici di tenuta delle piastre e forature diffuse all'interno dei tubi.

Attività svolte:

1. Lavaggio idrodinamico a 300 bar e idromeccanico con corpi pulenti.
2. Test combinati APR e VLD sul 100% dei tubi per identificare perdite microscopiche.

Risultati: L'ispezione ha permesso di mappare con precisione i tubi da escludere.

3. Sabbiatura delle piastre tubiere e delle superfici interne dei tubi e trattamento anticorrosivo in alto spessore delle piastre e su piena lunghezza con resina HR60TL delle superfici interne dei tubi con funzione anticorrosiva ed antifouling

Risultati: il trattamento ha riportato i fasci tubieri a ottimali condizioni di funzionamento, bloccando i fenomeni corrosivi in atto e ripristinando la tenuta delle mandrinature; il cliente dopo il trattamento ha dichiarato un incremento nell'efficienza dello scambio termico del 20%.

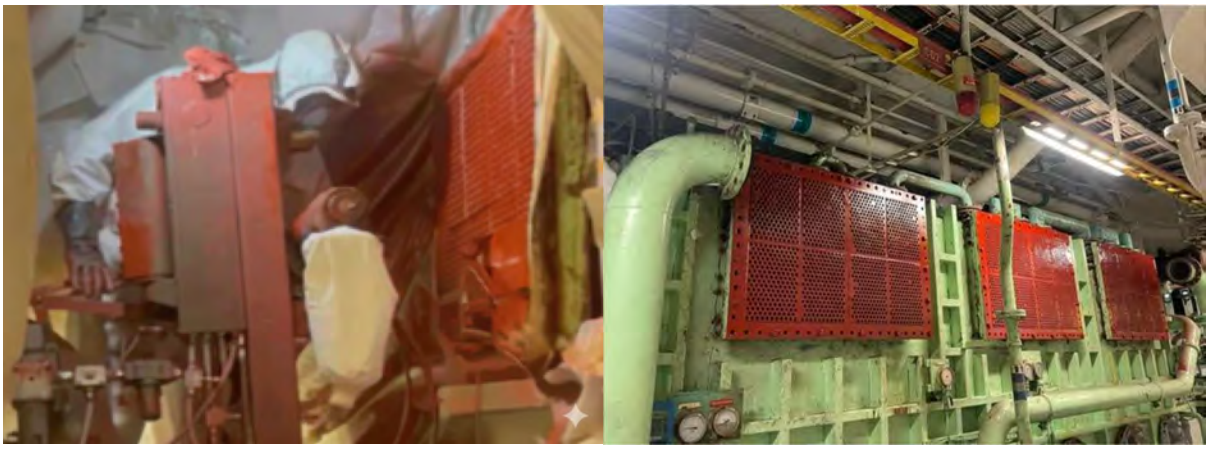


Figura 8. Fasi di applicazione del rivestimento ed aspetto finale piastre tubiere di una bancata

5.3 Caso 3: Protezione Anticorrosiva ed antifouling su 9 condensatori di gruppi frigo. Stabilimento nucleare

Contesto: Rivestimento di 9 condensatori di gruppi frigo.
Problematiche: fenomeni diffusi di corrosione dei tubi in rame
Attività svolte:
1. Lavaggio con corpi pulenti in materiale plastico dei fasci tubieri
2. Sabbiatura delle superfici di piastre tubiere ed interno tubi
3. Applicazione del rivestimento interno dei tubi a 80 micron

Risultati: il trattamento ha efficacemente bloccato i fenomeni corrosivi in atto; il cliente ha dichiarato una maggiore efficienza nel tempo, con netta riduzione dei trattamenti di pulizia necessari.

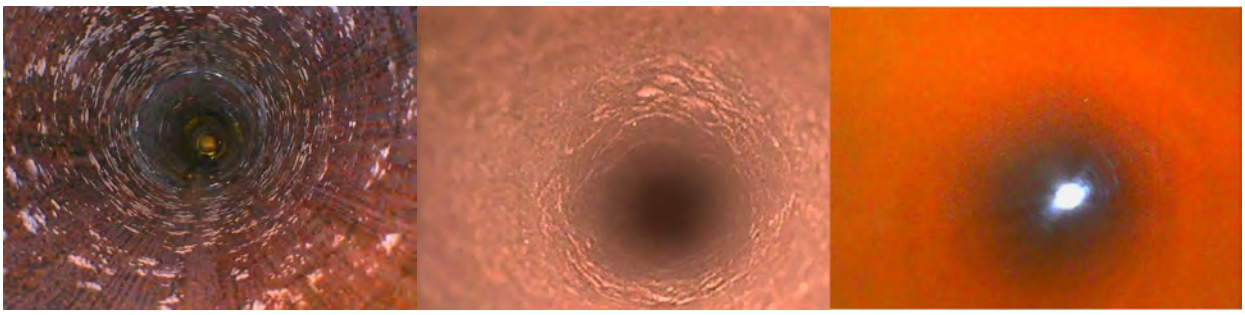


Figura 9. Endoscopie relative allo stato prelavori dell'interno tubi, alla successiva sabbiatura ed all'aspetto finale con il rivestimento applicato

6. Conclusioni

L'impiego dei sistemi di rivestimento epossidici ed epossifenolici rappresenta una soluzione consolidata per incrementare la vita utile degli scambiatori anche

nell'ambito di impianti di condizionamento. L'approccio integrato (pulizia, CND e coating) permette di:

1. Ottimizzare la metallurgia, consentendo l'uso di materiali meno nobili protetti dal rivestimento.
2. Ridurre gli interventi manutentivi grazie alle proprietà antifouling.
3. Garantire l'efficienza energetica mantenendo pulite le superfici di scambio termico.

L'esperienza sul campo, dai siti industriali alle applicazioni civili e navali, conferma che una corretta manutenzione preventiva è il pilastro per l'Asset Integrity dei sistemi di refrigerazione complessi.

Bibliografia

[1] R. Grassetti, S. Doria. Atti della Conferenza su "Protection of heat exchangers by means of coating their internal surface". *CORROSION ITALIA 2003*, Taormina, Italia

[2] R. Grassetti, S. Doria. Ottenere l'efficienza dello scambio termico degli scambiatori a fascio tubiero", *Manutenzione, Tecnica e Management*, 6/2000, 51-54

[3] L. Comel, R. Grassetti. Atti della Conferenza su "Protezione e ripristino anticorrosivo di scambiatori di calore e condensatori in centrali elettriche, raffinerie ed impianti petrolchimici" *SAFAP*. Milano, 16/11/2016

[4] L. Comel. Atti della conferenza su "Corrosion in refinery and petrochemistry" *EFC WP15 spring meeting*. Lille, 30/03/2023

[5] L. Comel. Atti della conferenza su « revêtements (coating) utilisés pour protéger les échangeurs contre la corrosion » *CEFRACOR* Parigi 21.10.2021

[6] V. Lughi. Studio di rivestimenti protettivi per scambiatori di calore - Report finale *Dipartimento di Ingegneria e architettura – Università degli studi di Trieste* 17/06/2024

[7] L. Comel, R. Grassetti. Atti della Conferenza su "Il sistema di rivestimento Phencote per l'ottimizzazione della durabilità e dell'efficientamento energetico di scambiatori di calore" *SAFAP*. Brescia, 23/11/2023

[8] L. Comel. Atti della Conferenza su "Coating systems to optimize durability and energy efficiency of heat exchangers" *3rd Conference & Expo AMPP Italy.* Genova 10/06/2024

[9] L. Comel. Phencote coating system to optimize durability and energy efficiency of heat exchangers *EFC WP15 "Corrosion in refinery and petrochemistry" spring meeting.* Parigi 11/04/2024

[10] L. Comel. Phencote coating system to optimize durability and energy efficiency of heat exchangers *Heat Exchanger World Conference & Expo* Rotterdam 13/11/2024

Verifica di visita interna di un generatore di acqua surriscaldata a tubi d'acqua al servizio della Centrale Nord A2A di Brescia

F. Rossetti[1], N. Palumbo[1], A. Serra[2], Paolo Tria[3]

[1]Inail – UOT di Brescia
[2]ATS Brescia
[3]A2A Calore & Servizi Srl

Sommario
Questo lavoro è dedicato agli addetti alle verifiche periodiche di attrezzature e insiemi a pressione. Nello specifico si descrivono le attività riguardanti la verifica di visita interna di un generatore di acqua surriscaldata della A2A Calore & Servizi srl al servizio dell'impianto di teleriscaldamento della città di Brescia e dell'ASST Spedali Civili di Brescia. Lo studio parte dalla preparazione del generatore per renderlo idoneo alla verifica e evidenzia tutte le attività da porre in essere per la sicurezza degli operatori ed una corretta esecuzione delle verifiche.

1. Introduzione

I generatori d'acqua surriscaldata a tubi d'acqua di grandi dimensioni sono attrezzature/insiemi a pressione che trovano grande utilizzo nelle reti del teleriscaldamento. In particolare l'impianto di teleriscaldamento della città di Brescia è stato un dei primi ad essere stato avviato in Italia (1972) e garantisce l'alimentazione di oltre il 70% degli edifici cittadini. Il sistema di produzione semplice di calore al teleriscaldamento è costituito da 3 unità a gas naturale aventi ciascuna una potenza nominale di 85 MWt. Al fine di approfondire gli aspetti legati alle verifiche periodiche, si descrivono nel dettaglio le attività svolte per l'esecuzione della verifica di vista interna di uno di questi generatori. Il generatore di acqua surriscaldata a tubi d'acqua oggetto di studio è del 2007 e ha una potenzialità di 35.000 kW una PS = 25 bar, funzionante a gas naturale e avente un volume di 19400 litri. Il generatore è accessibile tramite due aperture che permettono rispettivamente l'accesso alla camera di combustione (*zona irraggiamento*) compresa la zona di preriscaldo dell'aria comburente e alla *zona convezione*. (Fig. 1 e 2)

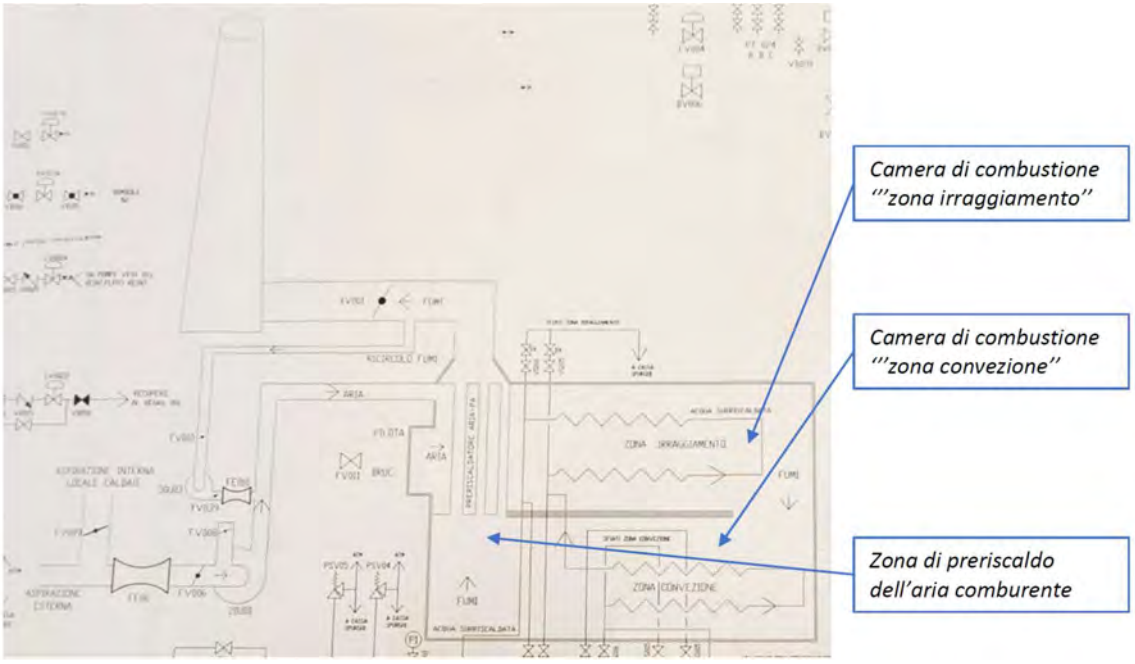


Figura 1. Schema del generatore d’acqua surriscaldata



Figura 2. Accesso anteriore alla camera di combustione e accesso laterale alla zona convezione

3. Descrizione delle misure di sicurezza prima dell’accesso al generatore

L’accesso all’interno del generatore è un’attività in ambiente confinato. Pertanto, prima di effettuare un’ispezione interna (circa 30 minuti), è necessario adottare una serie di misure di sicurezza rigorose, in conformità al D.Lgs. 81/08 (Testo Unico Sicurezza) e al DPR 177/2011. Di seguito viene fornita una guida pratica, in ordine cronologico, con tutte le azioni di sicurezza da intraprendere prima dell’ingresso.

3.1 Pianificazione e valutazione dei rischi

Prima di procedere, il datore di lavoro è tenuto a svolgere un’analisi mirata dei pericoli connessi all’accesso nel generatore, considerandolo a tutti gli effetti uno spazio confinato. Tale attività comprende l’esame di ogni possibile fonte di rischio: ad esempio, la presenza di un’atmosfera non respirabile o nociva (deficit di ossigeno, emissioni di gas pericolosi o vapori infiammabili), temperature interne

ancora elevate, possibilità di soffocamento o avvelenamento, rischio di incendio o esplosione (in particolare se l'impianto ha utilizzato combustibili infiammabili), oltre a minacce di natura meccanica (organi in movimento) ed elettrica. In questo momento devono essere anche definite le misure di prevenzione e protezione necessarie per eliminare o ridurre al minimo i pericoli identificati. La valutazione deve essere riportata nel DVR e rispettare le prescrizioni normative vigenti. È inoltre indispensabile accertarsi che gli operatori incaricati di accompagnare i verificatori all'interno del generatore siano opportunamente qualificati e addestrati a lavorare in spazi confinati (come previsto dal DPR 177/2011) e che possiedano l'idoneità sanitaria richiesta. Infine, la programmazione delle attività deve includere una procedura operativa chiara e un piano di emergenza specifico per l'intervento, da illustrare preventivamente a tutti i lavoratori coinvolti prima dell'ingresso.

3.2 Isolamento energetico e meccanico dell'impianto

Prima di procedere all'apertura e all'ingresso nel generatore, è indispensabile mettere in condizioni di sicurezza l'impianto, isolandolo da qualsiasi fonte di energia o sostanza potenzialmente pericolosa. Ciò si attua attraverso le procedure di lock-out/tag-out (fig. 3), che consistono nel chiudere e bloccare con dispositivi di sicurezza (lucchetti, sigilli, cartellini) tutte le valvole, tubazioni e condotte in grado di introdurre vapore, fluidi surriscaldati, combustibili (come gas) o altri prodotti rischiosi all'interno della caldaia. Parimenti, devono essere disattivate e separate tutte le alimentazioni elettriche, scollegando e bloccando i circuiti che alimentano motori, resistenze, sensori e altri componenti. Anche gli organi meccanici mobili collegati all'impianto (ad esempio pompe e ventilatori) devono essere messi fuori servizio, per escludere qualunque avviamento accidentale. Ogni punto di isolamento deve essere chiaramente identificato con segnaletica di divieto di manovra, e la rimozione dei dispositivi di blocco potrà essere eseguita esclusivamente dal responsabile designato.

Un'ulteriore azione essenziale è la depressurizzazione ed eventualmente ma non obbligatoriamente lo svuotamento del generatore, verificando che pressione e temperatura interne siano riportate a valori di sicurezza (ambiente freddo e non in pressione) prima dell'apertura. Contestualmente è necessario delimitare l'area di lavoro intorno alla caldaia, apponendo avvisi ben visibili che segnalino la presenza di "Spazio confinato" e impedendo l'accesso a persone non autorizzate. Occorre inoltre predisporre un'area libera e adeguata per consentire, se necessario, l'intervento tempestivo dei soccorsi esterni (ad esempio Vigili del Fuoco e personale sanitario del 118). Infine, va verificata l'idoneità dell'apertura di accesso (passo d'uomo): questa deve essere sufficientemente ampia da permettere un ingresso agevole e, soprattutto, il recupero in sicurezza di un operatore eventualmente colto da malore. La normativa stabilisce infatti che il varco debba garantire la possibilità di estrazione rapida di un infortunato. (Fig. 4).

	
Figura 3. Procedure di lock-out/tag-out sulla tubazione di adduzione del gas metano al generatore	Figura 4. Veduta dall'interno dell'ingresso e del bruciatore e del refrattario presente

3.3 Bonifica e verifica dell'atmosfera interna

Prima dell'autorizzazione all'accesso, è indispensabile verificare che l'atmosfera interna del generatore non presenti condizioni di pericolo. Dopo l'apertura dei portelli, occorre procedere a una ventilazione o bonifica iniziale dello spazio confinato: l'interno deve essere arieggiato in modo forzato (ad esempio tramite ventilatori antiscintilla) al fine di eliminare eventuali gas stagnanti, vapori nocivi o deficit di ossigeno, riportando così la qualità dell'aria entro parametri sicuri. Nel caso siano presenti residui dannosi (come fuliggine, depositi o incrostazioni con sostanze chimiche), si dovrà eseguire un'adeguata operazione di pulizia o neutralizzazione, ad esempio con un lavaggio a nebulizzazione d'acqua per contaminanti idrosolubili. Completata la bonifica, l'atmosfera interna deve essere controllata strumentalmente prima di consentire l'ingresso: un tecnico qualificato deve misurare il contenuto di ossigeno e rilevare l'eventuale presenza di gas/vapori tossici o infiammabili mediante un rilevatore multigas certificato e correttamente tarato. Le rilevazioni devono essere effettuate in più punti (sia in alto che in basso e in varie zone della caldaia), tenendo presente che i gas pesanti tendono ad accumularsi sul fondo mentre quelli leggeri si concentrano nella parte superiore. I valori devono rispettare i seguenti limiti di sicurezza:

- concentrazione di ossigeno compresa tra 19,5% e 23% in volume (al di sotto del 19,5% sussiste rischio di ipossia, oltre il 23% cresce il pericolo di incendio o esplosione);
- assenza di gas infiammabili oltre il 10% del loro LEL (Limite Inferiore di Esplosività);

- eventuali contaminanti tossici (come monossido di carbonio, acido solfidrico, ecc.) al di sotto dei valori limite di esposizione.

Se le misurazioni evidenziano incertezze o valori anomali, sarà necessario proseguire con ulteriori cicli di ventilazione o interventi di bonifica fino al completo ripristino di condizioni sicure. È tassativamente vietato permettere l'ingresso dei lavoratori e dei verificatori se non si è prima accertata la piena salubrità dell'aria o effettuata una bonifica efficace dell'ambiente interno.

3.4 Permesso di lavoro (autorizzazione all'ingresso)

È necessario predisporre ed utilizzare un permesso di lavoro dedicato per l'accesso in ambienti confinati, conforme alle procedure interne aziendali e alle prescrizioni normative. Tale permesso rappresenta un documento ufficiale di autorizzazione all'ingresso, che deve essere compilato solo dopo l'attuazione di tutte le misure preventive e di protezione preliminari e prima che gli operatori accedano all'interno. Il modulo deve contenere in modo dettagliato:

- la descrizione dell'attività da svolgere e la sua durata stimata;
- l'esatta identificazione del luogo di intervento (ad esempio generatore d'acqua surriscaldata con numero di matricola e posizione);
- i nominativi e le qualifiche del personale incaricato (compreso il preposto addetto alla vigilanza esterna);
- la data e gli orari di validità del permesso;
- i pericoli individuati e le relative misure di prevenzione adottate (come la conferma dell'avvenuto isolamento dell'impianto, l'avvenuta ventilazione e i risultati delle analisi atmosferiche);
- i dispositivi di protezione individuale obbligatori;
- le procedure di emergenza da seguire e i recapiti per l'allertamento dei soccorsi.

Nel documento deve inoltre risultare che sia stato eseguito un briefing informativo con i lavoratori, riguardante i rischi specifici e le modalità di intervento in caso di emergenza. Il permesso deve essere firmato dal responsabile autorizzato (datore di lavoro o dirigente/preposto con delega) e dal preposto alla sorveglianza, e deve essere conservato o esposto nell'area di lavoro. Solo dopo la sottoscrizione del permesso è consentito avviare le operazioni di ingresso. Questo strumento ha la funzione di attestare che tutti i controlli obbligatori sono stati effettuati e costituisce un mezzo di comunicazione chiaro tra datore di lavoro, supervisori e operatori in merito alle condizioni di sicurezza da rispettare.

3.5 Sorveglianza esterna e comunicazioni

È necessario garantire una sorveglianza esterna continua per tutta la durata delle attività. Deve essere nominato almeno un addetto alla sicurezza esterno (figura di presidio) che resti posizionato all'esterno del generatore, con l'esclusivo incarico di controllare le condizioni degli operatori all'interno e di attivare immediatamente i

soccorsi in caso di emergenza. Tale persona, generalmente un preposto, non deve avere incarichi aggiuntivi e non può abbandonare la propria postazione finché all'interno dello spazio confinato vi sono persone impegnate. Prima dell'accesso, è inoltre fondamentale predisporre e verificare l'efficacia dei sistemi di comunicazione tra l'interno e l'esterno: questi possono consistere in radiotrasmittenti, telefoni dedicati, collegamenti via cavo o, se necessario, segnali convenzionali (sonori o visivi), da utilizzare in ambienti rumorosi o come sistemi di backup. Ciò che conta è che esista un metodo affidabile e immediato per trasmettere informazioni e allarmi tra chi opera all'interno e chi vigila all'esterno. L'operatore incaricato della sorveglianza deve essere dotato degli stessi DPI dei lavoratori che accedono al generatore, in modo da poter fornire supporto o intervenire in emergenza senza esporsi a rischi. Infine, è necessario verificare che tutti i membri della squadra abbiano compreso e condiviso il piano di comunicazione e i segnali di emergenza, inclusi eventuali segnali concordati per richiedere l'uscita immediata dall'ambiente confinato.

3.6 DPI (Dispositivi di Protezione Individuale) specifici

Prima dell'ingresso, ogni operatore deve indossare tutti i Dispositivi di Protezione Individuale (DPI) previsti per i lavori in spazi confinati, scelti in funzione dei rischi individuati. Nel caso di intervento in un generatore d'acqua surriscaldata, i DPI fondamentali comprendono:

- *Casco di protezione*, utile contro urti e caduta di materiali, preferibilmente dotato di lampada frontale antideflagrante per garantire un'adeguata illuminazione interna.
- *Abbigliamento protettivo*: indossare una tuta o indumenti idonei al contesto operativo, in grado di offrire protezione da polvere, sporcizia (es. residui della caldaia) e dal contatto con eventuali superfici ancora calde.
- *Guanti di lavoro appropriati*, resistenti sia al calore residuo che ai rischi meccanici, come bordi taglienti presenti all'interno del generatore.
- *Scarpe di sicurezza antinfortunistiche*, con suola antiscivolo, puntale rinforzato e proprietà isolanti; se necessario, devono anche essere antistatiche.
- *Protezione degli occhi (occhiali o visiera)* da utilizzare qualora ci sia possibilità di schegge, polveri o schizzi, ad esempio durante la rimozione di incrostazioni.
- *Rilevatore multigas portatile*, a lettura continua e correttamente calibrato, da portare con sé all'interno: esso deve monitorare costantemente ossigeno, gas nocivi e vapori infiammabili, fornendo avvisi immediati in caso di variazione delle condizioni ambientali.

La selezione e l'impiego corretto dei DPI devono basarsi sulla valutazione dei rischi e sulle procedure operative definite; il personale deve essere formato al loro utilizzo e ogni dispositivo deve essere controllato preventivamente per garantirne l'efficienza. È inoltre raccomandato non introdurre nello spazio confinato attrezzature o oggetti superflui (come cinture porta-utensili ingombranti) che potrebbero impigliarsi o

rendere più difficoltose eventuali operazioni di soccorso. Tutti i DPI impiegati devono essere certificati, mantenuti in regola con le revisioni periodiche e indossati obbligatoriamente prima dell'accesso al generatore. Figure 5 e 6.

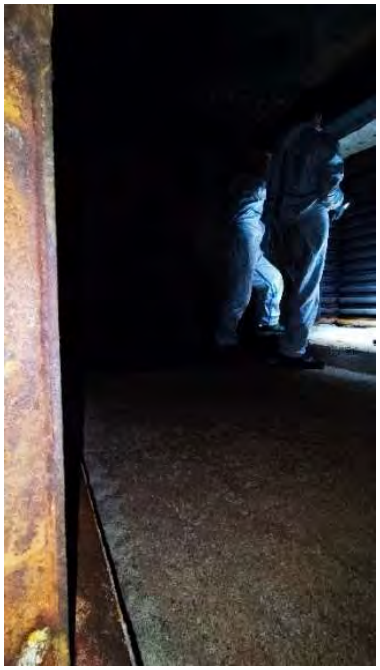


Figura 5. Operatori intenti alla visione delle membrature del generatore nella zona convettiva





Figura 6. Operatori intenti alla visione delle membrature del generatore nella zona di preriscaldo dell'aria comburente

3.7 Sistemi di Recupero ed Emergenza

Prima dell'accesso, è necessario predisporre in modo accurato tutte le misure di emergenza e di soccorso, verificando che siano immediatamente funzionanti. Deve essere predisposto un dispositivo di recupero adeguato ed è fondamentale controllare che l'attrezzatura sia fissata correttamente, in perfette condizioni di utilizzo e che il personale esterno sia addestrato al suo impiego. Occorre inoltre **definire e testare una procedura di emergenza**: tutti i lavoratori coinvolti devono essere informati, prima dell'ingresso, sulle azioni da intraprendere in caso di criticità. Il piano di emergenza deve comprendere le modalità di evacuazione rapida degli operatori presenti all'interno e il primo trattamento sanitario: ad esempio la disponibilità di un kit di primo soccorso in prossimità dell'area di lavoro e la presenza di personale formato per le manovre di pronto intervento. In caso di arresto respiratorio o cardiaco, le manovre rianimatorie devono poter essere iniziate senza ritardi, in attesa dell'arrivo dei soccorsi avanzati.

Un aspetto fondamentale riguarda il coordinamento con i soccorsi pubblici: secondo il DPR 177/2011, la procedura deve includere l'integrazione con i servizi esterni di emergenza (Servizio Sanitario 118 e Vigili del Fuoco). Ciò comporta

l’obbligo di essere pronti a contattare tempestivamente i soccorritori, avendo a disposizione i numeri di emergenza, un telefono o una radio efficiente e tutte le informazioni necessarie (luogo preciso, tipologia di incidente, numero di persone coinvolte, eventuali sostanze pericolose). Nei casi a rischio più elevato, può essere opportuno avvisare preventivamente i Vigili del Fuoco o predisporre una squadra di soccorso industriale in stand-by; tuttavia, per un’ispezione di breve durata come quella di 30 minuti, ciò normalmente non è richiesto se le procedure di sicurezza sono rispettate. L’aspetto determinante è che, in caso di emergenza, i soccorsi esterni possano intervenire rapidamente: l’area circostante deve quindi rimanere libera e sgombra, in modo da consentire l’accesso agevole ai mezzi di soccorso.

4. Verifica di visita interna

La visita interna consiste nell'esame visivo delle parti del generatore accessibili ed ispezionabili, tanto internamente che esternamente. Qualora durante la verifica emergessero dubbi sulla condizione delle membrature o in caso si necessiti, a fronte di situazioni evidenti di danno, è consentito avvalersi di ulteriori esami e prove, eseguiti da personale adeguatamente qualificato incaricato dal datore di lavoro, al fine di accertare la permanenza delle condizioni di stabilità per la sicurezza dell'esercizio del generatore stesso. Viene effettuata a intervalli periodici (in Italia ogni due anni per i generatori di vapore/acqua surriscaldata) allo scopo di valutare lo stato di conservazione tecnico dell’apparecchiatura. Durante la visita interna, il verificatore esamina lo stato delle superfici interne bagnate dall’acqua e di quelle esposte ai fumi di combustione, alla ricerca di segni di usura, corrosione, depositi, surriscaldamento o altri difetti. Questa verifica consente di identificare precocemente eventuali problemi tecnici che possano compromettere l’affidabilità e la stabilità strutturale del generatore, garantendo il mantenimento delle condizioni di sicurezza e performance previste dal costruttore. In caso di esito positivo, la visita interna attesta la possibilità di proseguire l’esercizio del generatore fino alla successiva scadenza di ispezione.

4.1 Esame visivo interno – lato fumi

Il lato fumi (interno della camera di combustione, passi fumo, superficie esterna dei tubi) va ispezionato attentamente, poiché qui si manifestano fenomeni di surriscaldamento e corrosione ad alta temperatura. I principali controlli sul lato fumi includono:

Pulizia e Fuliggine: Si verifica che le superfici dei tubi e delle pareti siano pulite o al più coperte da un leggero strato di ossido uniforme. La presenza di spessi depositi di fuliggine o cenere aderenti ai tubi è indice di combustione non ottimale o insufficiente pulizia: questi depositi riducono lo scambio termico e possono causare surriscaldamenti locali. Vanno quindi rimossi e si dovrebbe indagarne la causa (taratura bruciatore, qualità combustibile, ecc.). Si ispeziona anche l’eventuale

economizzatore (fasci tubieri nei passaggi fumo posteriori) per accertare che non vi siano ostruzioni da residui.
Surriscaldamenti e deformazioni: Le pareti ed i tubi lato fumi vengono esaminati per individuare segni di surriscaldamento. Indizi tipici sono: deformazioni plastiche (tubi imbarcati, rigonfiamenti "bulges"), colore anomalo del metallo (aree bluastre o iridescenti indicano esposizione a temperature molto elevate), oppure superfici fortemente ossidate/scagliose. Un fenomeno da ricercare è il flame impingement: impatto diretto della fiamma su elementi metallici, che causa surriscaldamento localizzato e possibile bruciatura. Se presenti bruciature o distorsioni in corrispondenza dell'area del bruciatore, occorre valutare modifiche alla distribuzione della fiamma. Tutti questi indizi vanno annotati dettagliatamente nel rapporto ispettivo.
Corrosione ad alta temperatura: Sul lato fumi può verificarsi corrosione dovuta ai prodotti della combustione, specie in presenza di zolfo nei combustibili o in caldaie che subiscono molte accensioni/spegnimenti. Si cercano tracce di corrosione sulle superfici esterne dei tubi, ad esempio erosione in corrispondenza di punti di impatto del flusso gassoso o corrosione sotto depositi. Se il generatore opera con fumi a bassa temperatura, in alcune zone (sotto il punto di rugiada acida), può presentare corrosione da condensa acida (tipicamente sulle superfici finali dell'economizzatore). Qualunque attacco corrosivo significativo va documentato e, se possibile, riparato (ad es. mediante molatura e ripristino del materiale o sostituzione del tubo nelle fermate programmate).
Stato dei refrattari e guarnizioni: Si esamina il rivestimento refrattario del focolare (piastre o cementi refrattari sulle pareti della camera di combustione, volte, ecc.) verificando che non vi siano fessurazioni estese, distacchi o erosioni. Il refrattario danneggiato espone il metallo sottostante a calore eccessivo. Le guarnizioni di tenuta dei portelli e delle giunzioni devono essere integre, per prevenire ingressi d'aria non prevista o fuoriuscite di fumo. Anche la presenza di eventuali falle o perdite di gas durante l'esercizio (tracce di fuliggine attorno a flange o giunti) dovrebbe essere segnalata e va investigata.



Figura 7. Condizioni delle membrature interne del generatore nella zona convettiva





Figura 8. Condizioni del bruciatore e delle membrature interne del generatore nella zona irraggiata. È presente una zona evidentemente annerita dovuta alla non perfetta registrazione del bruciatore

Componenti lato fumi: Si controllano i supporti e staffaggi dei tubi devono risultare stabili e allineati, senza segni di cedimento dovuti a dilatazioni termiche. Crepe nelle saldature di attacco delle staffe o negli elementi distanziatori vanno cercate visivamente (spesso si manifestano come sottili linee scure con tracce di ossido). In caldaie a tubi d'acqua, è importante che i tubi possano dilatarsi liberamente: l'ispettore verifica che i sistemi di sospensione del fascio tubiero (es. tiranti o molle) siano funzionali e non bloccati. (Figg. 7 e 8)

4.2 Esame visivo esterno del generatore

Oltre alle superfici interne, la visita interna comprende anche un controllo visivo dell'esterno del generatore e dei suoi accessori (per quanto accessibile). Pur trattandosi di un esame "a freddo" con caldaia ferma, si possono evidenziare elementi utili sulle condizioni operative:

Corrosione esterna e coibentazione: Si ispeziona l'esterno del generatore per individuare corrosione esterna, ad esempio dovuta a infiltrazioni d'acqua sotto l'isolamento. Si esaminano i punti di passaggio delle tubazioni attraverso la muratura o la coibentazione: qualsiasi traccia di ruggine o rigonfiamento del materiale coibente può indicare corrosione sottostante. Particolare attenzione va data ai giunti saldati visibili e ai punti di supporto. Se il generatore è dotato di involucro/cassa esterna, si controlla l'integrità di quest'ultima (assenza di crepe o deformazioni che potrebbero riflettere deformazioni della parte in pressione interna).

Perdite e trafilamenti: Si cercano evidenze di perdite d'acqua. Anche se il generatore è scarico, si possono notare colature di ossido o depositi salini in prossimità di giunti e flange, indice che in esercizio vi erano piccole perdite (ad esempio dalle guarnizioni dei portelli o dalle tenute delle tubazioni). Questi punti vanno registrati e riparati prima della rimessa in servizio (sostituendo guarnizioni, serrando bullonature, ecc.). Si controllano le valvole di intercettazione e sicurezza esterne per accertarsi che non mostrino incrostazioni o trafilamenti evidenti.
Accessori di controllo e sicurezza: Anche se la verifica di funzionamento degli accessori è oggetto di altra procedura, durante l'ispezione visiva si può dare uno sguardo allo stato di manometri, termometri, livelli visivi, valvole di sicurezza e altri dispositivi montati sul generatore. Ad esempio, i livelli visivi del liquido devono essere puliti e integri; i manometri ben calibrati (si può confrontare la lettura con un manometro campione a caldaia scarica = 0 bar); le valvole di sicurezza devono presentare piombature intatte e scaricatori convogliati in luogo sicuro. Qualsiasi anomalia evidente (strumenti rotti, valvole corrose, ecc.) sarà segnalata per intervento manutentivo.
Struttura di sostegno e collegamenti impiantistici: Infine, si verifica lo stato del basamento e della struttura di sostegno del generatore, nonché dei collegamenti con le tubazioni dell'impianto. Le strutture metalliche portanti non devono presentare cedimenti, cricche o corrosione significativa. Le tubazioni di mandata e ritorno dell'acqua surriscaldata collegate al generatore devono avere i necessari compensatori di dilatazione in buono stato e ancoraggi solidi. La presenza di vibrazioni anomale o dilatazioni non compensate può causare sollecitazioni sul generatore: l'ispettore qualitativamente valuta anche questi aspetti (ad esempio controllando se i supporti delle tubazioni presentano segni di sfregamento o spostamento).

5. Conclusioni

Qualora l'esame visivo metta in luce dubbi sullo stato di qualche componente – ad esempio corrosione marcata, riduzione di spessore, cricche sospette, deformazioni – si rende necessario approfondire con ulteriori esami non distruttivi. La normativa consente e anzi raccomanda che, a fronte di indicazioni di danno evidente, il datore di lavoro incarichi personale qualificato per eseguire prove supplementari. In pratica, in caso di anomalie si possono adottare ad esempio le seguenti tecniche (senza però entrare qui nei dettagli operativi degli NDT):

- *misurazioni di spessore (spessimetrie);*
- *controlli con liquidi penetranti o magnetoscopici*;
- *prova idraulica di tenuta*.

Se durante la visita interna o gli esami supplementari emergono situazioni critiche, l'ispettore è tenuto a dichiarare l'attrezzatura non idonea all'ulteriore esercizio fino a che non venga ripristinata la sicurezza. In casi del genere, il generatore dovrà essere

riparato secondo le norme vigenti (eventualmente con procedura approvata da INAIL) e successivamente sottoposto a nuova verifica prima della rimessa in marcia.
La memoria descritta evidenzia chiaramente come la verifica di visita interna di un generatore di acqua surriscaldata di grandi dimensioni rappresenti un'attività ad elevata complessità tecnica e organizzativa. Tale operazione richiede una pianificazione accurata, non solo sotto il profilo ispettivo, ma soprattutto in relazione agli aspetti di salute e sicurezza, con particolare riferimento alle procedure per l'accesso in ambienti confinati. Infatti, l'ingresso all'interno del generatore comporta rischi specifici quali la presenza di atmosfere pericolose, carenza di ossigeno, spazi ristretti e difficoltà di evacuazione, rendendo indispensabile l'adozione di rigorose misure preventive, tra cui sistemi di ventilazione forzata, monitoraggio continuo dei gas, utilizzo di DPI idonei e presenza di personale di assistenza esterna qualificato. L'applicazione delle procedure di lock-out/tag-out e la completa messa in sicurezza dell'impianto costituiscono inoltre prerequisiti fondamentali per garantire condizioni operative sicure. Dal punto di vista tecnico, i generatori di acqua surriscaldata, non essendo soggetti a ebollizione, presentano generalmente una minore tendenza alla formazione di incrostazioni rispetto ai generatori di vapore. Tuttavia, questa caratteristica non elimina i rischi legati alla qualità dell'acqua, ma li sposta prevalentemente verso fenomeni di corrosione localizzata. Per questo motivo, durante la visita interna risulta fondamentale porre particolare attenzione allo stato superficiale dei tubi, dei collettori e delle saldature, verificando la presenza di attacchi corrosivi, deformazioni o segni di surriscaldamento. Parallelamente, assume un ruolo determinante il corretto trattamento chimico dell'acqua, che deve essere costantemente monitorato e mantenuto entro parametri controllati al fine di prevenire fenomeni degradativi.
Un ulteriore aspetto di primaria importanza è rappresentato dalla corretta regolazione dei bruciatori. Una combustione non ottimale può infatti generare fiamme non uniformi o impingement diretto sulle pareti dei tubi, causando surriscaldamenti localizzati, deformazioni e, nei casi più gravi, rotture. La verifica dell'assetto di combustione, della distribuzione della fiamma e dei parametri di funzionamento del bruciatore costituisce pertanto un elemento essenziale per la salvaguardia dell'integrità del generatore.
In conclusione, la visita interna di un generatore di acqua surriscaldata non deve essere considerata una semplice attività ispettiva, ma un processo articolato che integra competenze multidisciplinari, dalla sicurezza sul lavoro alla chimica dell'acqua, dalla meccanica alla combustione. Solo attraverso un approccio sistematico e consapevole è possibile garantire l'affidabilità, l'efficienza e la sicurezza di esercizio dell'impianto nel tempo.

Bibliografia

[1] d.m. 329 del 01/12/2004; d.lgs. n. 81/2008; d.m. 11/04/2011; d.lgs. 93 del 25/2/2000

Applicazione dell'Intelligenza Artificiale generativa alla manutenzione predittiva di attrezzature critiche in impianti RIR

D. Sallustio[1], F.P. Nigri[1]

[1]Inail – UOT di Bari

Sommario
Negli stabilimenti RIR, la manutenzione correttiva, eseguita quando si raggiunge una condizione di avaria a seguito di un guasto, può risultare al tempo stesso rischiosa e onerosa. Al contrario, la manutenzione predittiva, basata sulla misurazione continua delle condizioni operative, consente di anticipare il verificarsi di un guasto e di ridurre sia i rischi operativi sia i costi complessivi legati ai tempi di fermo.
Nell'ambito dell'Industria 4.0, la manutenzione predittiva rappresenta lo standard in termini di efficienza e sicurezza. L'integrazione con la Industrial Internet of Things (IIoT) permette infatti di connettere macchinari e sensori, raccogliendo e scambiando dati in tempo reale. L'elaborazione di tali dati mediante algoritmi avanzati consente non solo di rilevare tempestivamente condizioni anomale, ma anche di stimare la vita utile residua (Residual Useful Life, RUL) delle attrezzature.
In questo lavoro si intende evidenziare il contributo che le tecniche di machine learning hanno apportato alle consolidate metodologie di manutenzione predittiva, ampliandone le capacità diagnostiche.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, con l'obiettivo di incrementare la disponibilità delle apparecchiature critiche negli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, si è assistito a una crescente diffusione di tecniche avanzate di monitoraggio delle condizioni operative. L'adozione di tali metodologie ha favorito la transizione dalla tradizionale "manutenzione reattiva" alla più efficiente "manutenzione predittiva", una trasformazione guidata da due esigenze fondamentali:

- ridurre al minimo i fermi impianto, nell'ottica di contenere i costi di esercizio;
- prolungare la vita utile delle attrezzature critiche, ottimizzandone le prestazioni nel tempo.

Negli scenari industriali più moderni, la manutenzione predittiva ha conosciuto un'evoluzione significativa grazie all'introduzione di modelli capaci di rappresentare e prevedere il comportamento di sistemi complessi. Questi modelli, comunemente noti come "Digital Twins", consentono il rilevamento precoce di malfunzionamenti e anomalie, migliorando al contempo la disponibilità delle apparecchiature e innalzando i livelli di sicurezza negli impianti di processo.

2. Evoluzione della manutenzione predittiva

Nella manutenzione reattiva, un'attrezzatura viene utilizzata fino al raggiungimento del limite delle proprie capacità operative e l'intervento di riparazione viene effettuato solo dopo il verificarsi del guasto. Questo approccio può risultare accettabile esclusivamente per sistemi semplici, caratterizzati da componenti poco costosi e facilmente sostituibili. Diversamente, per apparecchiature complesse e ad alto valore, come una turbina a vapore installata in una centrale termoelettrica, non è generalmente ammissibile attendere il guasto per procedere alla riparazione o alla sostituzione dei componenti danneggiati. In tali casi, diventa indispensabile intervenire prima che l'avaria si manifesti.

L'evoluzione naturale di questo scenario ha portato alla diffusione della manutenzione preventiva, che mira a prevenire i guasti mediante controlli programmati a intervalli regolari. Un aspetto cruciale di tale approccio consiste nell'individuare il momento più opportuno per eseguire le verifiche. Per le apparecchiature critiche ai fini della sicurezza, si tende ad adottare il principio di cautela, pianificando gli interventi con largo anticipo rispetto al momento in cui si presume possa verificarsi il guasto. Questa strategia, pur aumentando il margine di sicurezza, comporta inevitabilmente uno spreco di parte della vita utile residua dell'attrezzatura, con conseguente incremento dei costi di esercizio.

La manutenzione predittiva rappresenta oggi la forma più evoluta di gestione tecnica delle attrezzature industriali. Essa offre numerosi vantaggi, tra cui la riduzione dei tempi di inattività, l'eliminazione degli interventi non necessari e la possibilità di stimare con buona precisione il momento in cui un guasto potrebbe verificarsi. Conoscere la finestra temporale in cui è probabile l'insorgere di un malfunzionamento consente di programmare gli interventi nel momento più opportuno, ottimizzando la disponibilità dell'attrezzatura e riducendo i tempi di fermo.

Sorge quindi la domanda se sia possibile strutturare un programma di manutenzione predittiva capace di sfruttare appieno le moderne tecniche di monitoraggio. Gli approcci più avanzati si basano sempre più sull'impiego del machine learning [1],[4], tecnologia che permette ai sistemi di riconoscere pattern all'interno dei dati disponibili e di formulare previsioni senza la necessità di una programmazione esplicita. L'utilizzo di tali tecniche richiede innanzitutto la costruzione di un Digital Twin, e cioè di un modello digitale in grado di rappresentare in modo accurato il comportamento dell'attrezzatura in esame. Il modello viene alimentato con i dati provenienti dai sensori IoT[5] installati sul campo, comunemente indicati come "dati storici", che precedono l'insorgere dell'anomalia oggetto di analisi.

I dati storici necessitano, in genere, di una fase di "pre-processing" finalizzata al loro filtraggio. Ultimata questa fase, che ha la finalità di eliminare ogni rumore di fondo, si passa all'individuazione delle c.d. "distinctive features" o indicatori di condizione, deviazioni più o meno marcate dai valori di progetto che corrispondono a condizioni di funzionamento non più in linea con gli standard operativi della macchina.

Gli indicatori di condizione consentono di:

- rilevare la presenza di un'anomalia in atto;
- stimare l'evoluzione temporale dell'anomalia, e cioè prevederne la dinamica temporale.

Gli indicatori di condizione, in definitiva, consentono di avviare quella forma di apprendimento automatico che va sotto il nome di "machine learning".
L'impiego di strumenti basati su tecniche di machine learning consente una facile individuazione delle "distinctive features", che si traduce subito in un duplice vantaggio:

- evidenziare con successo i c.d. "Positive Predictable Values (PPV)";
- ridurre l'incidenza dei falsi positivi, che compromettono l'affidabilità delle previsioni manutentive.

A titolo di esempio, di seguito si intende mostrare come un ambiente di calcolo basato su tecniche avanzate di Intelligenza Artificiale consenta di stimare la c.d. "Residual Useful Life (RUL)" di una turbina a vapore.

3. Residual Useful Life (RUL)

La Residual Useful Life (RUL), o vita utile residua, rappresenta l'intervallo di tempo durante il quale si prevede che un sistema continui a operare correttamente, in conformità agli standard prestazionali definiti in fase di progetto, prima di raggiungere il proprio limite operativo. Nel caso in esame, la RUL viene stimata mediante un modello sviluppato con l'ausilio di tecniche avanzate di machine learning [3], in grado di analizzare:

- i dati storici di funzionamento acquisiti dai sensori installati sul campo;
- gli indicatori di condizione, che rappresentano i segnali di degrado progressivo della turbina.

4. Caso studio

L'esempio proposto riguarda una turbina a vapore installata in una centrale termoelettrica. I principali parametri operativi della turbina sono i seguenti:

- Wheel Chamber Pressure (WCP), pressione all'interno della camera del rotore: 60÷90 bar;
- velocità massima di rotazione del rotore: 6700 giri/min;
- steam throughput, ovvero la portata di vapore in condizioni di regime: 500 t/h.

La *wheel chamber* è la sezione della turbina che ospita il rotore palettato. In questa zona, l'espansione del vapore proveniente dagli stadi precedenti trasferisce energia alle palette, determinando la rotazione del rotore.
La WCP rappresenta un parametro cruciale per il monitoraggio delle condizioni operative: mantenerla entro il range previsto consente di:

- prevenire sovrappressioni anomale;
- evitare pressioni eccessivamente basse.

Una pressione superiore a 90 bar può generare perdite di vapore attraverso le

tenute, con conseguente riduzione dell'efficienza. Una pressione inferiore a 60 bar, invece, indica possibili problemi di flusso nel rotore. È inoltre noto che il rotore di una turbina a vapore è soggetto al fenomeno del *fouling*, ovvero l'accumulo di depositi sulle palette, che compromette l'efficienza e incrementa i costi operativi.
La misurazione della WCP avviene tramite sensori di pressione installati nella camera del rotore. I dati acquisiti alimentano il modello digitale (*Digital Twin*) della turbina.
Per la costruzione di un modello snello e aderente alla realtà impiantistica, non è sempre necessario considerare tutte le variabili disponibili. Una tecnica ampiamente utilizzata per la riduzione della dimensionalità è la Principal Component Analysis (PCA), che consente di semplificare il set di dati originario concentrando l'attenzione sulle sovrappressioni nella WCP.
L'impiego di strumenti basati su tecniche avanzate di machine learning risulta particolarmente utile per due motivi:

- elaborare i dati grezzi provenienti dai sensori, ottenendo una rappresentazione più facilmente analizzabile;
- esaminare i dati pre-elaborati per individuare l'indicatore di condizione associato alla tendenza alla sovrappressione anomala nella *wheel chamber*.

5. Raccolta e preelaborazione dei dati [2]

Il primo step consiste nella raccolta di un ampio set di dati tramite i sensori installati sul campo. Tali dati costituiscono la base informativa necessaria per addestrare il modello digitale incaricato di prevedere le anomalie di funzionamento della turbina che possono condurre a condizioni di sovrappressione. I dati grezzi acquisiti dai sensori devono essere preliminarmente depurati dagli inevitabili rumori di fondo, attraverso una fase di filtraggio (*filtering out*) che consente di ottenere segnali più puliti e idonei all'analisi successiva.

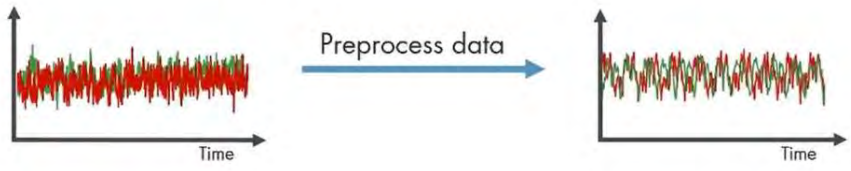


Figura 1. Filtering-out

Nonostante la fase di pre-elaborazione, l'analisi nel dominio del tempo non consente sempre di distinguere con chiarezza un comportamento corretto da uno difettoso, poiché i segnali tendono spesso a sovrapporsi. L'analisi nel dominio della frequenza risulta invece più efficace nell'identificazione degli *indicatori di condizione*. In questo dominio, infatti, le differenze tra i valori di picco emergono con maggiore evidenza: tali variazioni sono frequentemente indicative di un'anomalia di funzionamento e possono quindi essere utilizzate come affidabili indicatori di condizione.

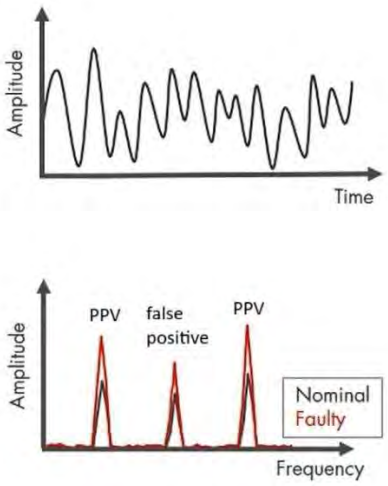


Figura 2. Analisi nel dominio della frequenza

Affinché il modello digitale sia in grado di classificare correttamente i dati come rappresentativi di un funzionamento normale o difettoso, è necessario che la differenza tra i valori di picco risulti sufficientemente marcata. Con riferimento alla figura riportata, vengono definiti *Positive Predictable Values (PPV)* quei dati per i quali tale differenza è nettamente evidente, poiché indicativa di un'anomalia reale.
Al contrario, quando la differenza tra i picchi risulta poco significativa, aumenta la probabilità di incorrere in *falsi positivi*. In questi casi, le sovrappressioni osservate non sono correlate a un effettivo degrado della turbina, ma a condizioni operative transitorie, ad esempio rapide fluttuazioni del carico, destinate a rientrare spontaneamente in tempi molto brevi. L'identificazione e l'esclusione dei falsi positivi rappresentano quindi passaggi essenziali per garantire l'affidabilità del modello predittivo.

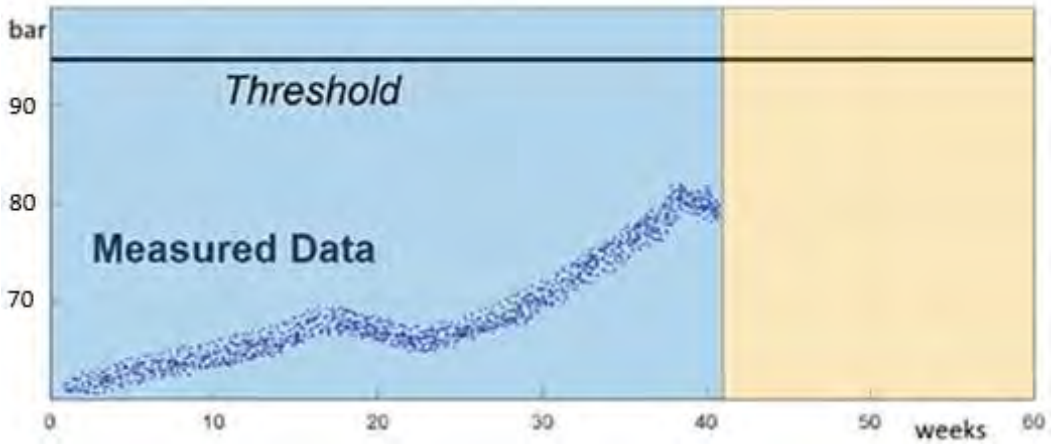


Figura 3. Dati storici

A intervalli di tempo regolari, il modello digitale sovrappone ai dati rilevati una *retta di raccordo* che consente di quantificare in modo efficace la direzione e l'intensità della loro variazione nel tempo. In questo modo viene individuato il *trend*, ossia l'andamento prevalente dei valori di pressione, mediante l'applicazione della

regressione lineare, tecnica che permette di descrivere con precisione la relazione esistente tra la variabile tempo e i dati di pressione acquisiti.

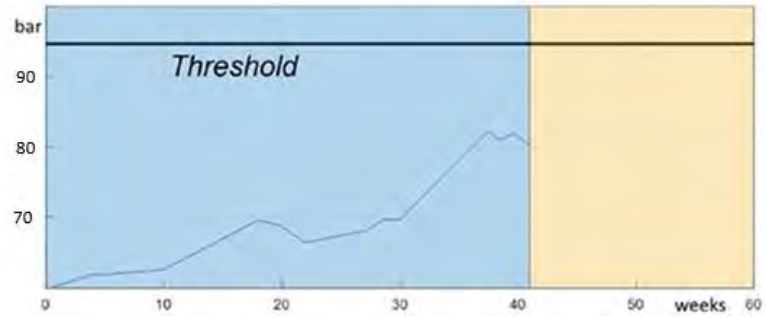


Figura 4. Retta di raccordo dei dati storici

La fase di apprendimento cessa nel momento in cui il modello non è più alimentato con i dati pre-elaborati provenienti dai sensori di campo.

6. Fase di predizione e stima della RUL [2],[3]

Terminata la fase di apprendimento sui dati storici, ha inizio la fase di predizione, che rappresenta l'aspetto più significativo del modello digitale. In questa fase, il modello è in grado di valutare se il funzionamento della turbina sia corretto oppure presenti segnali di anomalia, sulla base delle relazioni apprese durante l'addestramento. Esso opera in condizioni di incertezza, poiché non dispone di una programmazione esplicita che gli indichi come classificare ogni possibile configurazione dei dati. Per questa ragione viene considerato un sistema stocastico, e non un sistema deterministico: le sue decisioni derivano dalla probabilità che un certo comportamento sia associato a un funzionamento normale o difettoso. Quando adeguatamente addestrato, il modello sviluppa una forma di *percezione artificiale*, intesa come la capacità di interpretare i dati provenienti dai sensori di campo e riconoscere pattern sintomatici di un'anomalia o di un funzionamento regolare. L'assegnazione della probabilità di accadimento dell'anomalia non è arbitraria: per tener conto del degrado cumulativo del sistema, viene adottato un modello di regressione esponenziale, che utilizza intervalli di confidenza la cui ampiezza dipende dal numero di dati disponibili. All'aumentare della quantità di dati acquisiti, gli intervalli di confidenza si restringono, incrementando l'accuratezza della stima della RUL e rendendo più affidabile la previsione del comportamento futuro della turbina.

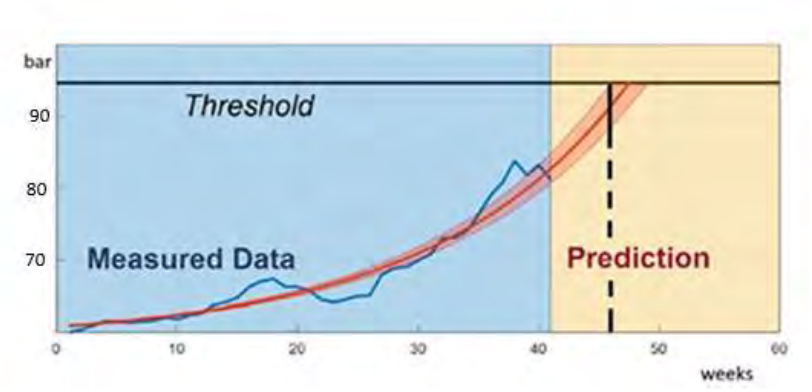


Figura 5. Stima della RUL

Con riferimento al caso studio in esame, la RUL eccede a malapena le 45 settimane.

7. Conclusioni

Il lavoro evidenzia come, alle tradizionali tecniche di manutenzione predittiva, sia oggi possibile affiancare modelli digitali capaci di accelerare il rilevamento di diverse anomalie di funzionamento. L'adozione di Digital Twins, alimentati da tecniche avanzate di *machine learning*, consente di ottenere una rappresentazione dinamica e continuamente aggiornata dello stato di molte attrezzature critiche presenti negli stabilimenti RIR.

Grazie ai dati provenienti in tempo reale da sensori e trasmettitori IoT, opportunamente categorizzati, elaborati e interpretati, il modello digitale è in grado di simulare scenari complessi, riconoscere tempestivamente condizioni anomale e stimare l'evoluzione del degrado. Ciò permette di prevenire guasti, ottimizzare l'impiego delle risorse e ridurre i tempi di fermo, contribuendo in modo significativo al miglioramento della disponibilità operativa e alla garanzia di livelli di sicurezza più elevati.

Bibliografia e sitografia

[1] Introduction to Predictive Maintenance with MATLAB® – Predictive Maintenance e-book- Part 1, The Mathworks Inc., White Paper.

[2] Risolvere problemi legati alla manutenzione predittiva con MATLAB® e Simulink, The Mathworks Inc., White Paper.

[3] The Math Works Inc. RUL Estimation Using RUL Estimator Models. 2019. *https://it.mathworks.com/help/predmaint/ug/rul-estimation-using-rulestimator-odels.html.*

[4] The Math Works Inc. Introduction to Predictive Maintenance with MATLAB. 2019. *https://it.mathworks.com/campaigns/offers/introduction_to_predictive-maintenance-with-matlab.html*.

[5] Lee, J., & Lapira, E. (2013). Smart sensors for predictive maintenance. In J. Mathew, M. Ma, A. Tan, K. C. Tan, & D. Anderson (Eds.), Engineering asset management (pp. 179–192). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35582-1_16.

Metodo delle Microonde per verifica della erosione in tubazioni HDPE

G. Augugliaro[1], F. Brini[1], L. Bruzzo[2], A. Demma[3], C. Mennuti[1], P. Quaresima[1]

[1]Inail - Dit
[2]Inail – UOT di Lucca
[3]Omnia Integrity - UK

Sommario
Il metodo basato sulle microonde è un metodo di prova non distruttiva che può essere applicato per l'ispezione di materiali non conduttivi (dielettrici), come plastica, elastomeri, ceramica, fibra di vetro, materiali compositi o altri.
Esistono diverse applicazioni del metodo. Ad esempio, se eseguito per l'ispezione di giunti di tubi in HDPE (*High density PolyEthylene*), il metodo basato sulle microonde consente di determinare (secondo gli standard ASTM) lo stato del giunto, identificando diverse tipologie di anomalie, tra cui il difetto principale in questa tipologia di giunti: la fusione a freddo.
In questo lavoro è stata verificata l'applicabilità del metodo per evidenziare la presenza di mancanza di materiale (p.es. erosione) in una tubazione in HDPE.
I risultati sono stati coerenti con le aspettative e hanno dimostrato una ottima sensibilità del metodo sui campioni utilizzati.

1. Teoria delle microonde

Le microonde sono radiazioni elettromagnetiche con lunghezze d'onda comprese tra un metro e un millimetro, corrispondenti a un intervallo di frequenze da 300 MHz (1 m) a 300 GHz (1 mm). Il prefisso micro non significa che le microonde abbiano una lunghezza d'onda inferiore a un millimetro; il termine è relativo al confronto con la lunghezza delle onde radio utilizzate prima dello sviluppo delle microonde.
Attualmente, le microonde hanno un campo di applicazione estremamente ampio: dal loro impiego per riscaldare il cibo, alle telecomunicazioni e ai radar, per citare solo alcuni esempi.
Tuttavia, un'applicazione relativamente recente è il loro utilizzo per l'ispezione di materiali compositi, elastomeri, ceramiche e, in generale, di qualsiasi materiale dielettrico. In questi casi, le microonde si sono dimostrate l'unica opzione possibile per ispezionare in modo soddisfacente materiali che costituivano un enorme ostacolo per i metodi convenzionali.
La tecnologia per i controlli non distruttivi sui materiali compositi è nata negli anni '90, inizialmente per ispezionare i giunti di dilatazione realizzati con elastomeri e le tubazioni rinforzate in vetroresina negli impianti nucleari.
Le principali caratteristiche dell'uso delle microonde nei controlli non distruttivi sono:

- Il metodo si basa sull'interferometria delle microonde.
- Il trasmettitore emette un fascio di microonde verso il pezzo da esaminare.

- Le interfacce in cui si verifica una variazione della permittività elettrica (costante dielettrica) producono una riflessione del segnale. Le variazioni della costante dielettrica possono essere causate da cambiamenti fisici o chimici nel materiale, come delaminazioni, cricche, vuoti, impurità o altri tipi di difetti.
- L'energia riflessa viene misurata come tensione, che viene campionata in posizioni discrete lungo il provino per creare un'immagine.
- Il trasduttore può essere spostato sul campione senza che variazioni di velocità influenzino i risultati.

Uno dei vantaggi dell'ispezione con microonde, rispetto alle tecniche convenzionali come gli ultrasuoni (UT), è la capacità di penetrare parti in materiali plastici o compositi di grande spessore con una perdita di segnale limitata.
Attualmente, l'utilizzo delle microonde nei controlli non distruttivi si è ampliato notevolmente, passando dall'ispezione dei giunti di dilatazione all'ispezione di materiali compositi, polimeri, elastomeri, ecc.
Il collaudo con microonde è possibile solo su materiali dielettrici (Energy Gap < 3 eV). Nei materiali conduttivi, gli elettroni liberi assorbono l'onda elettromagnetica incidente in uno strato molto sottile (tra 100 e 500 nanometri), riflettendo l'energia sotto forma di onde secondarie e presentando un'enorme riflettività.
Alcuni dei materiali sui quali è possibile applicare le microonde sono:

- Ceramiche, sia a matrice monolitica che composita (CMC)
- Materie plastiche (HDPE, polipropilene, nylon, ecc.)
- Resine e resine rinforzate (FRP)
- Gomme, rinforzate e non rinforzate
- Strutture composite

Lo studio delle microonde applicate ai controlli non distruttivi deve iniziare con una chiara distinzione rispetto alle onde meccaniche caratteristiche degli ultrasuoni. Le microonde sono radiazioni elettromagnetiche descritte dalle equazioni di Maxwell; il loro comportamento quando interagiscono con la materia è completamente diverso da quello delle onde meccaniche.
Essendo radiazioni elettromagnetiche, sono onde dotate di una componente elettrica e una magnetica. L'interazione di questi campi con il materiale in esame, a seconda delle caratteristiche del materiale stesso, determina il comportamento dell'onda.
Le microonde hanno una gamma di lunghezze d'onda da un metro a un millimetro e frequenze comprese tra 300 MHz (λ = 1 m) e 300 GHz (λ = 1 mm).
Uno dei contributi di Maxwell fu la scoperta della relazione:

$$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$$

In cui *c* rappresenta il valore della velocità della luce nel vuoto, comune a tutte le radiazioni elettromagnetiche, in funzione della permeabilità e permittività magnetica nel vuoto.

Sebbene la velocità della luce, *c*, sia una costante, la velocità di propagazione delle onde varia nei diversi materiali. La variazione della velocità di propagazione dipende essenzialmente dai valori di permittività e permeabilità del materiale in esame.
La velocità di propagazione dell'onda è leggermente inferiore alla velocità della luce *c* ed il suo valore è inversamente proporzionale alla radice quadrata del prodotto tra la permittività relativa e la permeabilità relativa.
Questi due parametri rappresentano il rapporto tra i valori di permittività e permeabilità del vuoto e quelli del materiale sotto test.
Se l'onda elettromagnetica incontra una superficie di un materiale conduttivo (alta riflettività) o una discontinuità nelle proprietà dielettriche o magnetiche del materiale che produce una riflessione dell'onda, i campi magnetico ed elettrico assumono la forma di un'onda stazionaria, nel senso che l'energia trasportata viene riflessa.
L'interazione tra l'onda originale (trasmessa) e l'onda riflessa genera un'onda stazionaria, che è un'onda che oscilla nel dominio del tempo ma i cui valori di ampiezza di picco non si muovono nello spazio. I punti con il valore di ampiezza minimo sono chiamati nodi, quelli con il valore di ampiezza massimo sono chiamati antinodi.
Un'onda stazionaria (in rosso) può essere creata dalla sovrapposizione di un'onda che viaggia verso sinistra (blu) e di un'altra onda che viaggia verso destra (verde).

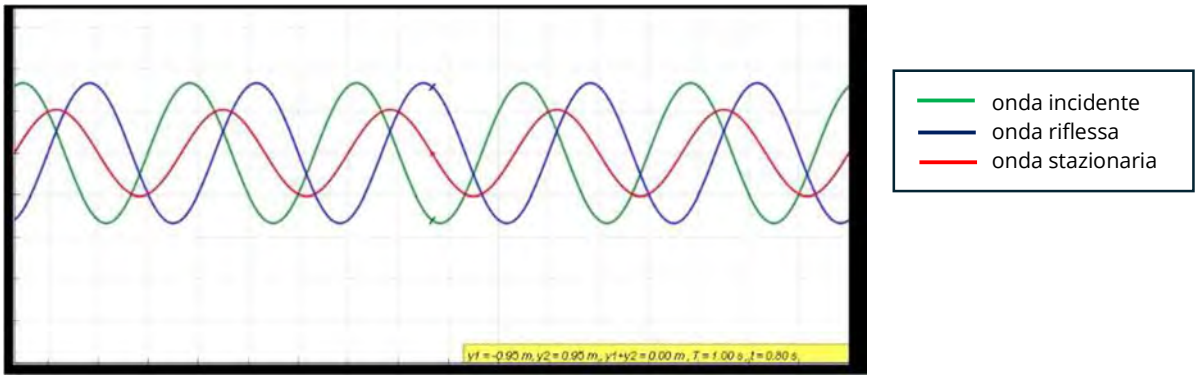


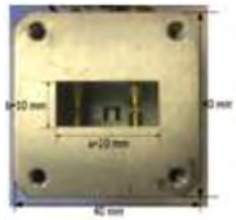
Figura 1: onda stazionaria che si crea nel mezzo

L'impedenza di un materiale può essere espressa come:

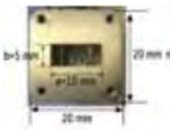
$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu'}{\varepsilon_0 \varepsilon'}}$$

In cui: E_x = componente del campo elettrico lungo l'asse x
H_y = componente del campo magnetico lungo l'asse y
μ_0 e μ'= permeabilità magnetica del vuoto e relativa del mezzo
ε_0 *e* ε' = permittività elettrica del vuoto e relativa del mezzo
Se esiste un confine che separa due mezzi con ε_1, μ_1 ed ε_2, μ_2 con un'impedenza d'onda rispettivamente Z_1 e Z_2 e c'è un'onda che viaggia nel mezzo 1, dato che Z_1 e Z_2 sono grandezze reali, l'onda riflessa nel mezzo 1 ha un'ampiezza uguale a (n-1)/(n+1) v/m e l'onda trasmessa nel mezzo 2 ha un'ampiezza uguale a 2n/(n+1) v/m; dove:
(k-1)/(k+1) è chiamato coefficiente di riflessione, con $k=Z_1/Z_2$, e
2k/(k+1) è chiamato coefficiente di trasmissione.

Esistono diversi tipi di dispositivi per generare microonde. Generalmente, il dispositivo utilizzato negli strumenti dedicati ai controlli non distruttivi utilizza un diodo a effetto Gunn. Questo tipo di diodo consente la realizzazione di un dispositivo molto piccolo, leggero e a basso consumo energetico.
La frequenza di oscillazione è parzialmente determinata da un dispositivo di risonanza fisica o guida d'onda, chiamato cavità a microonde. Il diodo è posizionato all'interno della cavità, una struttura metallica che confina il campo elettromagnetico nella regione delle microonde dello spettro. All'interno della guida d'onda, le onde rimbalzano sulle pareti della cavità, generando un'onda stazionaria; man mano che l'onda rimbalza, la frequenza di risonanza viene rinforzata.
Vengono utilizzati diversi tipi di guide d'onda in cui l'energia elettromagnetica viene condotta principalmente lungo la guida e limitata ai suoi confini. Le pareti conduttive del tubo confinano l'onda all'interno per riflessione, a causa della legge di Snell sulle loro superfici. Nelle guide d'onda, i campi elettrici e magnetici sono confinati allo spazio al loro interno perché i materiali conduttivi riflettono la radiazione elettromagnetica, quindi non si verificano perdite di potenza dovute alla radiazione. Questo sistema impedisce l'interferenza nel campo da parte di altri oggetti, a differenza di quanto avviene nei sistemi di trasmissione aperti.
Le guide d'onda utilizzate nel sistema di ispezione a scansione manuale che utilizza la modalità onda $TE_{1,0}$ sono indicate in figura 2.



Guida d’onda per sensore a 10 GHz



Guida d’onda per sensore a 24 GHz

Figura 2

L'onda elettromagnetica che si propaga in un mezzo subisce anche un'attenuazione, definita dal parametro tangente di perdita δ.

2. Difetti in HDPE

In questo lavoro vengono presi in considerazione i giunti di testa per fusione termica.
I principali difetti nei giunti di testa dovuti alla fusione termica nelle linee in HDPE sono dovuti a varie tipologie di errori di processo:

- Pressione di interfaccia molto alta o molto bassa;
- Temperatura delle piastre troppo alta o troppo bassa;
- Intervallo di tempo tra la rimozione delle piastre riscaldanti e l'applicazione della pressione alle estremità della linea molto elevato;
- Riscaldamento della linea sotto pressione;
- Disallineamento.
- Contaminazione:

- Dovuta a grasso o polline
- Polvere o sabbia
- Acqua
- Grassi
- Oli

I principali difetti dei giunti di testa ottenuti per fusione termica sono:

- Mancanza di fusione: fusione incompleta a causa di temperatura inadeguata o tempo di contatto inferiore al richiesto
- Fusione fredda: fusione con caratteristiche meccaniche inferiori a causa di temperatura inadeguata o tempo di esposizione nella zona di fusione
- Inclusioni: contaminazione della zona di fusione da parte di elementi estranei alla matrice polimerica (pulizia inadeguata)
- Cavità: spazi d'aria o gas intrappolati nella zona di fusione (disallineamento, pulizia inadeguata)
- Disallineamento

Caratteristiche dei giunti di fusione termica di bassa qualità

- Carenza di struttura molecolare all'interfaccia che produce una diminuzione della riorganizzazione cristallina e scarso legame molecolare lungo l'interfaccia.
- La carenza di struttura molecolare fa sì che le macromolecole "scivolino" l'una sull'altra sotto tensione invece di "bloccarsi". In un test di stress, la fusione fredda è evidente perché:

1) Non c'è allungamento nel campione sotto tensione;
2) Non c'è "sbiancamento" da stress nel campione (lo "sbiancamento" è prodotto dal riarrangiamento molecolare dovuto all'allungamento)
3) Presenta una frattura fragile e non duttile

I guasti di servizio nelle linee in HDPE sono dovuti principalmente a:
Erosione: usura interna delle pareti del tubo da parte di elementi abrasivi trasportati nel fluido
Attacco chimico: danni causati da agenti chimici aggressivi al polimero
Danni meccanici: danni causati da agenti esterni come urti o danni da escavatori
Degradazione UV: danni causati dall'esposizione alla radiazione solare diretta

3. Strumentazione e metodo di misura

Il sistema di controllo con microonde genera un'onda stazionaria che, a differenza di un'onda meccanica (ultrasuoni), richiede di considerare i valori di ampiezza e fase per determinare la posizione di un'indicazione (profondità) o lo spessore di un materiale.
Per questo motivo, i sensori a microonde hanno due diodi ricevitori posizionati a una distanza specifica pari a 1/4 della lunghezza d'onda utilizzata, determinata dalla frequenza del trasmettitore (10 o 24 GHz). L'utilizzo di due ricevitori consente di rilevare

sia l'ampiezza del segnale che la sua fase, in modo da poter determinare la distanza di un'indicazione.

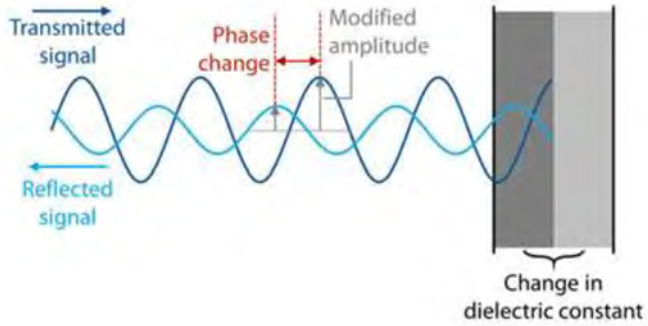


Figura 3: onda riflessa in caso di un cambiamento di permittività dielettrica ε

Il segnale relativo alle microonde verrà riflesso con una variazione di fase e ampiezza quando raggiunge un'interfaccia in cui si verifica una variazione del valore della costante dielettrica.
Il trasduttore del sistema è costituito da un diodo emettitore a effetto Gunn posizionato nella cavità di una guida d'onda rettangolare con due diodi riceventi; i diodi riceventi sono separati da una distanza pari a 1/4 λ, come indicato in figura 4.

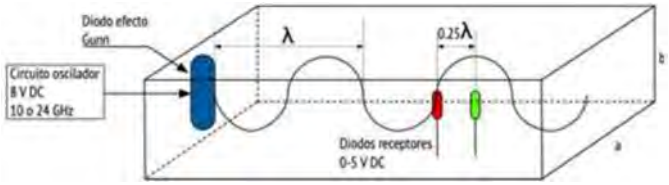


Figura 4: trasduttore del sistema a microoonde

Il segnale emesso e quello riflesso si sommano all'interno della guida d'onda, come si può vedere in figura 5.

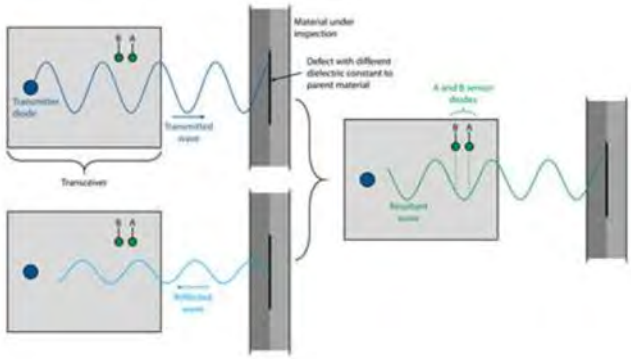


Figura 5: segnale ottenuto all'interno del traduttore

Questo effetto può essere compreso più chiaramente se sovrapponiamo i segnali trasmessi, riflessi e risultanti, come in figura 6.

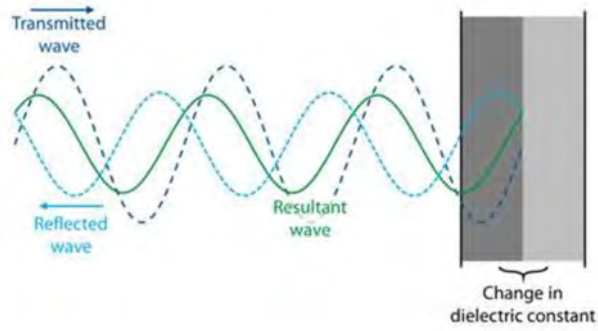


Figura 6: onda stazionaria risultante

I diodi rivelatori sono separati da un quarto (1/4) della lunghezza d'onda (λ) per una data frequenza, per sfruttare due vantaggi, come si può vedere in figura 7:

1. Se uno dei sensori rileva un valore nullo o basso, l'altro sensore rileverà un segnale con un'ampiezza maggiore (energia maggiore), aumentando di conseguenza la sensibilità del sistema.
2. La componente di fase può essere calcolata a partire dal valore di ampiezza del segnale, come mostrato nel diagramma.

Considerando simultaneamente i valori di ampiezza e fase, si ottengono informazioni aggiuntive su determinati tipi di difetti, ad esempio la riduzione di spessore (perdita di materiale).

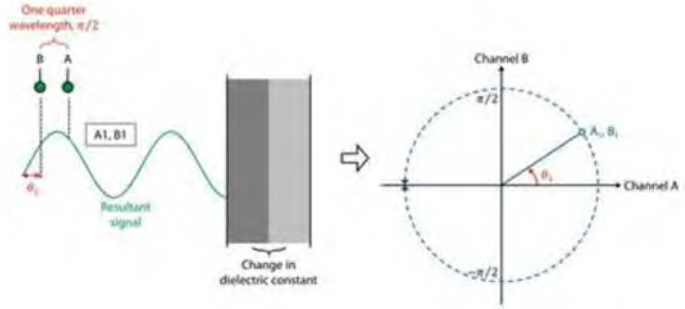


Figura 7: rappresentazione del segnale sui due diodi ricettori

Le dimensioni della guida d'onda sono ottimizzate in base alla lunghezza d'onda, che a sua volta è funzione della frequenza (10 o 24 GHz) dell'emettitore.
Questa geometria consente di ottenere un valore di tensione e di fase per ogni posizione (x, y) del pezzo ispezionato da ciascun ricevitore.
La generazione delle immagini utilizza i valori combinati di ampiezza (tensione) dei canali A e B. L'interrelazione di fase tra mittente e ricevitori lascia solo il segnale interferente.
Come esempio, si possono osservare chiaramente in figura 8 due aree in cui i valori di tensione, sia nel canale A che nel canale B, cambiano significativamente, indicando la presenza di discontinuità nel giunto da verificare.

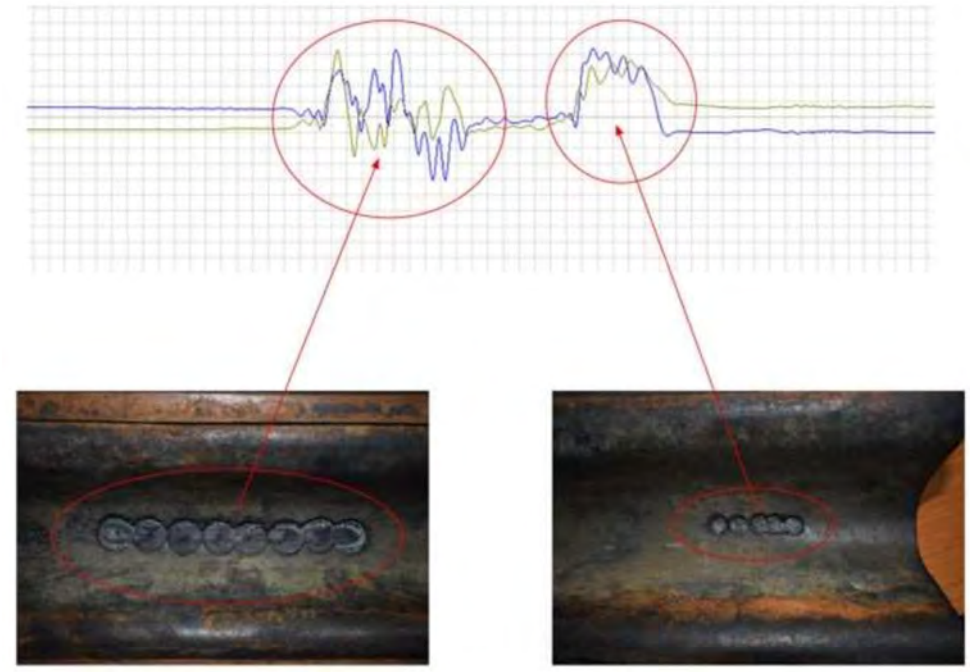


Figura 8: discontinuità e relativo segnale a microonde ottenuto

In figura 9 è rappresentato, invece, il risultato ottenuto in un giunto senza indicazioni rilevanti utilizzando un grafico lineare, in cui i valori di tensione, sia nel canale A che nel canale B, hanno lo stesso andamento

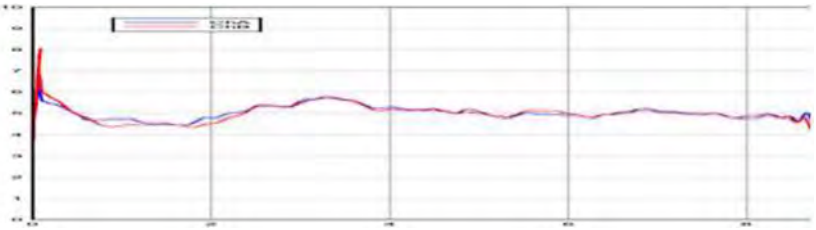


Figura 9: segnale di un giunto senza indicazioni

Questa modalità di configurazione della strumentzione implica la ricezione di due segnali, uno per ciascun rivelatore, identificati come Canale A e Canale B.
La combinazione di questi due segnali di base genera i seguenti canali:
•Canale C = Canale A - Canale B
•Canale D = $\sqrt{A^2 + B^2}$
•Canale E: arctan 2(A*B)
Per impostazione predefinita, la presentazione normale del sistema è il Canale C, che fornisce una definizione maggiore.

4. Misura dello spessore

Evidenziamo che, a differenza di un'onda meccanica (ultrasuoni), in cui, a seconda della velocità dell'onda e del tempo di volo, possiamo dedurre la distanza del percorso per determinare lo spessore del materiale o la profondità di un difetto, l'onda stazionaria generata dal sistema di controllo con microonde non può fornirci queste informazioni da sola.

Ricordiamo che quest'onda stazionaria è un'onda elettromagnetica e si muove alla velocità della luce. Per questo motivo non è fisicamente possibile utilizzare il tempo di volo del segnale per misurare le distanze. Per misurare gli spessori nei materiali non metallici utilizzando il sistema basato sulle microonde, dobbiamo utilizzare concetti come ampiezza, fase e attenuazione.
Materiali che presentano attenuazione contengono un parametro addizionale importante, appunto la attenuazione, che se misurato insieme alla fase puo permettere una misurazione diretta dello spessore, per esempio di vetroresine. Questo processo e' descritto in un brevetto (*Nondestructive, absolute determination of thickness or depth in dieletric materials – US patent 9989359*).
Tuttavia, esistono materiali in cui l'attenuazione è così bassa che non è possibile utilizzarla come parametro per trarre conclusioni. In questi materiali, l'onda non viene praticamente attenuata. L'HDPE è uno di questi materiali.
Infine, bisogna però specificare che la stima degli spessori è possibile quando lo spessore in esame è sufficientemente significativo in termini di lunghezze d'onda del segnale elettromagnetico all'interno del materiale.
Facciamo un esempio in cui dobbiamo analizzare uno spessore di HDPE di 60 mm:
Espressioni matematiche necessarie:
$C = \lambda * f$ Dove: C è la velocità della luce nel vuoto;
λ è la lunghezza d'onda nell'aria;
f è la frequenza utilizzata per l'ispezione.
$\lambda_m = \lambda_a / \eta$ Dove: λ_m è la lunghezza d'onda del segnale nel materiale;
λ_a è la lunghezza d'onda del segnale nell'aria;
η coefficiente di rifrazione del materiale.
Lavorando con 24 GHz, la lunghezza d'onda nell'aria è di 12,5 mm (c=3*108 m/s)
Considerando che l'indice di rifrazione nell'HDPE è 1,57, troviamo che la lunghezza d'onda nel materiale è di 7,96 mm.
Supponendo che il materiale da misurare abbia uno spessore nominale di 60 mm, otteniamo: 60 mm / 7,96 mm = 7,5 volte.
Ricordando che in HDPE non abbiamo attenuazione, si verifica la condizione mostrata in figura 10.

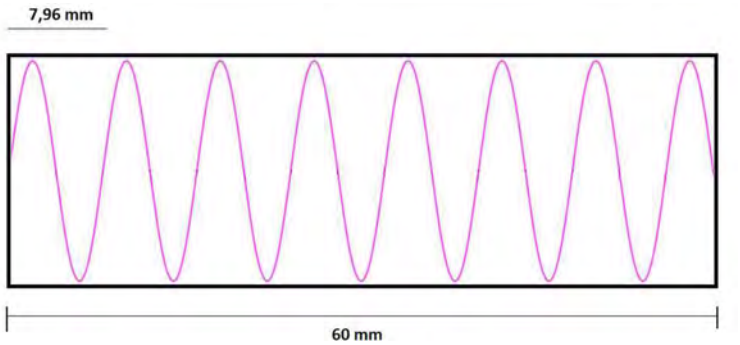


Figura 10: onda che si propaga senza attenuazione

Il software di elaborazione e visualizzazione dei segnali relativi alle microonde assegnerà a ciascuna tensione misurata un valore arbitrario all'interno della scala di

grigi. Se non ci sono variazioni di spessore marcate nella scansione eseguita, il colore grigio sarà per lo più uniforme. Tuttavia, è opportuno notare che, poiché non vi è attenuazione, spessori diversi saranno rappresentati esattamente con lo stesso colore all'interno della scala di grigi se coincidono in una frazione della lunghezza d'onda, anche se corrispondono a periodi diversi, come si può evincere dalla figura 11.

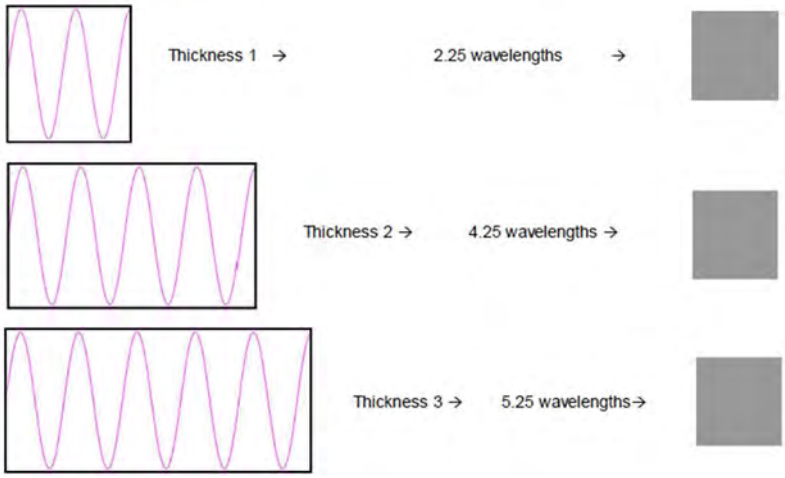


Figura 11: segnali identici da spessori differenti per un numero intero di lunghezze d'onda

Ciò è particolarmente utile per determinare gli spessori nei difetti di tipo erosivo, poiché essendo variazioni graduali di spessore, le diverse bande (frange) possono essere osservate nell'immagine di figura 12.
Ogni variazione di banda rappresenterà mezza lunghezza d'onda ($\lambda_m/2$) di spessore, poiché devono essere considerati il percorso di andata e il percorso di ritorno del segnale.

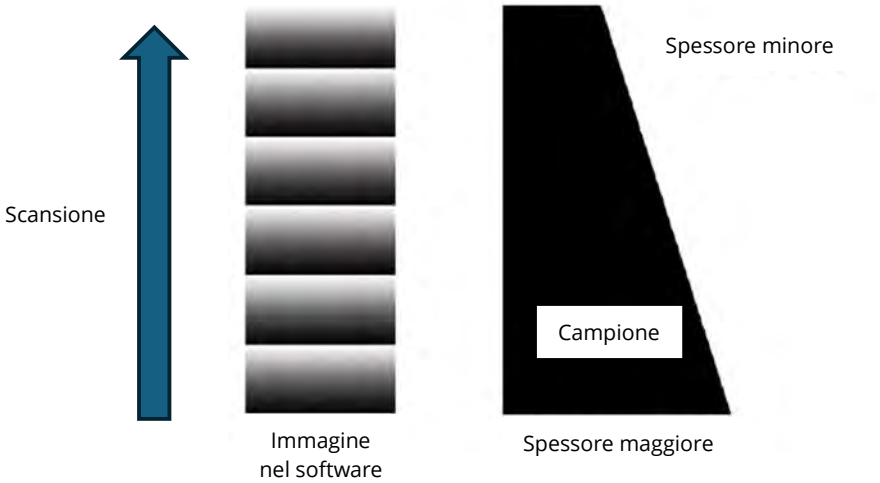


Figura 12: frange dell'immagine per variazione dello spessore del campione

5. Sperimentazione

Sebbene l'HDPE sia generalmente ben protetto dai raggi UV mediante l'aggiunta di coloranti (nero) e le linee di trasporto siano solitamente interrate (poco esposte alla luce solare), è importante verificare tramite microonde le aree direttamente esposte al

sole o vicine a fonti di calore. Nelle aree esposte, è possibile che si verifichi un infragilimento nel corso degli anni. Il cambiamento nelle caratteristiche del polimero di base causerà una variazione della costante dielettrica di riferimento. Il valore dielettrico di riferimento deve essere rilevato in un'area non esposta del materiale per poter rilevare i cambiamenti prodotti dalla degradazione UV nel materiale
Una caratteristica importante nell'ispezione con microonde è che tutte le possibili cause di indicazioni o difetti hanno un valore di costante dielettrica diverso da quello della matrice polimerica; quindi, sono di conseguenza un riflettore a microonde.
La possibilità di rilevamento dipende sia dalle dimensioni fisiche del difetto per un sensore di una data frequenza (10 o 24 GHz) sia dalle condizioni di esplorazione dell'area in esame. Una scansione irregolare dovuta alle condizioni della superficie quando si utilizza uno scanner di tipo manuale può risultare inaffidabile nel rilevamento di alcuni difetti. L'utilizzo di uno scanner che mantiene una distanza costante tra il pezzo e il sensore e si muove su due assi, consente senza dubbio una maggiore probabilità di rilevamento (anche per difetti di piccole dimensioni) e una maggiore capacità di analisi dei dati ottenuti.
In questo lavoro, è stato utilizzato una tubazione in HDPE di 30 mm di spessore e diametro esterno di 315 mm. Sulla superficie interna della tubazione è stato simulato un difetto di erosione della profondità di 1,5 mm e di forma circolare diametro 15 mm, quindi un difetto al 5% dello spessore, come indicato in figura 13.



Tubazione tagliata con difetto artificiale



Ingrandimento del difetto

Figura 13

Per la prova è stata utilizzata una sonda a 24 GHz, collegata ad un encoder e fissata alla tubazione come indicato in figura 14.

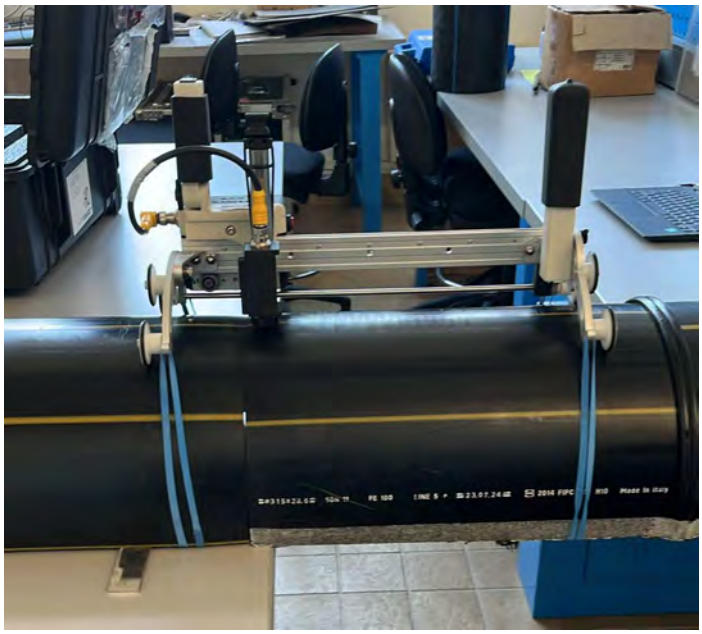


Figura 14: prova con microonde su tubazione HDPE

I risultati della prova effettuata in una zona con il difetto sono mostrati in figura 15

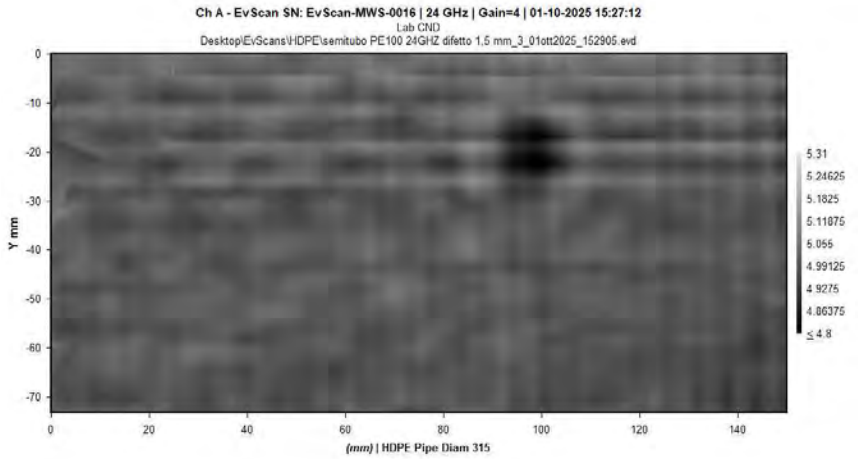


Figura 15: risultato della sperimentazione su difetto artificiale

Come si può evidenziare il fondo è piuttosto disturbato, probabilmente perché il materiale non è perfettamente uniforme, ma l'erosione si distingue chiaramente.

6. Conclusioni

Il controllo non distruttivo basato sulle microonde è un metodo emergente per testare materiali e dispositivi dielettrici, ovvero non conduttori. Le attività di ricerca e sviluppo così come le applicazioni pratiche del metodo sono in continuo aumento. L'*imaging* delle indicazioni viene effettuato principalmente tramite scansione meccanica e, oltre a permettere il rilevamento di difetti di erosione, si presta anche alla determinazione di determinate proprietà dei materiali, al monitoraggio delle condizioni e alla metrologia dimensionale.

In questo lavoro è stata verificata la capacità di evidenziare, su una tubazione di 30 mm di spessore, un difetto artificiale di 1,5 mm di spessore, con risultati molto promettenti.

Come approfondimento futuro, si intende verificare la sensibilità del metodo a difetti artificiali di differente profondità e diametro.

Bibliografia

[1] Specific Application NDE Method Leads to Development of Novel Microwave NDE Technique - Bob Stakenborghs - Inspectioneering Journal – Vol 11, Issue 1 del 2005
[2] NDT by microwave test method for non-metallic component - D.M. Tripathi et al.- Non-Destructive Evaluation 2016
[3] A review on microwave non-destructive testing (NDT) of composites – M. Saif ur Rahman et al. - Engineering Science and Technology, an International Journal 58 (2024) 101848
[4] Microwave theory and applications – S. F. Adam, H.P. – ed. Prentice Hall. 1970.

L’evoluzione dell’esame visivo indiretto e assistito: target 3d

E. Artenio[1], G. Augugliaro[1]– R. Balistreri[2] - D. Gattamelata[1]- F. Giacobbe[3], O. Spanu[2]

[1]Inail – Dit
[2]Inail – UOT di Cagliari
[3]Inail – UOT di Messina

Sommario
Tra le attività istituzionali dell’INAIL rivestono grande importanza le verifiche di riparazione e di messa in servizio delle attrezzature a pressione ai sensi del D.M. 329/04. Tali attività hanno caratteristiche di urgenza e presentano non poche difficoltà organizzative, soprattutto quando riguardano attrezzature installate ed esercite nelle industrie di processo, soggette alle prescrizioni del D. Lgs. 105/2015 per gli impianti a rischio di incidente rilevante che nella generalità dei casi concentrano le suddette durante le fermate periodiche delle unità d’impianto.
La “Procedura sperimentale per l’esecuzione da remoto di verifiche su attrezzature a pressione” [1], utilizzata durante la pandemia da COVID-19, ha consentito di maturare una discreta esperienza operativa; tale esperienza si è recentemente consolidata in un brevetto “pending” di un sistema per la caratterizzazione di esami visivi con target tridimensionale.
In parallelo, l’INAIL ha recentemente pubblicato la procedura dal titolo “Procedura per l’esecuzione dell’esame visivo di superfici esterne di attrezzature a pressione tramite sistema aeromobile a pilotaggio remoto” [2]: l’applicazione delle due procedure fornisce utili spunti per dimostrare l’affidabilità dei due metodi.
In questa memoria gli autori presenteranno il “target 3D” messo a punto da Inail, coerentemente con la normativa sugli esami visivi, che permette la verifica della risoluzione della catena di misura.

1. Scopo del target

Il target 3D realizzato si presenta come strumento per la caratterizzazione di indicazioni o difetti superficiali da utilizzarsi per la verifica delle attrezzature a pressione o delle superfici metalliche o non metalliche in genere con tecnica non distruttiva dell’esame visivo indiretto.
Tale strumento ha lo scopo di confrontare e valutare il livello di qualità dell’immagine trasmessa dal sistema in termini di risoluzione lineare, intesa come la minima distanza tra due oggetti, affinché il sistema ottico li possa distinguere consentendo di definire quale sia il gruppo di indicazioni più piccole che viene rilevato nella lettura dell’immagine.
Come già riportato, Inail ha redatto una “Procedura sperimentale per l’esecuzione da remoto di verifiche su attrezzature a pressione” e una “Procedura per l’esecuzione dell’esame visivo di superfici esterne di attrezzature a pressione tramite sistema

aeromobile a pilotaggio remoto", in cui aveva inserito il target 2D USAF 1951, indicato in Figura 1.

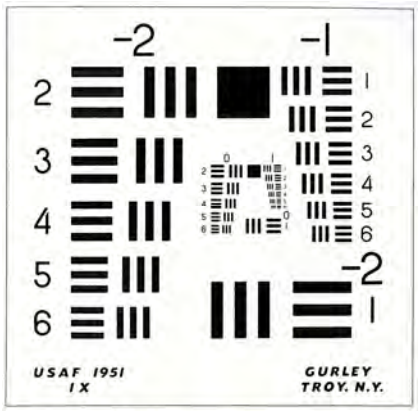


Figura 1. Target USAF 1951

Il target era stato inserito in accordo con la norma UNI EN 13927: "Prove non distruttive – Esame visivo – Apparecchiatura" che al paragrafo 5.1 prescrive: "la sensibilità di sistema o risoluzione devono essere accertate utilizzando un target di risoluzione o un pezzo campione di dimostrazione così come specificato nella documentazione di prova".

La stessa norma, nella sezione 6.3.2 "Target di risoluzione normali", specifica che i target di risoluzione normali sono:

- Pannello di colori
- Pannello delle linee
- Scala di grigi
- Indicatore di linearità
- Target di fessure.

A partire da questi dati è stato messo a punto il target con diversi panel tra cui il panel USAF 1951, inserito nelle procedure e riportato nella Figura 2.

Nella stessa norma UNI EN 13927, in appendice A: "Descrizione dell'apparecchiatura per l'esame visivo" nella sezione A.4 "descrizione dei target di risoluzione solitamente utilizzati per l'esame visivo", vengono descritti i vari target utilizzati, tra cui l'USAF 1951; infine, viene specificato che la lista indicata non è esaustiva e si possono utilizzare anche altri prodotti, aprendo di fatto a innovazioni rispetto ai target normalmente utilizzati.

Durante la sperimentazione delle procedure, si è evidenziato come il target bidimensionale permettesse di verificare la risoluzione della catena di misura, la capacità di rivelare piccoli dettagli su un oggetto o un componente [2], [3], [4], ma non desse indicazioni sulla capacità di risolvere indicazioni tridimensionali; a partire da tali evidenze, è iniziato lo sviluppo di un target 3D, che viene descritto in questo lavoro.

Il target 3D, contenendo indicazioni di riferimento tridimensionali, permette di verificare la risoluzione di una catena di misura e consente di apprezzare la risoluzione anche nella terza dimensione, ovvero la profondità o l'altezza di difetti eventualmente presenti. Il suo utilizzo risulta molto utile nel caso si effettui un controllo visivo indiretto

per la caratterizzazione dell'immagine prodotta mediante dispositivi ottici idonei, quali telecamere 2D o 3D ad alta definizione e strumenti ottici o di scansione 3D in genere.

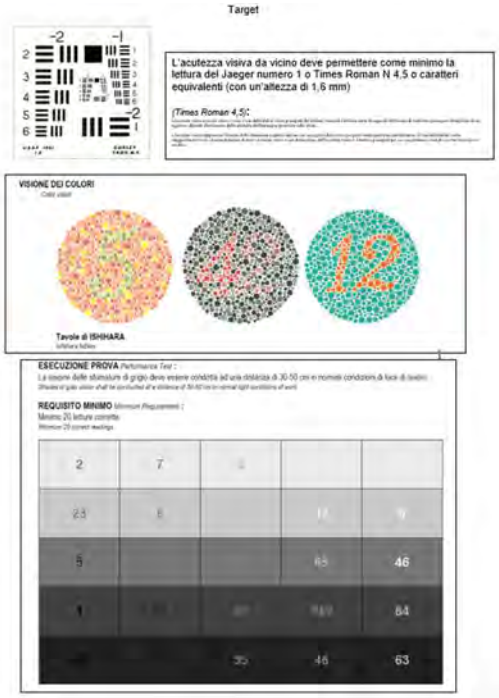


Figura 2. target completo inserito in procedura

2. Realizzazione e utilizzo del target 3D

Il target 3D è stato realizzato dopo una serie di miglioramenti del target 2D USAF 1951, iniziati con la realizzazione di uno sviluppo in altezza delle barre del target. I primi target 3D sono stati realizzati con spessore delle indicazioni fissato ed uguale per tutte le barre, mentre successivamente si sono utilizzate altezze coerenti con la larghezza delle barre del target stesso.

Nel frattempo, si è compresa l'importanza di rappresentare anche la mancanza di spessore, tipica per esempio della corrosione, e questo ha portato a creare degli intagli rispetto alla superficie di riferimento. Anche in questo caso, inizialmente si erano realizzati dei campioni con intagli passanti, poi sostituiti con intagli a profondità variabile, pari alla larghezza della barra.

L'ultimo passaggio, al momento della scrittura del lavoro, è stata la realizzazione di indicazioni a sezione circolare vicino alle barre.

Tutti i target sono stati disegnati con il software SolidWorks, e sono stati stampati utilizzando una stampante 3D utilizzando il materiale PLA. Il PLA (acido polilattico) è un materiale termoplastico di origine naturale, ampiamente utilizzato nella stampa 3D per la sua facilità di stampa, scelto per la sua buona qualità superficiale e bassa deformazione. È adatto alla realizzazione di prototipi e modelli non strutturali, anche se presenta limitata resistenza meccanica e termica rispetto ad altri polimeri tecnici.

Durante la stampa, si è fatta particolare attenzione alla risoluzione della stampa stessa evitando è importante prestare particolare attenzione alla risoluzione della stampa stessa e a evitare i fenomeni di *warping* (ovvero il sollevamento degli angoli o della base della stampa dal piatto) dovuto alla contrazione termica del materiale mentre si raffredda, e di *stringing* (ovvero quando il filamento continua a fuoriuscire dall'ugello mentre la testina si sposta a vuoto, creando fili sottili simili a ragnatele tra due parti della stampa). Il warping si controlla impostando un corretto bilanciamento tra temperatura e velocità di stampa, mentre molto importante per lo stringing è il valore della ritrazione combinato con una temperatura di stampa non troppo elevata.

3. Descrizione del target 3D

Il target, con le indicazioni che contiene, consente di caratterizzare per confronto l'immagine prodotta mediante dispositivi idonei già menzionati che acquisiscono, trametton o e permettono di riprodurre l'immagine su schermi anch'essi ad alta definizione. Al momento la caratterizzazione è qualitativa, permettendo di valutare in modo non soggettivo le caratteristiche dell'immagine acquisita; l'ulteriore passaggio della misura delle caratteristiche dell'immagine stessa potrà essere realizzato utilizzando, per esempio, scanner 3D o sistemi di intelligenza artificiale.
Come già anticipato, si è realizzata una tavola con una serie di barre tridimensionali delle stesse dimensioni del target USAF come lunghezza e larghezza, ma con una serie di barre tridimensionali in rilievo, con altezza pari alla larghezza delle barre sulla sezione "positiva" e un ulteriore tavola con barre incise con una profondità pari alla larghezza di ciascuna barra, sulla sezione "negativa". A integrazione delle barre tridimensionali di derivazione USAF, su tutta la periferia del target 3D sono disposte delle indicazioni di sezione circolare, di diametro pari alla larghezza delle barre a cui si affiancano ed aventi altezza/profondità pari al diametro, come si può evincere dalla figura 3.

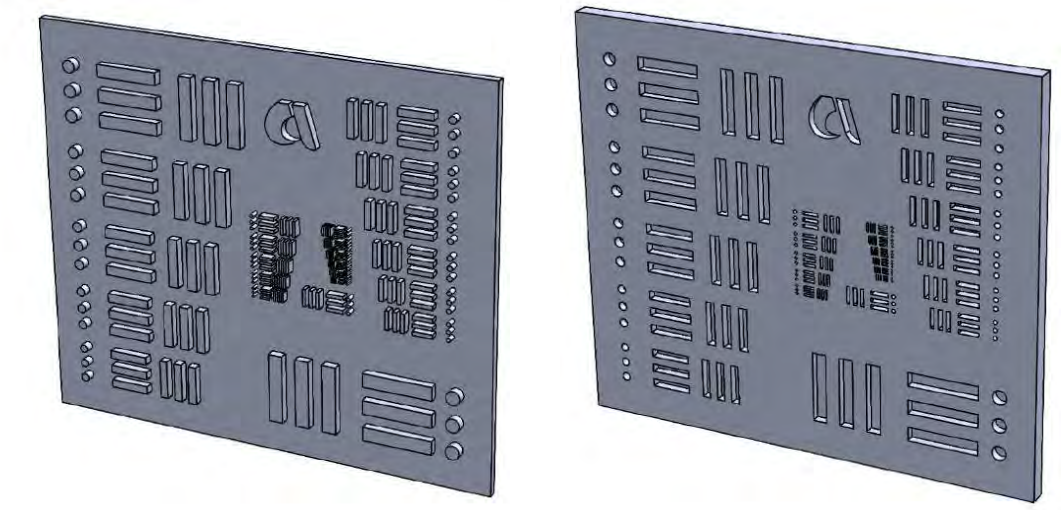


Figura 3. due tavole che formano il TARGET 3D

Le due tavole si possono accoppiare con un semplice incastro e possono essere realizzate su supporti di materiali rigidi di varia natura, con l'ulteriore vantaggio di potersi accoppiare con ulteriori tavole in 3D di colori diversi o, direttamente, con quella più adatta alla tipologia di superficie che si vuole indagare e all'ambiente. In caso di utilizzo su materiale ferromagnetico, il target può essere dotato di magneti sul retro per fissarlo al materiale.
La risoluzione dell'immagine catturata, che tiene conto di tutta la catena di misura, viene valutata con la analisi del target 3D, che deve essere posizionato in prossimità della superfice da esaminare, verificando che superficie e target siano in condizioni di luminosità equivalenti. L'indicazione minima rilevata è quella più piccola effettivamente distinguibile come indicazione in rilievo e/o incisa e determina il grado di risoluzione lineare della ripresa o dell'immagine che tiene conto di tutta la catena di misura. Una prima valutazione della profondità o dell'altezza delle indicazioni rilevate sulla superficie esaminata, per confronto con quelle prodottesi sui target, danno una stima sufficientemente precisa della profondità o altezza in rilievo dell'indicazione oggetto della valutazione.
Nell'esecuzione di un esame visivo, è cura del tecnico esaminatore, in funzione del dettaglio minimo che si vuole individuare e alla procedura di esame, determinare sulle scale del target quale deve essere il dettaglio minimo da identificare nelle tre dimensioni (rilievo/inciso) per poter affermare che l'immagine risponda al grado di qualità minima richiesta.
Per completezza, si riporta in figura 4 un disegno con le dimensioni delle indicazioni realizzate. In caso di necessità, è possibile scalare le misure del target per valutazioni con misure differenti da quelle evidenziate. Si ricorda che la tolleranza di fabbricazione dovrà essere valutata in modo che sia adeguata alla misura dell'indicazione minima realizzata nel target.

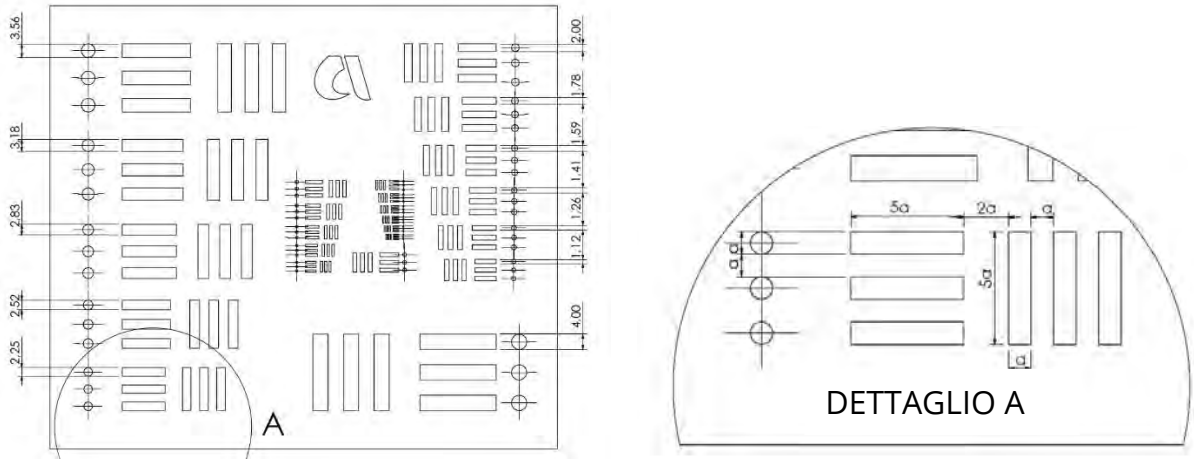


Figura 4. misure delle indicazioni del TARGET 3D

Riassumendo, il target presentato ha come grande vantaggio la possibilità di valutare oggettivamente le indicazioni minime rilevabili sulla superficie oggetto d'esame mediante il confronto diretto con un dispositivo in cui le indicazioni analoghe sono simulate, misurate (di dimensioni stabilite e note) ed esposte alla stessa condizione di illuminazione della superficie stessa, in conformità con la norma UNI EN 13927.

4. Sperimentazione del target 3D

Il target 3D semplificato, realizzato inizialmente con incisioni passanti e rilievi ad altezza fissa, è stato testato mediante esami visivi da remoto tramite immagini catturate con smartphone o drone, durante la sperimentazione delle procedura Inail [2]. L'esito di tali sperimentazioni è stato estremamente promettente, come si può evidenziare nelle figure 5 e 6, in cui le foto sono state scattate con un drone munito di fotocamera con zoom ottico.



Figura 5. foto scattata da drone ad una distanza di circa 3 metri

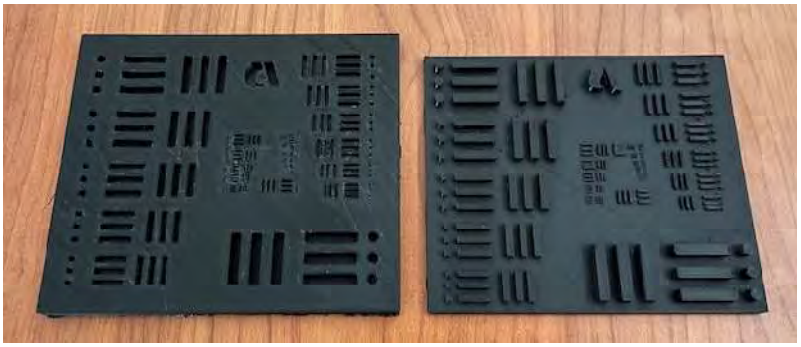


Figura 6. foto scattata da drone ad una distanza di circa 6 metri

Si evidenzia che il target può essere pitturato con differenti colori, in modo da essere il più possibile coerente con la tipologia della superficie che si vuole indagare; a riguardo è stata inserita la figura 7.


Figura 7. foto scattata da drone con target 3D con colori differenti

Successivamente a questa prima fase, come già descritto, sono stati realizzati alcuni target 3D con intagli e rilievi ad altezza variabile, che sono riportati in figura 8.


Figura 8. Target 3D realizzato secondo il disegno della figura 1

I due target sono stati esposti alla luce di una lampada che è stata prima posizionata sulla verticale del target, poi a 30° dalla verticale, infine a 60° dalla verticale, per meglio comprendere come permettano di evidenziare la minima serie di barre identificabili. Più la luce è inclinata rispetto alla verticale, più le ombre sono evidenti, e rendono chiaro il comportamento delle eventuali indicazioni presenti sulla superficie da verificare. Lo stesso esperimento è stato realizzato con il target con i rilievi, in figura 9, e con il target con gli intagli, in figura 10. La comprensione della modalità in cui le ombre

si presentano sulla superficie del target permette, per comparazione, anche di comprendere se le indicazioni, sul pezzo da verificare, sono rilievi oppure intagli.



(a) (b) (c)

Figura 9. foto del target 3D con rilievi, con luce angolata di 0° (a), 30° (b) e 60° rispetto alla verticale



Figura 10. foto del target 3D con intagli, con luce angolata di 0° (a), 30° (b) e 60° rispetto alla verticale

L'ultima prova sperimentale è stata realizzata con dei target 3D semplificati, pitturati di color corten per simulare l'ossido di ferro, fissati su un serbatoio insieme al target USAF 1951, per meglio evidenziare le differenze tra un target 2D ed un target 3D, al fine di determinare la capacità di individuare la minima barra chiaramente distinguibile. Inoltre, si evidenzia dalla figura 11 come il colore simile alla superficie del serbatoio riesca a simulare in maniera molto più veritiera le condizioni che si devono valutare in campo.



Figura 11. Target 3D con pittura corten a confronto con target 2D

Infine, questi target 3D sono stati utilizzati in alcune prove in impianto e hanno espresso tutta la loro potenzialità, in quanto, grazie alle indicazioni tridimensionali, permettono una valutazione sulla risoluzione della catena di misura, sulle ombre che si vengono a determinare durante la verifica e sulle indicazioni reali rilevate sull'attrezzatura da verificare.

5. Conclusioni

In questo lavoro viene presentato un target 3D per verificare la risoluzione del sistema di misura utilizzato per effettuare un esame visivo remoto.
Lo studio condotto e le sperimentazioni presentate mostrano come il target 3D rappresenti un'evoluzione sostanziale rispetto ai tradizionali target 2D utilizzati nell'esame visivo remoto, in particolare nell'ambito delle verifiche su attrezzature a pressione. L'introduzione della tridimensionalità delle indicazioni, sia in rilievo, sia incise, permette di valutare non solo la risoluzione lineare del sistema ottico, ma anche la risposta della catena di misura alle ombre, alla profondità e ai volumi reali, riproducendo i difetti che si incontrano sulle superfici in esercizio.
Le attività sperimentali, condotte in ambiente controllato e in impianto, tramite telecamere e UAV, hanno evidenziato la capacità del target 3D di restituire un quadro più completo delle prestazioni del sistema di acquisizione, consentendo di definire con maggiore precisione la minima indicazione individuabile in condizioni reali. La possibilità di confrontare l'immagine del pezzo con indicazioni note e misurate, esposte alla medesima illuminazione, assicura una valutazione oggettiva della risoluzione.
L'adattabilità del target, realizzabile in materiali, colori e finiture differenti, permette inoltre di riprodurre fedelmente scenari operativi complessi. Gli esperimenti condotti con illuminazione variabile hanno dimostrato l'efficacia della geometria tridimensionale nel mettere in evidenza ombre e micro-rilievi, rendendo più agevole la distinzione tra difetti sporgenti e difetti in sottrazione di materiale.
Alla luce dei risultati ottenuti, il target 3D si configura come uno strumento di elevata utilità nelle verifiche visive remote, particolarmente per attività condotte tramite droni, dove la qualità dell'immagine e la capacità del sistema di risolvere dettagli tridimensionali diventano elementi critici per l'affidabilità dell'ispezione. La sua integrazione nelle procedure Inail consente un miglioramento significativo nella standardizzazione, nella ripetibilità e nella documentazione dei controlli visivi, contribuendo così all'innalzamento del livello di sicurezza delle attrezzature a pressione.
Il lavoro apre inoltre la strada a ulteriori sviluppi, quali la calibrazione avanzata dei sistemi ottici, l'integrazione con algoritmi di visione artificiale e l'eventuale definizione di nuovi parametri prestazionali specifici per l'esame visivo tridimensionale.

Bibliografia

[1] “Inail procedure for augmented reality remote survey”, G. Augugliaro et al. ESREL 2020

[2] “*Procedura per l’esecuzione dell’esame visivo di superfici esterne di attrezzature a pressione tramite sistema aeromobile a pilotaggio remote*”, G. Augugliaro, C. Mennuti, E. Artenio, A. Ledda, C. Console, R. Balistreri, F. Giacobbe, O. Spanu, E. Franchi, T. Mullano – 2025 Inail

[3] U.S. Air Force MIL-STD-150A, standard of 1951.

[4] Convegno “Giornate nazionali corrosione e protezione” 5-7 Luglio 2023 – Torino: *Procedura per la conduzione dell’esame di strutture sviluppate in altezza con l’uso di Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)* - F. Giacobbe, G. Asaro, R. Balistreri, G. Augugliaro, E. Artenio, O. Zirilli, A. Berton, T. Mullano; A. Gabbia

[5] Rivista “La Metallurgia Italiana - International Journal of the Italian Association for Metallurgy” - n. 01 gennaio 2024 pagg 10-15 – *Procedura per la conduzione dell’esame di strutture sviluppate in altezza con l’uso di Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)* - F. Giacobbe, G. Asaro, R. Balistreri, G. Augugliaro, E. Artenio, O. Zirilli, A. Berton, T. Mullano, A. Gabbia

Implementazione emissioni acustiche su serbatoi interrati

A. Guarrera[1], E. Tassinario[1], A. Urso[2], G. Gorrino[3], S. Manna[3]

[1]Arkema S.r.l.
[2]INAIL Unità Operativa Territoriale di Certificazione, Verifica e Ricerca di Alessandria
[3]INAIL Unità Operativa Territoriale di Certificazione, Verifica e Ricerca di Roma

Sommario

Il caso studio descrive l'applicazione del metodo delle Emissioni Acustiche a due serbatoi interrati contenenti sostanze pericolose. Il controllo con Emissione Acustica fornisce un'analisi istantanea completa dell'integrità dei serbatoi e soprattutto consente la localizzazione degli eventuali danneggiamenti mediante l'analisi strumentale delle onde elastiche generate dal materiale sottoposto ad una condizione di stress non routinaria come la pressurizzazione del serbatoio. La rilevazione delle emissioni acustiche avviene mediante sensori disposti sulla membratura delle apparecchiature. Uno dei vantaggi di questa metodologia è quello di essere poco invasiva e fornire la possibilità di collaudare recipienti durante l'esercizio senza necessità di bonifica delle apparecchiature consentendo così monitoraggi frequenti o addirittura in continuo.
Nel caso in esame di serbatoi interrati il limite è rappresentato dal materiale che ricopre il serbatoio che non consente il posizionamento dei sensori se non rimuovendo il materiale stesso.
Nell'articolo verrà mostrata la progettazione ed installazione di speciali canalizzazioni che consentono il posizionamento della sensoristica ed il monitoraggio direttamente dal piano di campagna.
Questa implementazione consente di effettuare controlli annuali sull'integrità delle apparecchiature senza rimuovere il terreno circostante e senza effettuare la bonifica dei serbatoi, con conseguente riduzione dei costi e completa eliminazione di operazioni potenzialmente ad alto rischio, come lavori di scavo e bonifica di spazi confinati.

1. Introduzione

Il caso studio in esame è stato svolto presso lo stabilimento Arkema di Spinetta Marengo, un impianto chimico dedicato alla produzione di perossidi organici. Lo stabilimento di Spinetta Marengo è soggetto al D.lgs. 105/15, che recepisce la Direttiva Europea Seveso III 2012/18/UE sulla prevenzione e controllo dei rischi di incidenti rilevanti causati da sostanze pericolose. L'impianto è caratterizzato da un numero molto elevato di sostanze utilizzate, da processi chimici altamente diversificati e da una grande quantità di apparecchiature di processo, molte delle quali risalgono all'avvio della produzione dell'impianto nel 1976. Da qui la necessità di migliorare l'affidabilità e la sicurezza delle apparecchiature, combinando moderne

strategie di manutenzione come l'ispezione Risk Based Inspection (RBI) [1] con controlli NDT non distruttivi avanzati, come le Emissioni Acustiche (EA), che consentono l'identificazione precoce dei punti deboli delle apparecchiature.
Le Emissioni Acustiche sono state utilizzate per verificare lo stato di due serbatoi interrati, di difficile accesso per l'ispezione, D128 per lo stoccaggio di Metiletilchetone (MEK) e D306 per lo stoccaggio di Eptano (n-eptano).
Di seguito in Tabella 1 i dati e le caratteristiche dei serbatoi D128 e D306

	Serbatoio D128	**Serbatoio D306**
Sostanza stoccata	Metiletilchetone CH_3COC_2H	n-Eptano C_7H_{16}
Materiale	Alluminio 99.5%	Fe 44 B UNI 7070
Temperatura di progetto	40°C	50°C
Temperatura di esercizio	Ambiente	Ambiente
Pressione di progetto	Idrostatica	Vuoto/Idrostatica
Pressione di esercizio	Atmosferica	Atmosferica
Capacità	50 m^3	52 m^3
Diametro	2800 mm	2800 mm
Lunghezza	7700 mm	9420 mm
Spessore corpo	9 mm	10 mm
Spessore fondo	10 mm	10 mm
Rivestimento	Bitume	Nessuno
Anno di costruzione	1976	1980

Tabella 1 - Dati serbatoi di stoccaggio D128 e D306

2. Descrizione metodo delle Emissioni Acustiche

Il controllo con Emissione Acustica (EA) è un metodo di valutazione e monitoraggio non invasivo che permette di individuare e localizzare in anticipo i punti deboli di varie apparecchiature e recipienti a pressione.
Il metodo si basa sulla rilevazione di segnali ultrasonori provenienti dal recipiente oggetto della prova, mediante dei sensori piezoelettrici, durante una prova di pressurizzazione, secondo quanto stabilito dalle norme di riferimento.
I sensori vengono attaccati sul corpo dell'oggetto di prova mediante dei supporti magnetici.
I sensori trasformano le onde sonore in segnali elettrici. I segnali preamplificati, provenienti dal recipiente, sono inviati ai canali di ingresso del sistema di acquisizione dati attraverso dei cavi coassiali a bassa impedenza. Il sistema di acquisizione viene impiegato per memorizzare processare e rappresentare i dati acquisiti anche in tempo reale.
Il controllo con Emissione Acustica fornisce un'analisi istantanea completa sulla struttura e sull'integrità dell'oggetto testato. Per l'individuazione e la localizzazione di

eventuali danneggiamenti, il controllo con Emissione Acustica ricorre a un principio fisico classico, quello delle onde elastiche generate dal materiale in esame sottoposto a sollecitazione, che consiste nell'acquisizione ed elaborazione dei dati attraverso un sofisticato modello tecnologico [2].

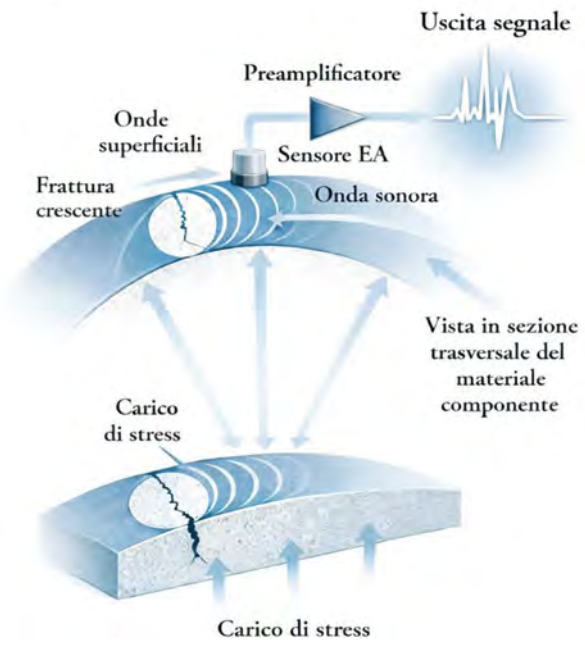


Figura 1. Schema funzionamento EA

I segnali acustici emessi durante la verifica sono dovuti alla presenza di difetti strutturali o danneggiamenti dell'apparecchiatura. Se un componente viene sottoposto a sollecitazione, la tensione generata si scarica spontaneamente sul punto debole producendo un impulso acustico. L'energia inviata viene rilevata e registrata da sensori applicati sulla superficie del recipiente, come mostrato in Figura 1.
La misurazione delle differenze dei tempi di arrivo dei segnali ai vari sensori, la velocità di propagazione del suono e la posizione dei sensori sono i parametri principali di un algoritmo per la localizzazione della sorgente dell'emissione acustica.
Uno dei vantaggi principali del controllo con Emissione Acustica è la possibilità di ispezionare recipienti a pressione durante l'esercizio o durante i fermi macchina causati da difetti ai materiali, perdite e corrosioni attive.
L'affidabilità delle informazioni ottenute tramite EA sull'integrità strutturale del componente testato è maggiore rispetto ai più tradizionali metodi di verifica.

3. Applicazione Emissioni Acustiche su serbatoi D128 e D306

Di seguito vengono descritti in sequenza tutte le operazioni per la verifica dello stato dei serbatoi D128 e D306 con le Emissioni Acustiche:

1) Definire i punti più adatti al posizionamento dei sensori, per avere una completa affidabilità della prova, secondo quanto specificato dalle norme di riferimento [3].

2) Rimuovere il rivestimento o la coibentazione nei punti in questione in modo da posizionare i sensori direttamente in contatto con il nudo metallo, vedi Foto 1 e 4;
3) Posizionare i sensori sulla struttura utilizzando degli opportuni supporti magnetici o collanti adeguati, vedi Foto 2 e 3;



Foto 1. Vista di insieme D128, lato Est



Foto 2. Applicazione sensori piezoelettrici D128 lato Ovest



Foto 3. Applicazione sensori piezoelettrici D128



Foto 4. Vista di insieme D306, lato Est

4) Collegare gli stessi, mediante cavi coassiali a bassa impedenza, alla strumentazione;
5) Eseguire il settaggio della strumentazione per l'acquisizione dati e verificare la correttezza dei collegamenti sensori – canali, in base al progetto di prova;
6) Misurare il rumore di fondo prima dell'esecuzione della prova per circa 10-15 min e valutare i risultati ottenuti.
7) Eseguire una verifica della calibrazione della catena di misura e verificare la localizzazione delle sorgenti ottenute al fine di ottenere dei risultati affidabili, (Eseguire il calcolo della velocità della propagazione delle onde sonore nel

materiale metallico). Iniziare la prova, controllando e valutando i dati in tempo reale. Durante l'intera prova, monitorare costantemente il rumore di fondo prodotto dal sistema di pressurizzazione per evitare che possa influenzare i risultati della stessa.

8) Pressurizzare il serbatoio con azoto, come specificato dalle norme di riferimento [4]. Effettuare la pressurizzazione del recipiente con una velocità costante, inferiore allo 0,5% della pressione massima di prova, partendo dalla pressione iniziale presente nel serbatoio fino a raggiungere il 110% della massima pressione di esercizio registrata nell'ultimo anno, (il valore della pressione massima di pressurizzazione deve sempre essere inferiore alla pressione massima PS) come mostrato nel Grafico 1. La pressione massima di lavoro dei serbatori D128 e D306 è di 280 mmbar quindi la pressione massima della prova di pressurizzazione è stata di 310 mmbar pari al 110% della massima pressione di lavoro.

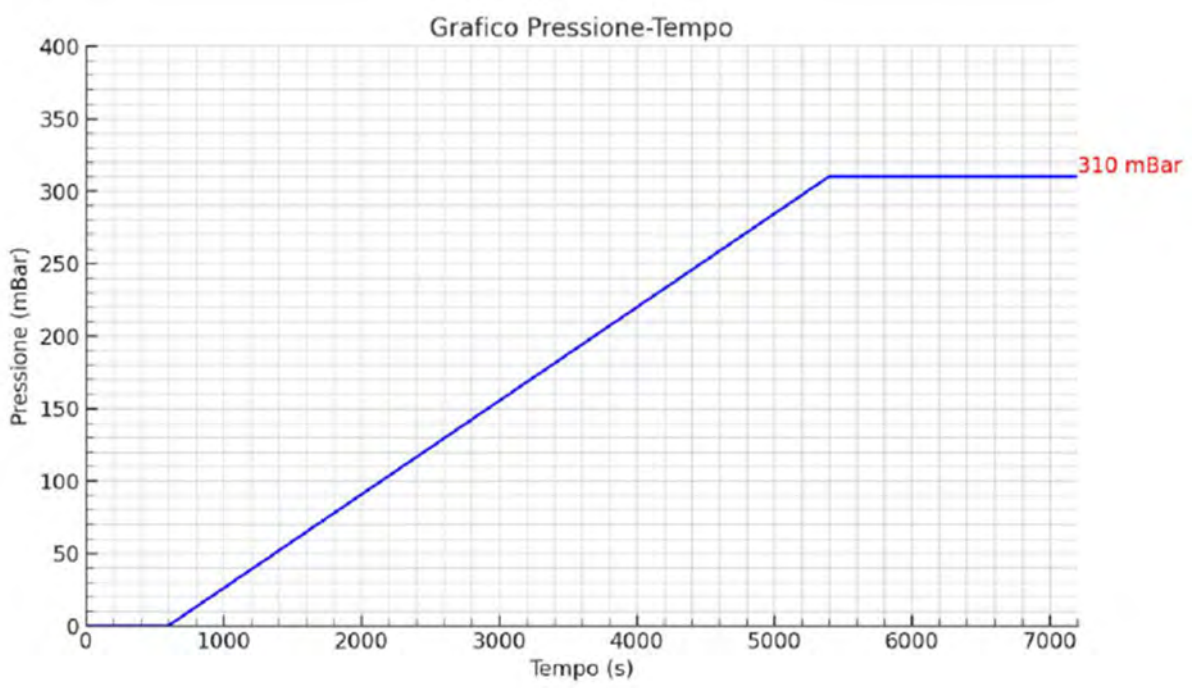


Grafico 1 - Pressurizzazione serbatoio D128 e D306

Al raggiungimento della pressione finale, mantenere la pressione ed eseguire un monitoraggio costante dei dati di prova per un tempo minimo di 30 minuti.
Eseguire nuovamente una calibrazione della catena di misura e verificare la localizzazione delle sorgenti. Comparare i dati con la calibrazione eseguita precedentemente.

3.1 Rumore di fondo prima dell'inizio della prova

Prima dell'inizio della prova è stato monitorato il rumore di fondo per un tempo di 20 minuti. Durante la fase di registrazione del rumore di fondo iniziale non sono stati registrati segnali significativi a conferma dell'assenza di disturbi di qualsiasi natura

che avrebbero potuto inficiare la prova di emissione acustica [5]. Il valore medio del rumore di fondo registrato per ogni canale è risultato inferiore ai 5 microvolt, vedi Grafico 2.

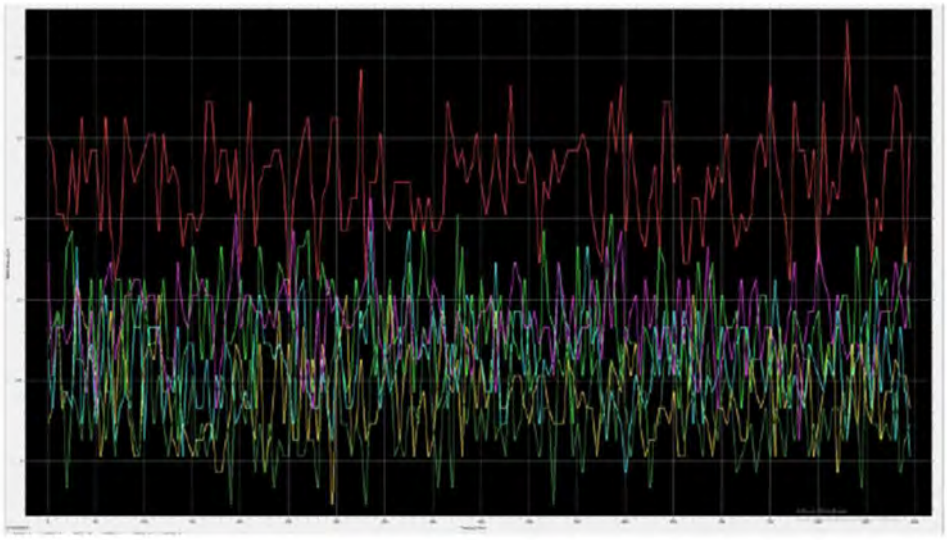


Grafico 2 – Rumore di fondo antecedente la prova

3.2 Rumore di fondo durante la prova

Il valore massimo raggiunto è risultato di 4 microvolt per il serbatoio D128 e 9 microvolt per il serbatoio D306. Il monitoraggio dei segnali in termini di Ampiezza Tempo, ci ha permesso di valutare che il sistema di pressurizzazione poteva introdurre dei falsi segnali di Emissione Acustica di facile individuazione visto il punto di pressurizzazione, vedi Grafico 3.

D128 **D306**

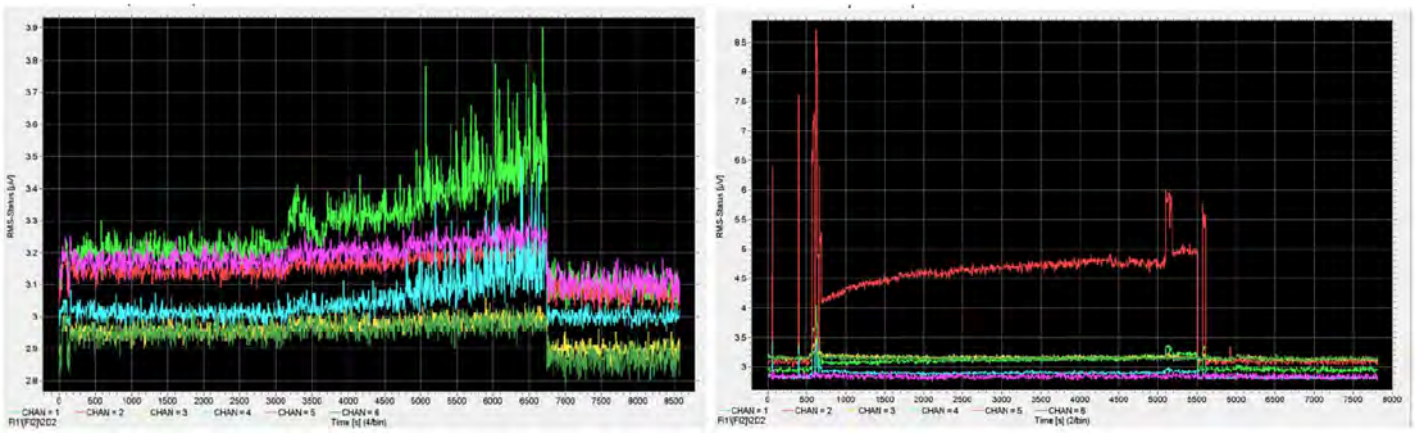


Grafico 3 – Rumore di fondo durante la prova Serbatoio D128 e D306

4. Installazione dei sensori

Un limite nell'applicazione delle Emissioni Acustiche nei serbatoi interrati è rappresentato dalla difficoltà di accedere alla superficie esterna dei serbatoi per l'applicazione della sensoristica; infatti, la superficie dei serbatoi risulta essere completamente coperta dal terreno. L'accesso alla superficie esterna dei serbatoi necessita della rimozione del terreno di copertura che circonda i serbatoi. La rimozione del terreno comporta degli scavi per poter scoprire il serbatoio e la successiva rimozione del materiale di rivestimento dei serbatoi per consentire una perfetta aderenza dei sensori alla superficie metalliche. Operazioni con un potenziale alto rischio per la sicurezza, trattandosi di lavori in spazio confinato, e dispendiose da un punto di vista economico.

L'installazione di speciali canalizzazioni, vedi Figura 2, ha consentito di ovviare a queste attività di scavo e rimozione del rivestimento serbatoi.

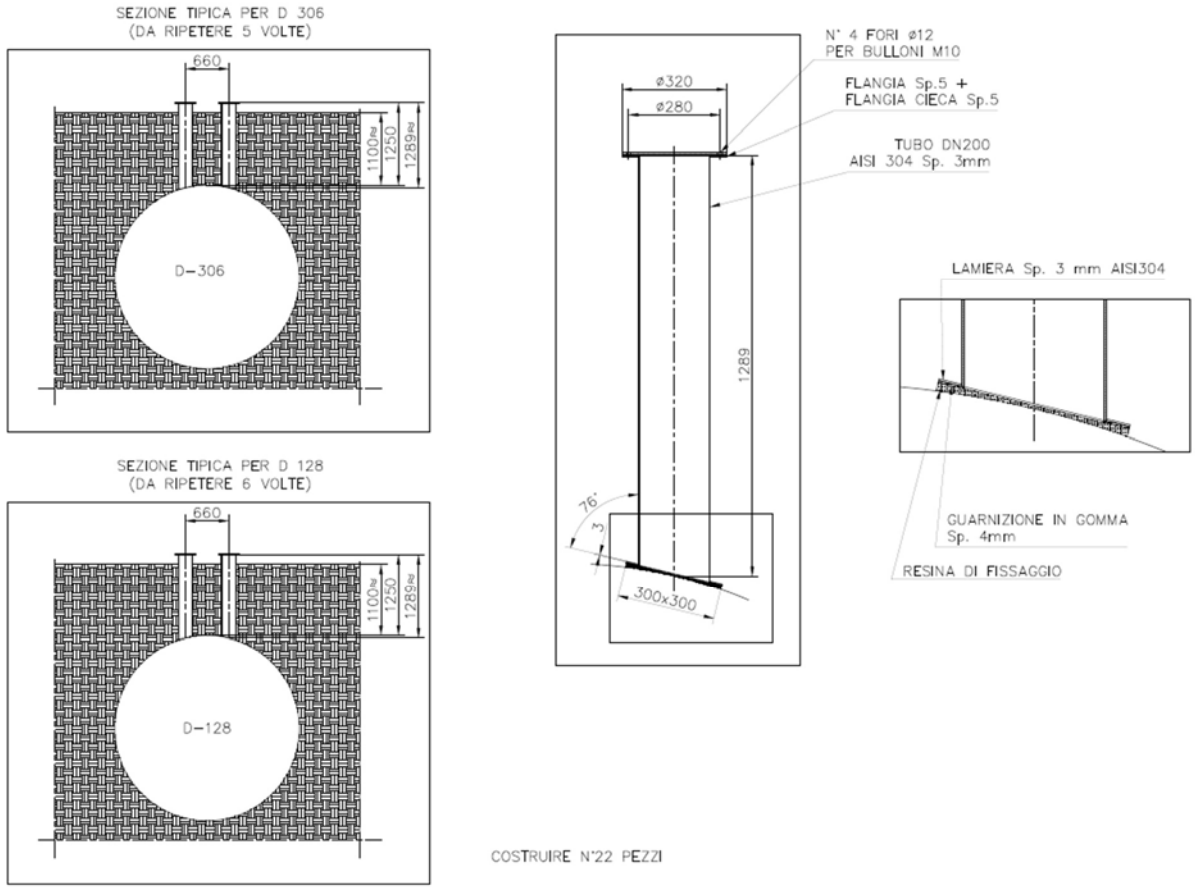


Figura 2. Dettaglio canalizzazioni

L'installazione di queste canalizzazioni, vedi Foto 5, ha reso accessibile l'installazione dei sensori piezoelettrici direttamente dal piano campagna, evitando scavi e lavori in



Foto 5. Installazione canalizzazioni

spazi confinati riducendo i costi delle operazioni e il rischio per la sicurezza degli operatori senza compromettere la qualità delle Emissioni Acustiche.

5. Risultati Emissioni Acustiche

La procedura di ispezione per le Emissioni Acustiche, basandosi sulla specifica norma [3], usando la localizzazione delle sorgenti e l'intensità delle Emissioni Acustiche rilevate dalle prove ha permesso di dettagliare lo stato dei serbatoi sulla base della classificazione riportata in Tabella 2.

Grado	Descrizione delle sorgenti	Consigli/richieste e Intervallo riesame serbatoio
A	Difetti minori non rilevanti	Nessun controllo non distruttivo complementare necessario. Si consiglia di eseguire un nuovo test con EA entro un periodo massimo di 5 anni
B	Difetti minori da tenere in considerazione nei test futuri	Nessun Controllo non distruttivo complementare necessario. Si consiglia di eseguire un nuovo test con EA entro un periodo massimo di 3 anni

C	Difetti medi	Nessun Controllo non distruttivo complementare necessario. Si consiglia di eseguire un nuovo test con EA entro un periodo massimo di 1 anni
D	Difetti gravi	Alla fine del controllo con EA si richiede di eseguire ulteriori controlli non distruttivi complementari sulle indicazioni riscontrate
E	Difetti molto gravi	Fermare la prova, svuotare dal prodotto ed eseguire dei controlli non distruttivi complementari sulle indicazioni riscontrate.

Tabella 2 - Classificazione sorgenti EA

Serbatoio D128: In base all'attività acustica riscontrata durante la prova e alla localizzazione delle sorgenti, il serbatoio è stato classificato come Grado A. Si consiglia di eseguire un nuovo controllo con Emissione Acustica entro un periodo massimo di 5 anni e di tenere in conto le sorgenti localizzate nelle prossime ispezioni.

Serbatoio D306: In base all'attività acustica riscontrata durante la prova e alla localizzazione delle sorgenti ottenuta, il serbatoio è stato classificato come Grado B. Si consiglia di eseguire un nuovo controllo con Emissione Acustica entro un periodo massimo di 3 anno e di tenere in conto le sorgenti localizzate nelle prossime ispezioni.

6. Conclusione

Le Emissioni Acustiche sono risultati essere degli efficaci controlli non distruttivi per monitorare lo stato di integrità dei serbatoi interrati, in particolar modo se dotati di specifiche canalizzazione per l'installazione dei sensori direttamente dal piano campagna.
Esse permettono di localizzare eventuali danneggiamenti dei serbatoi, consentendo un monitoraggio costante delle apparecchiature, senza necessità di svuotamenti e bonifiche delle stesse.
Basandosi sulla classificazione delle sorgenti di emissione con i relativi intervalli di riesame è possibile aggiornare il livello di rischio delle apparecchiature secondo una strategia di manutenzione ispettiva basata sul rischio di tipo RBI [1].

Bibliografia

[1] E. Tassinario, A. Urso, Applicazione della metodologia RBI all'industria chimica, Convegno SAFAP 2023.
[2] UNI EN 13554-11 Non-destructive testing — Acoustic emission — General principles
[3] UNI EN 14584 -13 Examination of metallic pressure equipment during proof testing - Planar location of AE sources.
[4] ASME SEZ. 5 ART. 12: 2023 Acoustic Emission examination of metallic vessels during pressure testing
[5] ASTM E 569: 2017 Standard Practice for Acoustic Emission monitoring of structures during controlled stimulation.
[6] UNI EN 13477-1-03, Non-destructive testing — Acoustic emission — Equipment characterization — Part 1: Equipment description
[7] UNI EN 13477-2-10, Non-destructive testing — Acoustic emission — Equipment characterization — Part 2: verification of operating characteristics

La taratura delle valvole di sicurezza – comparazione tra metodi

[1]S. Bianchini

[1]UO Verifiche Macchine e Impianti – USL Toscana Nord Ovest

Sommario
Il microcosmo della manutenzione e prova delle valvole di sicurezza ha avuto negli ultimi anni un forte impulso. La revisione alla UNI 10197 del 2023, in cui è chiaramente ribadita la modalità di taratura e le prove a cui sottoporre la valvola, sta portando ad un allineamento nelle modalità di prova delle stesse. La presente memoria è il resoconto di uno studio sperimentale comparato tra i metodi di taratura più utilizzati: quello del primo soffio udibile e quello che prevede la flangia e il bicchiere, prendendo come riferimento corretto il metodo del primo soffio udibile e verificando gli scostamenti in termini di pressione di taratura. Lo studio è stato realizzato effettuando tarature comparate sulla medesima valvola. La taratura comparata ha riguardato un totale di 67 valvole. I risultati dello studio mostrano che nel 66% dei casi il metodo di taratura è indifferente (valori inferiori al 3%), nel restante 34% dei casi invece la taratura è superiore al 3% con massimo pari al 10,6%.

1. Introduzione

Da un sondaggio fatto dal sottoscritto qualche anno fa tra i tecnici ex-ANCC (ASL, ARPA, ATS e INAIL) del centro/nord Italia è emerso che il metodo in più usato per la taratura era quello di mettere una flangia cieca con tubo e bicchiere d'acqua verificando quindi la fuoriuscita di bolle. Seguivano poi il metodo del primo soffio udibile e altri metodi come quello di usare uno straccio bagnato sull'uscita della valvola a formare un tappo, aspettando che lo stesso si "gonfiasse". Alcuni tecnici, per valvole più piccole, usavano fare un "tappo" di acqua e sapone al posto dello straccio bagnato. Le differenti tecniche si sono sviluppate nonostante le norme abbiano sempre proposto il metodo del soffio come unica modalità di taratura: nella UNI 10197 del 1993 si legge che "il raggiungimento della pressione di taratura si manifesta con la fuoriuscita sensibile attraverso le sedi della valvola, del fluido di prova, determinabile con l'udito"; la API 576 Inspection of Pressure - Relieving Devices- dice che tale pressione si definisce con un "initial audible discharge", la circolare tecnica ISPESL 01/05 "Linea guida per le operazioni di taratura…" scrive che la valvola deve essere fissata al banco con la connessione di uscita aperta all'atmosfera…e che Il raggiungimento della pressione di taratura si manifesta . ascoltando il soffio; per ultimo nella Raccolta E troviamo che la prova deve essere fatta in contropressione atmosferica. Anche i costruttori sono sempre stati in accordo con tali indicazioni: in qualsiasi manuale nella parte di manutenzione la taratura viene definita con il metodo del primo soffio udibile mentre la prova con la flangia, bicchiere e acqua la troviamo nella parte dedicata alla tenuta delle sedi: il riferimento "universale" è di

fatto la norma API 527 “Seat Tightness of Pressure Relief Valves” in cui i costruttori si impegnano a vendere dispositivi che abbiano perdite entro i limiti della norma (alcune marche garantiscono perdite ancor più limitate).
Il settore era così eterogeneo che per fare chiarezza nel 2023 è stata emessa una revisione della norma UNI 10197 - VALVOLE DI SICUREZZA: PROCEDURA DI PROVA E REQUISITI DEI BANCHI PROVA, in cui si ribadisce che le modalità di taratura debbano avvenire secondo le indicazioni dei fabbricanti, in mancanza di queste informazioni per fluidi compressibili deve essere usato il metodo del primo soffio udibile. Quindi visto che i fabbricanti prevedono che la taratura avvenga con il primo soffio udibile, il principio sancito è che la taratura a banco debba avvenire con questo metodo, per qualsiasi valvola.
Allo scopo di verificare le differenze tra i metodi è stato condotta una campagna di “tarature” comparate, prendendo come riferimento corretto il metodo del primo soffio udibile. Nella memoria inoltre è dato spazio alle caratteristiche fondamentali di una valvola: dalla API 527, al setting di fabbrica di una valvola: pressione di taratura e scarto in chiusura.

2. Il problema della tenuta delle sedi: la API 527

Le valvole a otturatore metallico, non hanno una tenuta perfetta, ma possono presentare perdite a pressioni inferiori di quella di taratura, quindi a valvola ancora chiusa. La questione perdite è affrontata a livello commerciale da ogni azienda: nel manuale di ogni valvola viene definita la perdita ammessa a valvola nuova. La norma di riferimento per i costruttori è la API 527.

2.2 API 527 Seat Tightness of Pressure Relief Valves

La tenuta delle sedi delle valvole di sicurezza deve essere effettuata a pressione pari a 90% della pressione di taratura. Sull’uscita della valvola deve essere montato un dispositivo come in figura 1, il tubo deve avere un diametro esterno pari a 7,9 mm ed uno spessore di 0,89 mm che porta quindi ad un diametro interno di circa 6,1 mm e deve essere immerso per 12,7 mm in acqua.

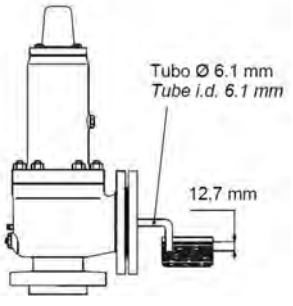


Table 1—Maximum Seat Leakage Rates for Metal-Seated Pressure Relief Valves

Set Pressure at 15.6 °C (60 °F) kPa (psig)	Orifice Diameter Less Than or Equal to 18 mm (0.700 in)		Orifice Diameter Greater Than 18 mm (0.700 in)	
	Leakage Rate (Bubbles/min)	Approximate Leakage/24 hr Standard m^3 (ft^3)	Leakage Rate (Bubbles/min)	Approximate Leakage/24 hr Standard m^3 (ft^3)
13 to 6896 (15 to 1000)	40	0.017 (0.60)	20	0.0085 (0.30)
10,300 (1500)	60	0.026 (0.90)	30	0.013 (0.45)
13,800 (2000)	80	0.034 (1.20)	40	0.017 (0.60)
17,200 (2500)	100	0.043 (1.50)	50	0.021 (0.75)
20,700 (3000)	100	0.043 (1.50)	60	0.026 (0.90)
27,600 (4000)	100	0.043 (1.50)	80	0.034 (1.20)
34,400 (5000)	100	0.043 (1.50)	100	0.043 (1.50)
41,400 (6000)	100	0.043 (1.50)	100	0.043 (1.50)

Figura 1

Le perdite ammesse sono definite dalla tabella 1 (estratto API 527): quindi se per esempio la pressione di taratura della valvola è 10 barg, si porta il banco al 90% e quindi a 900 kPa e si contano le bolle che fuoriescono dal bicchiere. Le bolle al minuto non devono essere superiori a 40 per orifizi più piccoli e 20 per gli altri.

2.3 Considerazioni in merito alla API 527

La norma definisce le perdite ammesse alla pressione del 90% di quella di taratura, ciò non significa però che la valvola non possa presentare perdite al di sotto di tale valore. La valvola commercialmente è idonea anche se presenta perdite limitate a valori anche inferiori del 90%. Per quanto riguarda il diametro del tubo è stato osservato sperimentalmente che l'utilizzo del diametro prescritto dalla norma risulta fondamentale per il corretto conteggio delle bolle: diametri inferiori portano a parità di valvola e pressione di prova, alla formazione di un numero maggiore di bolle al minuto e viceversa per diametri superiori.
Anche la profondità di immersione può essere fondamentale: durante i test è stato rilevato, seppur in un numero limitatissimi di casi, che tenendo costante la pressione del banco, la sola variazione di profondità di meno di 2 cm portava a situazioni di fuoriuscita di bolle completamente differente: da 5 bolle al minuto (immagine a sinistra) al "gorgogliamento" continuo (immagine di destra).

		La sola variazione di contropressione di poco meno di 2 millibar può influire in maniera significativa sulla riuscita di questa prova, non basta quindi immergere il tubo in acqua ma bisogna essere certi che la profondità di immersione sia corretta.

3. Modalità di taratura usate

Come già detto precedentemente è stato effettuato un sondaggio per conoscere le modalità di taratura. Il sondaggio è stato effettuato per le regioni del centro-nord Italia. Dal sondaggio è emerso che il metodo di taratura più usato era quello della flangia tubo bolle e acqua poi veniva il metodo del primo soffio udibile poi a seguire qualche operatore usava lo straccio bagnato a "tappare" l'uscita della valvola e infine in qualche isolato caso è stata usata acqua e sapone sempre a formare una sorta di tappo. Nel seguito saranno descritte brevemente solo le prime due modalità.

3.1 Uso della flangia tubo e bicchiere d'acqua.

L'attrezzatura utilizzata è quella della API 527. La prova consiste nell'incrementare la pressione fintantoché non fuoriesce la prima bolla nel bicchiere, dopodiché si diminuisce la pressione fino alla scomparsa delle stesse. Quindi si definisce la pressione di taratura come quella pressione a cui compare la prima bolla e pressione di chiusura quella corrispondente alla scomparsa delle stesse. In alcuni casi qualche operatore non si limita alla prima bolla ma porta la valvola al gorgogliamento definendo la pressione corrispondente come valore di taratura.

3.1.1 Considerazioni sul metodo

Il metodo sicuramente è usato per la sua facilità, non ha bisogno di formazione specifica da parte dell'ispettore che assiste alla taratura la quale si può effettuare anche in presenza di rumore di fondo importante. Il metodo delle bolle però è falsato da due fenomeni: il primo è la perdita causata dalla tenuta delle sedi e l'altro è il trafilamento derivato dall'innesco del fenomeno del simmer. Inoltre il valore di chiusura non è corretto ma è semplicemente il valore di pressione per il quale le perdite non sono più evidenti.

3.1.2 Il simmer point nei banchi di taratura

Il simmering di una valvola è quella zona di pre-apertura in cui la valvola inizia a perdere in modo continuo o intermittente. Si manifesta nei pochi punti percentuali al di sotto della pressione di taratura (in genere inizia al 2% ma in alcune valvole può manifestarsi anche al 6% sotto [1]). L'otturatore non entra mai in piena apertura ma vibra, in modo quasi pivottante sulla sede dell'ugello. Questa vibrazione produce un suono ad alta frequenza, spesso descritto come un grido acuto. Il simmering è un fenomeno di bassa alzata al contrario del chattering che avviene invece in fase di apertura dinamica, a valvola aperta, tipicamente in presenza di contropressione elevata (costante o variabile) oppure quando la valvola lavora a portate molto inferiori rispetto alla sua capacità, indicativamente sotto il 30–40% della portata massima: in questi casi la valvola entra in un regime instabile di apertura/chiusura rapida con urti marcati. Tutti e due i fenomeni portano, seppur in maniera differente ad un danneggiamento delle sedi.

Il fenomeno del simmering non riesce a svilupparsi nei banchi di taratura nella sua nella sua completezza. La capacità e rigidità del sistema di prova non permette di apprezzare questo fenomeno, come non permette di seguire la valvola in apertura dinamica. La portata limitata del banco non genera le vibrazioni caratteristiche del simmer. In questo caso però al raggiungimento della simmer pressure normalmente è associato un semplice trafilamento che si va ad aggiungere alle perdite. Il tutto potrebbe portare ad un effetto gorgogliamento nel bicchiere ancor prima della pressione di taratura. Proprio per evitare i trafilamenti da simmering che la prova API 527 viene effettuata al 90% della pressione di taratura e non a valori più elevati.

3.2 Metodo del primo soffio udibile

Il metodo è molto semplice, si lascia lo scarico della valvola aperto e si incrementa la pressione fintantoché la valvola emette il "primo soffio udibile", cioè un sibilo generato dal distacco dell'otturatore dal seggio. La pressione di taratura è definita proprio quella in cui la valvola si trova in questa situazione. E' buona cosa una volta arrivati alla pressione di taratura incrementare ulteriormente tale valore per verificare i cambiamenti nell'intensità del sibilo all'aumentare della stessa.

3.2.1 Considerazioni sul metodo

Il metodo è leggermente più difficoltoso da attuare in quanto può sembrare banale ma avere un ambiente con rumore di fondo adeguato al test non sempre è facile da ottenere, inoltre l'operatore deve avere una formazione specifica soprattutto per valvole hanno problemi di corrosione e di integrità delle sedi, come quelle del petrolchimico. Il tipo di sibilo emesso, in termini di intensità e costanza al variare della pressione, spesso offre delle informazioni sullo stato delle sedi e sulla conformità di lavorazione delle stesse.

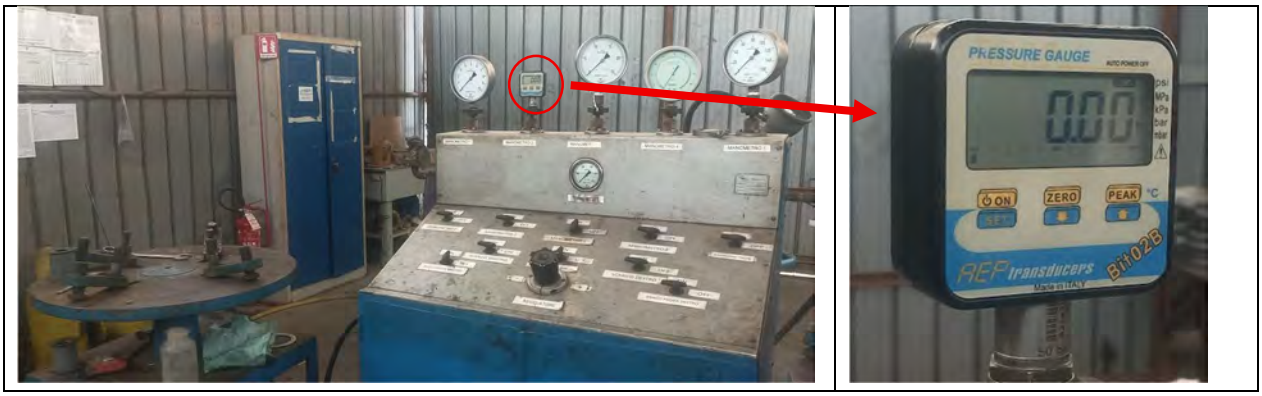
Schematicamente si possono presentare i seguenti casi al raggiungimento della pressione di taratura:

- Valvola che emette un singolo colpo deciso, di elevata intensità sonora (fastidioso all'udito). In questo caso siamo in presenza di sedi con lavorazioni buone, anche la tenuta API 527 da valori entro la norma. Se provassimo ad alzare tutto l'anello di blowdown e incrementare la pressione del banco gli scoppi sarebbero periodici, una sorta di chattering a bassa frequenza (attorno a 3 hz) con valori di alzata che arrivano anche al 30/40% dell'alzata totale. Se si presenta un caso del genere è bene controllare che l'anello di blowdown sia regolato secondo il certificato della valvola.
- Valvole che emette in prima apertura un sibilo netto continuo, di buona intensità sonora, intensità che rimane costante all'aumentare della pressione. Questa è la situazione di molte valvole nuove, ciò indica che le sedi sono pressoché perfette, la lavorazione quindi conforme e spesso in questi casi la valvola presenta perdite secondo API 527.
- Valvola che emette un sibilo di intensità sonora mediocre, si di distingue facilmente ma all'aumentare della pressione di taratura lo stesso acquista intensità. In questo caso la pressione di taratura si determina facilmente ma potrebbero esserci problemi di tenuta delle sedi.
- Valvola che emette un sibilo costante di scarsa intensità, si prova incertezza e difficoltà a definirlo e aumentando la pressione l'intensità continua ad essere bassa. In questo caso la valvola ha sicuramente grossi problemi di tenuta, consigliabile una prova API 527 e le sedi quasi sicuramente non sono più idonee. In genere si può prevedere la sostituzione della valvola oppure la sola sostituzione dell'otturatore e del boccaglio.

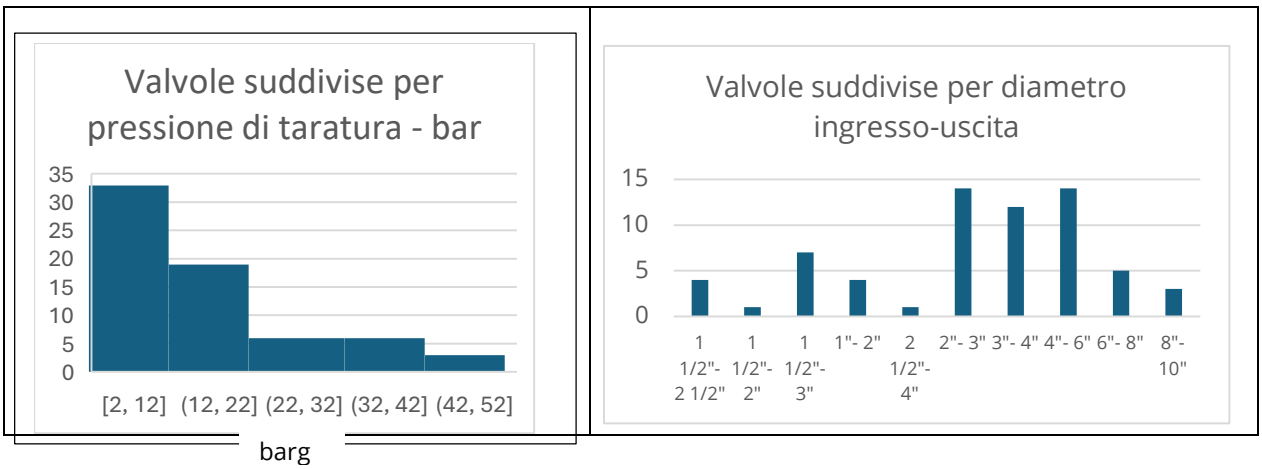
Durante le operazioni di taratura, inoltre, lo scarico è aperto ed è possibile verificare la pulizia della parte del corpo valvola visibile, verificare la presenza di eventuali corrosioni o incrostazioni. Dettagli fondamentali per avere un'idea della bontà della manutenzione effettuata. Una valvola che presenti residui di qualsiasi natura nel corpo valvola non dovrebbe essere usata.

4. Prove comparative

Al fine di verificare gli scostamenti tra i metodi di taratura sopradescritti sono state condotte una serie di determinazioni comparative su medesime valvole sfruttando normale banco da taratura.



Per il test è stato usato un manometro digitale marca AEP classe di precisione 0,2% fondo scala 50 bar. Sono state sottoposte ad un test comparativo 67 valvole, tutte "usate" e tutte, con otturatore metallico, per un range di taratura che va da 2,0 bar a 44,9 bar, la suddivisione per pressione di taratura è riportata nel diagramma a barre.

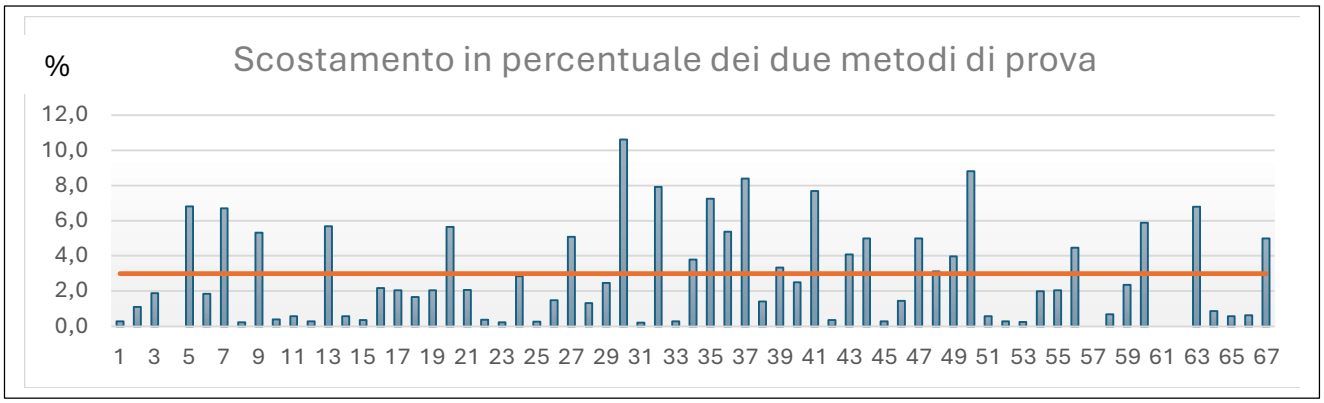


Il test è avvenuto nel seguente modo: una volta manutenuta la valvola è stata preparata con una taratura a "orecchio" dall'operatore dell'officina. A questo punto, senza conoscere la pressione di taratura, veniva montata l'attrezzatura API 527: quindi flangia tubo e bicchiere e veniva definita la pressione di apertura cercando di cogliere non la prima bolla formata ma il fenomeno del gorgogliamento. Dopodiché

si levava la flangia e si sottoponeva la valvola ad una nuova pressurizzazione definendo la pressione di apertura con il metodo del primo soffio udibile.

4.1 Risultati test

Il risultato del test è il seguente: la pressione di apertura determinata con le bolle è risultata sempre uguale o inferiore rispetto a quella del primo soffio udibile. Lo scarto medio tra le due pressioni è relativamente basso pari a 2,7 %, in molti casi le pressioni coincidono. L'andamento dello scarto in percentuale tra i due metodi è riportato nel grafico, nel quale viene riportata la linea corrispondente al 3% (tolleranza definita come criterio di accettabilità).



4.2 Considerazioni

Sebbene nella maggior parte dei casi i due metodi convergano con una approssimazione accettabile, esistono casi in cui la differenza non è più accettabile: il valore massimo di scostamento, infatti risulta pari a 10,6 % .Il test è stato fatto cercando di definire la pressione di apertura che risulta mediamente più bassa fatta con le bolle: il che significa che se avessimo dovuto tarare la valvola con questo metodo la pressione di taratura così definita sarebbe superiore rispetto alla taratura a orecchio e quindi il metodo delle bolle va a sfavore della sicurezza. Dalla sperimentazione è emerso che tarando la valvola con le bolle si va ad una pressione che in media è 2,7% maggiore rispetto alla taratura fatta con il soffio udibile arrivando anche picchi del 10,6 %. Quindi il sistema delle bolle non deve essere usato per la taratura delle valvole ma solo per la definizione delle perdite delle sedi.

5 Le operazioni durante la taratura di una valvola.

La taratura è l'ultima fase della manutenzione di una valvola. Dopodiché la stessa è considerata funzionante e può essere rimontata in impianto. La verifica in questo caso non può limitarsi alla definizione della pressione di apertura con il metodo corretto, ma deve prendere in considerazione alcuni aspetti legati all'integrità dei componenti e al settaggio della valvola: durante la verifica di taratura è indispensabile che l'ispettore prenda atto che sia stata effettuata la prova di integrità del soffietto se

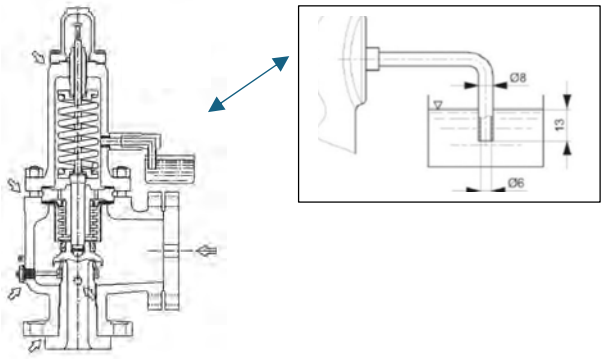
presente e della corretta posizione dell'anello di blowdown: componenti che se non idonei potrebbero inficiare la taratura della valvola e l'efficienza della stessa. Queste operazioni normalmente si fanno con l'acquisizione di una scheda di lavorazione o una check-list prodotta dal manutentore, la norma UNI/TR 11507 del 2023 specifica come deve avvenire la manutenzione dei dispositivi per la limitazione diretta della pressione.

5.1 integrità del soffietto

Il soffietto, se presente, oltre a proteggere alcuni componenti della valvola da agenti corrosivi fa in modo che la stessa possa operare anche in presenza di qualsiasi tipo di contropressione. La sua integrità è fondamentale per controbilanciare tali pressioni. In caso di soffietto danneggiato bisognerà definire la natura e le entità delle contropressioni imposte e sottrarre il valore di contropressione al valore della pressione di taratura. Ciò non sempre è fattibile in quanto il nuovo valore di pressione differenziale di prova potrebbe ricadere al di fuori del campo di regolazione della valvola e quindi la stessa non è più idonea ad essere rimontata. Senza una verifica di integrità del soffietto risulta impossibile procedere alla taratura della valvola.

5.1.1 Prova di tenuta alla pressione secondaria

Le modalità di prova del soffietto sono descritte nella norma UNI 10197: la tenuta del soffietto deve essere valutata collegando, allo sfiato del coperchio (o cappello), un tubo di diametro esterno di 8 mm e spessore 1 mm, immerso in acqua ad una profondità di 13 mm (vedere figura-estratta dalla norma).



Si pressurizza l'uscita della valvola con pressione di prova che deve essere il maggiore tra la contropressione massima indicata nella documentazione a corredo della valvola e 2 barg. La durata della prova è di 1 minuto nel quale non si deve formare alcuna bolla.

5.2 Posizione dell'anello di blowdown

L'anello di blowdown è un componente fondamentale della valvola, avvitato sull'ugello per motivi costruttivi definisce il volume della camera di sovrapressione (huddling chamber). La camera di sovrapressione è il volume formato dalla gonna/deflettore che circonda l'otturatore e dall'anello metallico di blowdown. La pressurizzazione di questa camera inizia ancor prima che la valvola sia in apertura a circa il 98% della pressione di taratura, valore di "simmer pressure". La pressurizzazione completa però arriva dopo l'apertura della valvola. La camera genera una sovrapressione che va ad agire sul deflettore accelerando l'apertura,

diminuendo la pressione di scoppio (pop pressure), garantendo quindi una apertura netta e rapida. La camera di sovrappressione deve essere efficace e ben progettata per garantire assenza di azioni troppo lente di apertura o instabilità della stessa (chattering). Non è quindi un componente accessorio della valvola ma un componente fondamentale. In molte valvole la corretta posizione dell'anello di blowdown garantisce che la sovrapressione sia contenuta al di sotto del 10 %. Quindi la posizione dell'anello è fondamentale per il funzionamento in sicurezza della valvola e l'ispettore deve prendere atto che il setting di fabbrica sia stato rispettato.

5.2.1 Settaggio dell'anello di blowdown

Il corretto posizionamento dell'anello deve essere fatto avendo a disposizione il certificato della valvola e il manuale di uso e manutenzione. Nel certificato si trova il valore di scarto in chiusura e sul manuale d'uso viene invece riportato come raggiungere quel valore di scarto. E' buona norma che l'operatore addetto alla manutenzione dopo aver regolato la posizione dell'anello provveda a piombare con piombo della sua azienda la spina che blocca lo stesso, così come fanno le case costruttrici.

5.3 Altezza del registro di taratura

La posizione del dispositivo di regolazione della pressione da indicazioni molto importanti sullo stato di salute della molla. L'altezza di taratura o meglio la variazione di altezza nel tempo rappresenta l'unica maniera per sapere se la molla abbia mantenuto la sua elasticità (n mancanza di dati pregressi, comunque, se l'altezza del registro è prossima a zero o qualche millimetro la molla deve essere sostituita).
La posizione del dispositivo di blocco della taratura deve essere riportata sul verbale nel caso di prova di taratura con valvola montata sul posto di impiego, secondo la Raccolta E-11.2, mentre non ci sono indicazioni specifiche nel caso di taratura a banco. Nessun costruttore riporta il valore dell'altezza del registro, basterebbe però riportarlo nei verbali di taratura successivi per avere un monitoraggio dello stato di efficienza della molla e sapere quando questa ha perso le sue caratteristiche elastiche; quindi, sarebbe un dato utile da inserire in ogni verbale.

6. Conclusioni

Dai test risulta evidente che la taratura effettuata con la flangia porta a settaggi a sfavore della sicurezza che vanno da qualche punto in percentuale fino ad oltre il 10%. È chiaro oramai che la taratura corretta a banco debba avvenire solo ed esclusivamente con il metodo del primo soffio udibile. Con il metodo del soffio udibile, tra l'altro, è possibile avere informazioni qualitative sulla conformità di lavorazioni delle sedi.
Durante la sperimentazione è emerso che alcuni comportamenti fluidodinamici della valvola hanno caratteristiche difficilmente prevedibili, come quello descritto al paragrafo 2.3 in cui la sola variazione di 2 millibar in scarico porta ad una situazione

di perdite di bolle completamente differenti: da qualche bolla al minuto si passa ad un gorgogliamento continuo.
È chiarito infine che per svolgere una corretta taratura è essenziale che i componenti della valvola siano integri e montati correttamente: il soffietto, per esempio può essere fondamentale ai fini della definizione del valore di pressione differenziale di prova a freddo mentre la corretta posizione dell'anello di blowdown può risultare indispensabile per rispondere ai requisiti di legge (sovrapressione inferiore al 10%).
Va ricordato infine, per completare il quadro legislativo, che la valvola è un'attrezzatura di lavoro e pertanto le modalità di manutenzione e prova devono essere conformi al manuale della stessa così come prescritto dall'art. 71 del d.lgs. 81/08.

Bibliografia

[1] Marc Hellemans - The Safety Relief Valve Handbook, pag. 82

La tecnologia innovativa delle selezionatrici ottiche per ottimizzare il processo di smistamento delle castagne

G. Battista[1], O. Di Donato[1], M. Gaita[1], A. Urso[2], M.M. La Veglia[3]

[1]Inail – Uot di Avellino
[2]Inail – Uot di Alessandria
[3]VV.F. – Dir. Reg.le Campania

Sommario
Le selezionatrici ottiche utilizzano varie tecnologie per distinguere e classificare gli oggetti in base alla loro dimensione, forma, colore e persino alla composizione chimica. Queste macchine utilizzano sensori ottici, telecamere e algoritmi avanzati per analizzare gli oggetti in tempo reale, prendendo decisioni in frazioni di secondo per un ordinamento accurato.
Inoltre, è in crescita anche l'integrazione della tecnologia dell'intelligenza artificiale (AI). Gli algoritmi di intelligenza artificiale analizzano estesi set di dati e prendono decisioni intelligenti, migliorando continuamente la precisione di ordinamento.
Il lavoro vuole presentare l'applicazione di tecniche informatiche avanzate, quali IA, sensori ottici ad alta risoluzione e tecniche di automazione industriale, applicate al settore alimentare per effettuare in modo automatizzato il processo di selezione e smistamento delle castagne in un'azienda ortofrutticola di lunga tradizione avellinese.
A supporto di tale processo vi è un impianto di aria compressa che alimenta la macchina e permette di svolgere rapidamente il processo di smistamento determinando un aumento della produttività e una riduzione di sprechi e costi.

1. Introduzione

Fin dal Medioevo la coltivazione del castagno ha rappresentato una scelta fondamentale per l'economia e la sopravvivenza nelle aree montane. Il castagno, da molti considerato "albero della vita", ha, infatti, rappresentato la principale fonte di sostentamento delle popolazioni montane nei periodi invernali e nei periodi di carestia, e ha avuto un ruolo fondamentale nella vita familiare delle popolazioni rurali.
Furono i monaci benedettini di Cava de' Tirreni, fra il XII ed il XIII secolo, ad intraprendere un'opera di cura e miglioramento dei castagneti da frutto presenti nelle loro proprietà sparse in Campania, cosicché, curando i castagneti nella zona dei monti Picentini, che comprendono le aree interne dell'Avellinese e del Salernitano, trasformarono questa zona, particolarmente vocata per le caratteristiche climatiche e del terreno, nella vera e propria terra d'elezione di questa coltura.
L'azienda "Termino Frutta" di Serino (Av) ha puntato su questa risorsa del territorio cercando di mantenere la sostenibilità e la qualità dei suoi approvvigionamenti,

collaborando con agricoltori locali nel tentativo di proteggere l'ambiente e lo sviluppo sostenibile dell'industria delle castagne.
Per ottenere il prodotto finito e commercializzabile è necessario un processo di lavorazione composto da diverse fasi. Tra queste, il processo iniziale di calibratura e rilevamento delle difettosità delle castagne ha subìto negli anni un'importante evoluzione in quanto la selezione manuale di questo frutto, da parte del personale addetto, è un lavoro alienante, faticoso, stressante, che a volte richiede la ripetizione dello stesso processo per togliere i frutti difettosi perché difficilmente visibili anche dall'uomo.
A questo proposito, sono diventate cruciali in diversi ambiti le macchine per la selezione ottica, aiutando ad aumentare la produttività, a minimizzare gli sprechi e a contenere i costi. Utilizzando tecnologie moderne come sensori ottici, telecamere e algoritmi di intelligenza artificiale, queste apparecchiature hanno trasformato il metodo di cernita. I continui miglioramenti in questi campi faranno in modo che le selezionatrici ottiche svolgeranno un ruolo chiave nel rendere più efficienti e performanti le operazioni, ottimizzando l'efficienza globale delle imprese.

2. Componenti innovativi della selettrice

I sensori ottici sono la spina dorsale delle selezionatrici in esame. Questi sensori emettono luce sugli oggetti che passano attraverso il sistema di smistamento e analizzano la luce riflessa. Misurando l'intensità, la lunghezza d'onda e la polarizzazione della luce riflessa, questi sensori raccolgono dati preziosi sugli oggetti, consentendo loro di separarli in base a criteri predeterminati.
Una parte cruciale delle selettrici è costituita anche dai sistemi di trasporto e di illuminazione; i primi, con un'accurata velocità e precisione, consentono ai sensori e alle telecamere di acquisire i dati necessari e quindi svolgono un ruolo significativo nell'efficienza complessiva del processo di smistamento mentre sistemi di illuminazione avanzati garantiscono una visibilità ottimale, migliorando la precisione dei dati catturati dai sensori.
Le telecamere ad alta risoluzione catturano immagini degli oggetti in tempo reale. Sono posizionate strategicamente a varie angolazioni per raccogliere dati completi per un ordinamento accurato. Abbinate a sistemi avanzati di elaborazione delle immagini, le analizzano, estraggono le caratteristiche necessarie e le confrontano con i parametri predefiniti.

3. L'aria compressa nel contesto dell'industria 4.0

L'aria compressa gioca un ruolo cruciale in molti aspetti della vita moderna. Il motivo principale per cui i compressori d'aria sono così comuni rispetto ad altre fonti di energia è la loro capacità di produrre aria compressa direttamente sul posto. Inoltre, i compressori d'aria possono essere dotati di una vasta gamma di accessori per soddisfare le esigenze dell'intero settore industriale, assicurando al contempo una qualità, una pressione e un flusso adeguati alle singole necessità.

L’aria compressa è diventata tanto importante, in ambito industriale, da essere considerata la quarta fonte di energia al pari di elettricità, gas e acqua.
Quasi tutte le attività, piccole o grandi che siano, utilizzano l'aria compressa come fonte di energia per le operazioni essenziali relative alle loro specifiche applicazioni.
Aria compressa significa aria che è stata portata a una pressione che supera quella dell'atmosfera circostante. Non è diversa dall'aria che respiriamo, tranne per il fatto che il suo volume è ridotto e viene mantenuta sotto pressione.
L'aria è composta per il 78% da azoto, per il 20-21% da ossigeno e per circa l'1-2% da una combinazione di altri gas e vapore acqueo. Quando l'aria subisce il processo di compressione, la sua composizione gassosa rimane la stessa, ma è forzata a occupare un volume minore.
Grazie alla sua capacità di essere conservata ad alta pressione, l'aria compressa rappresenta un metodo molto efficace per trasferire energia ed essendo inoltre più facile da usare e più sicura rispetto ad altre opzioni come il vapore e le batterie, è una delle fonti di energia più utilizzate.
Nel caso in esame, l’impianto di aria compressa è integrato nel processo di selezione delle castagne, in particolare durante la fase di “espulsione selettiva” mediante selettrice ottica.
Le macchine di smistamento ottico utilizzano una varietà di tecniche per classificare gli oggetti in modo efficiente. Alcune includono l'ordinamento per colore, per dimensione, per forma, per difetti e persino l'ordinamento per composizione del materiale. Queste tecniche possono essere combinate o utilizzate singolarmente, a seconda delle esigenze del settore.

4. Descrizione dell’impianto aria compressa

La produzione dell’aria compressa avviene tramite un semplice impianto (Figura 1) costituito da un compressore a vite, dimensionato in modo che la portata d’aria risulti sufficiente alla macchina selezionatrice, due serbatoi di accumulo con relative valvole

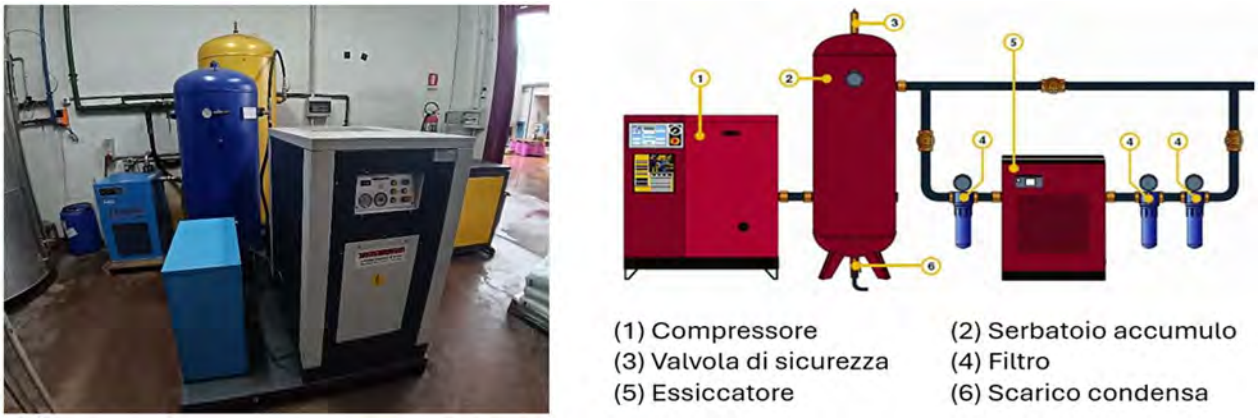


Figura 1. Impianto a servizio della selezionatrice e schema-tipo impianto produzione aria compressa

di sicurezza e un refrigeratore finale in grado di raffreddare l’aria per ridurre la presenza d’acqua prima di immettere l’aria nelle tubazioni.

Attraverso il filtro e la valvola di aspirazione, l'aria atmosferica entra nel gruppo vite con profilo sigma. Il gruppo vite è azionato da un motore elettrico ad alta efficienza. Il fluido di raffreddamento iniettato in fase di compressione viene separato dall'aria all'interno dell'apposito serbatoio separatore. Attraverso la cartuccia del separatore d'olio a doppio stadio e la valvola di non ritorno e minima pressione, l'aria compressa passa al radiatore finale. Dopo il raffreddamento, la condensa prodotta viene rimossa dall'aria compressa tramite il separatore centrifugo ed espulsa mediante l'apposito scaricatore, integrato nella macchina. L'aria compressa priva di condensa esce dall'impianto attraverso la rispettiva connessione a tubo. Il calore generato durante la compressione e racchiuso nell'olio di raffreddamento viene dissipato in ambiente grazie al radiatore olio con ventola motorizzata indipendente. Il sistema di gestione termoelettrico assicura che le temperature di esercizio siano le più basse possibili. Il sistema è controllato elettronicamente ed è dotato di tutte le sicurezze necessarie sia elettroniche che meccaniche (valvole di sicurezza). Il tutto è equipaggiato con un modulo essiccatore che raffredda l'aria compressa a +3 °C per rimuove ulteriormente l'umidità presente prima che l'aria compressa venga immessa in rete.
L'evoluta regolazione adattiva calcola in anticipo una varietà di opportunità e seleziona sempre quella più efficiente sotto il profilo energetico, adattando il compressore ad una configurazione più efficiente in base al consumo effettivo di aria compressa e rendendolo idoneo alla 4.0.

5. Componenti innovativi della selettrice

Nel contesto di studio viene utilizzata una **selezionatrice ottica a tappeto** (Figura 2), tipicamente impiegata con prodotti congelati/surgelati, o più genericamente con prodotti umidi/bagnati.
Attraverso l'utilizzo di telecamere a colori ad altissima risoluzione, è possibile individuare difetti fino a 0,5 mm e corpi estranei presenti nel prodotto da selezionare



Figura 2. Vista di insieme della selezionatrice

che viene trasportato da un tappeto per alimenti ad una velocita di 2,7 m/s.
La rimozione del difetto avviene attraverso una barra ad ugelli posizionata trasversalmente al tappeto.
Gli ugelli vengono attivati in base alla posizione del difetto sul tappeto e appositamente calibrati per l'espulsione ad alta velocità.
Le analisi delle immagini (per l'identificazione del difetto) vengono elaborate attraverso un precessore di ultima generazione posizionato su ogni telecamera.
Sinteticamente è possibile schematizzare il processo di selezione del prodotto, mediante selezionatrice, individuando 5 fasi di processo (Figura 3).



Figura 3. Le fasi del processo di selezione

a. Alimentazione del prodotto

Il materiale da selezionare viene caricato in un sistema di alimentazione che lo distribuisce uniformemente sul nastro trasportatore (tappeto) (Figura 4).
Il nastro muove il prodotto a velocità costante, creando uno strato omogeneo che facilita l'ispezione.



Figura 4. Nastro trasportatore

b. Ispezione ottica

Sopra il nastro sono posizionati sensori ottici ad alta risoluzione (telecamere a colori, infrarosso o multispettrali) (Figura 5).

Le telecamere ad alta risoluzione, citate in precedenza, catturano immagini degli oggetti in tempo reale e, grazie all'abbinamento a sistemi avanzati di elaborazione delle immagini, le analizzano, estraggono le caratteristiche necessarie e le confrontano con parametri predefiniti.
Analizzano il materiale pezzo per pezzo, riconoscendo:
• differenze di colore
• dimensione e forma
• eventuali anomalie superficiali.
I dati vengono elaborati da un software che confronta i parametri rilevati con i valori impostati per quello che si definisce "prodotto buono".



Figura 5. Ubicazione zona sensori ottici

c. Riconoscimento dei difetti

Il sistema identifica i pezzi non conformi (per esempio chicchi anneriti, frammenti di plastica, pietre o semi rovinati) distinguendoli dai prodotti idonei.

d. Espulsione selettiva

Quando il pezzo difettoso raggiunge la zona di espulsione, il sistema ad aria compressa lo devia dal flusso principale.
Identificato un prodotto "non idoneo", il sistema di rilevamento invia un segnale alla scheda I/O che, a sua volta, attiva il meccanismo di espulsione, dirigendo il prodotto da scartare verso contenitori separati (Figura 6).

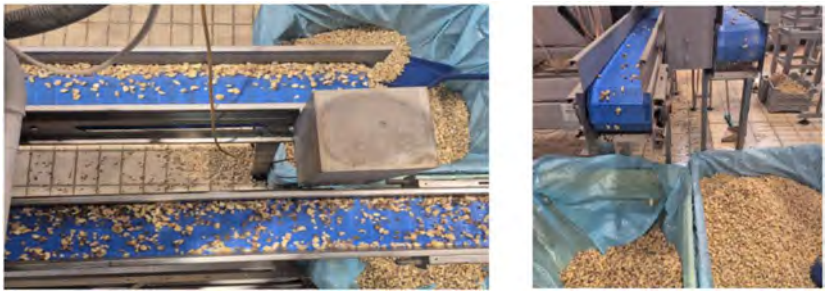


Figura 6. I percorsi finali distinti di raccolta

Elettrovalvole estremamente veloci, dell'ordine dei millisecondi, garantiscono precisione d'espulsione e scarti altamente concentrati.
In questo modo, sul nastro prosegue solo il prodotto conforme.

e. Raccolta del materiale

Il prodotto buono continua il percorso verso la raccolta (**1**) o la fase successiva di lavorazione, mentre il prodotto scartato finisce in un contenitore separato (**2**) (Figura 7).



Figura 7. I contenitori di raccolta

6. Sicurezza dell'impianto e tutela della salute

Dal punto di vista della sicurezza dell'impianto, nell'analisi dei rischi deve essere considerato, oltre alla sicurezza delle macchine, sicuramente il rischio di sovrappressione che può verificarsi in caso di malfunzionamento dell'impianto di aria compressa.

Ai sensi della raccolta E (E1D8) la valutazione delle anomalie prevedibili viene effettuata considerando:

a) massima portata di aria compressa

b) Incendio esterno.

Le valvole di sicurezza, di cui il serbatoio in pressione è obbligatoriamente equipaggiato, oltre che garantire lo sfiato della portata generata dai compressori in caso di malfunzionamento della logica di arresto degli stessi, deve garantire lo sfiato della sovrappressione che si crea all'interno del serbatoio in caso di innesco di un incendio nel locale ove essi sono installati, sebbene in questo contesto il locale non sia definito come locale a rischio incendio.

Ogni dispositivo di sicurezza è stato dimensionato in modo da consentire che, a una determinata pressione, esso si apra bilanciando i fattori che tenderebbero a determinare all'interno dell'attrezzature un incremento di pressione e lasciando fuoriuscire la quantità di fluido sufficiente a provocare un uguale decremento di pressione.

In queste condizioni estreme, la valvola di sicurezza a protezione del recipiente deve essere capace di scaricare la portata massima producibile dai compressori alle condizioni di targa e deve risultare idonea a gestire la sovrappressione generata dal

riscaldamento in conseguenza di un incendio esterno, come indicato dalla norma API 521 / ISO 23521.
Dal punto di vista invece della sicurezza dei lavoratori, si può affermare che quest'approccio all'attività di selezione delle castagne incarna uno dei principi fondamentali dell'Industria 5.0 cioè l'umanizzazione della tecnologia, in quanto crea un processo e sistema non solo efficiente ma anche capace di migliorare la qualità della vita dei lavoratori. L'attività di selezione manuale delle castagne espone infatti i lavoratori a numerosi rischi per la salute, inclusi i rischi psicologici a causa della ripetitività e della necessità di concentrazione per individuare i difetti.

7. Conclusioni

L'utilizzo dell'aria compressa è considerata una fonte di energia pulita e sicura che può essere facilmente utilizzata per diversi scopi industriali. Inoltre, i vantaggi dati dal suo utilizzo sono numerosi, e quando tutto questo si associa ad un uso attento delle "smart technologies" i benefici possono essere notevoli.
Il sistema qui descritto permette non solo di migliorare il prodotto finale, di ottimizzare l'utilizzo della manodopera durante la fase critica della selezione e di minimizzare potenzialmente rischi per la salute dei lavoratori.
Il caso esaminato è esempio di applicazione dei dettami dell'industria 4.0 e 5.0: è evidente che i sistemi di automazione e le tecniche di IA possono svolgere un ruolo molto importante in alcuni settori produttivi, permettendo lo snellimento delle operazioni e il miglioramento dell'efficienza complessiva.

Si ringrazia per la collaborazione P. Romano - Terminio Frutta.

Bibliografia

[1] Direttiva 2006/42/CE – Allegato I, 2.1: Macchine alimentari
[2] UNI EN 1672-2 – Macchine per l'industria alimentare – Requisiti di igiene e pulibilità
[3] Regolamento CE 1935/2004 – Materiali e oggetti destinati a venire a contatto con prodotti alimentari
[4] Direttiva 2014/68/UE – Progettazione, fabbricazione e conformità delle attrezzature a pressione
[5] D.M. 329/2004 - 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.
[6] D.M. 11 aprile 2011 - Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'All. VII del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, nonché i criteri per l'abilitazione dei soggetti di cui all'articolo 71, comma 13, del medesimo decreto legislativo.
[7] Manuale uso e manutenzione, valutazione dei rischi della macchina

Sicurezza degli impianti di distribuzione dell'idrogeno nelle competizioni automobilistiche

A. Tonti[1], C. Di Girolamo[2], C. La Gioia[1]

[1]Inail - Dit
[2]Inail – Uot di Piacenza

Sommario
L'impiego dell'idrogeno nei contesti ad alte prestazioni come il motorsport consente di accelerare lo sviluppo di soluzioni di sicurezza e di processo trasferibili al trasporto su strada. Questo contributo illustra gli indirizzi del progetto INAIL per la sicurezza degli impianti di distribuzione dell'idrogeno nelle competizioni automobilistiche, con particolare attenzione al quadro normativo, alle modalità operative di rifornimento, ai rischi ATEX, e alle principali criticità ingegneristiche legate allo stoccaggio (CGH_2 e LH_2), allo "hydrogen embrittlement" e allo "hydrogen sloshing". Sono presentate proposte di mitigazione, compreso lo sviluppo di sistemi di cattura selettiva dei gas e l'ipotesi di serbatoi intercambiabili per ridurre i tempi e migliorare la sicurezza delle operazioni.

1. Introduzione

Il Dipartimento Innovazioni Tecnologiche (DIT) dell'INAIL, in collaborazione con la UOT di Piacenza e con operatori del settore, ha avviato un progetto di ricerca dedicato alla sicurezza degli impianti di distribuzione dell'idrogeno in contesti di gara. L'iniziativa si inserisce nella missione istituzionale di INAIL sulla messa in servizio degli impianti a pressione e nell'osservazione del naturale trasferimento tecnologico dal motorsport al trasporto stradale e parte da un'analisi del contesto normativo attuale [1-6], in previsione dello sviluppo di specifiche connesse con le caratteristiche dell'idrogeno.
Le modalità operative particolarmente complesse nel settore richiedono misure di sicurezza specifiche, in parte ancora non stabilite e che necessitano ampia sperimentazione e successiva messa a punto. In tale contesto rientra il fluido utilizzato come combustibile (puro, blended, solido, liquido, gassoso, ecc.) [7], ma anche la scelta dei materiali più idonei per contenerlo minimizzando le perdite, nonché le soluzioni più idonee dal punto di vista impiantistico per un rifornimento sicuro [8, 9].

2. Quadro normativo e ruolo di INAIL

La normativa internazionale e nazionale sugli impianti per idrogeno richiede il rispetto di vincoli stringenti relativi a distanze di sicurezza, sistemi di sfiato, tubi flessibili, temperature di esercizio e compatibilità dei materiali. INAIL, attraverso il DIT e le UOT territoriali, svolge attività di collaudo e controllo sugli impianti a pressione, oltre a partecipare ai principali organismi di normazione (UNI, ISO, CEN, ASME).

L'Istituto può vantare più di 100 anni di storia nel settore dei controlli sugli impianti a pressione:

- nel 1926 la legge costitutiva dell'Associazione Nazionale per il Controllo della Combustione (ANCC)
- nel 1983 confluita nell'Istituto Superiore per la Prevenzione e Sicurezza del Lavoro (Ispesl)
- nel 2010 incorporato nell'INAIL – Dipartimento Innovazioni Tecnologiche (DIT)



Figura 1. Competenze storiche di INAIL nel settore degli apparecchi a pressione

3. Modalità operative di rifornimento e requisiti ATEX

La gestione del rischio di atmosfere esplosive (ATEX) richiede la valutazione delle sorgenti di emissione/innesco e l'adozione di idonei modi di protezione per apparecchiature elettriche e non elettriche. Va aggiunto che la fase di depressurizzazione prima dello scollegamento del tubo è cruciale per evitare pericoli per gli addetti.

La rimozione del tubo, senza la fase di depressurizzazione, risulterebbe molto pericolosa per gli addetti. Per questo motivo, il tubo è dotato di un dispositivo di sicurezza che impedisce lo scollegamento fino a quando la fase di depressurizzazione non è completata. La fase di depressurizzazione dura circa un minuto. Una volta scaricata la pressione, il tubo può essere scollegato in modo sicuro, senza rischi per i tecnici/operatori.

Per il rifornimento di idrogeno gassoso, si può valutare l'adozione di una strategia a due stazioni, per ottimizzare i tempi e garantire la sicurezza dell'operazione: il serbatoio del veicolo arriva al rifornimento quasi vuoto (a pressione atmosferica). Il rifornimento avviene da una fonte a 700 bar. Il flusso iniziale è veloce, ma rallenta man mano che la pressione interna del serbatoio si avvicina a quella della stazione. Quando le pressioni si equilibrano, il flusso si riduce drasticamente. Collegare il

veicolo a una seconda stazione pienamente in pressione (700 bar) consente di ripristinare la differenza di pressione iniziale e quindi la stessa velocità di trasferimento del fluido.

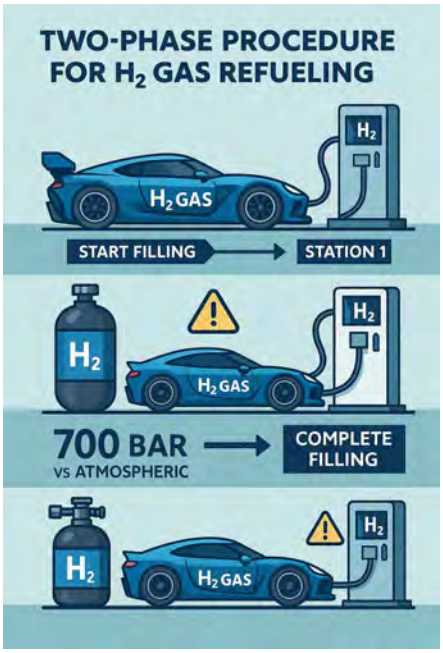


Figura 2. Schema operative del rifornimento H2 gassoso a due stazioni

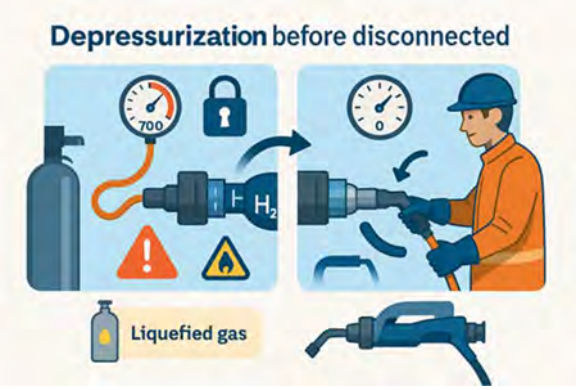


Figura 3. Dispositivo di sicurezza e fase di depressurizzazione prima dello scollegamento.

4. Stoccaggio e criticità ingegneristiche

L'idrogeno può essere immagazzinato allo stato gassoso compresso (CGH_2) o liquido (LH_2). Le alte pressioni operative e le bassissime temperature in gioco comportano sfide sui materiali (compatibilità, infragilimento da idrogeno) e sulla gestione del serbatoio (sloshing). Sono richiesti materiali e progettazioni idonee a carichi ciclici, transizioni di fase e potenziali fronti di fiamma ad alta pressione.

Per quanto riguarda lo sloshing [10], si tratta di un fenomeno da considerare nella movimentazione del combustibile, ancora più rilevante per l'idrogeno liquido.



Figura 4. Hydrogen sloshing: aumento di pressione e rischi associati.

Alcuni studi dimostrano che il trasporto energetico del liquido richiede serbatoi con spessori maggiori rispetto ad altri combustibili, come il gas naturale liquefatto (LNG). Per esempio, per ottenere la stessa densità energetica serve aumentare lo spessore del serbatoio di 6,6 volte. Questo accade perché il passaggio di fase da liquido a gas aumenta con la movimentazione, causando maggiore evaporazione, incremento della pressione nel serbatoio e conseguente perdita dalle guarnizioni o dai dispositivi di sicurezza, se non ben controllati.

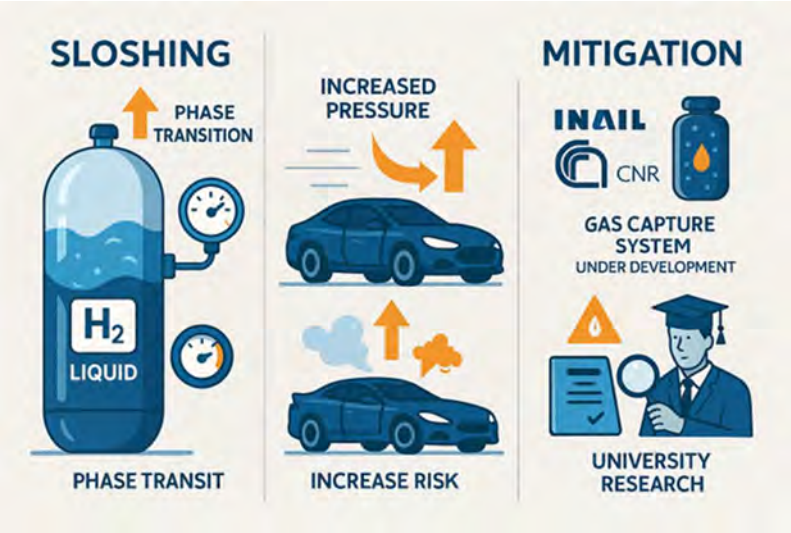


Figura 5. Mitigazione dello sloshing e sviluppo di sistemi di cattura selettiva dei gas

Lo stesso fenomeno può manifestarsi nel veicolo in movimento, dove le sollecitazioni accentuate amplificano lo sloshing, con conseguenti rischi per:

- sicurezza (perdita incontrollata),
- riduzione dell'autonomia.

5. Analisi dei rischi

Per quanto riguarda i metodi di valutazione del rischio, quelli più comunemente utilizzati per l'idrogeno sono HAZID (HAZards Identification), HAZOP (HAZard and Operability) e QRA (Quantitative Risk Assessment). Le valutazioni del rischio presenti in letteratura scientifica hanno evidenziato che le metodologie utilizzate per la valutazione del rischio sono diverse in ambito europeo e che alcuni paesi hanno requisiti normativi relativi ai metodi di valutazione del rischio.

Si tenga conto che la normativa vigente nella progettazione e nell'esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione è dettata dal DM 23 ottobre 2018 mentre le metodologie di analisi del rischio e le misure di sicurezza antincendio sono stabilite dal DM 7 luglio 2023.

Suddetti decreti sono applicabili agli impianti di distribuzione stradale di idrogeno gassoso destinato all'autotrazione. Gli impianti e gli stoccaggi per le competizioni automobilistiche a scopo sportivo non rientrano specificamente nell'applicazione di

suddetti decreti. Allo stato, però, in mancanza di una normativa specifica di riferimento sulle regole di sicurezza per i rifornimenti di idrogeno di autovetture da corsa nelle competizioni nazionali vengono applicate, per analogia, le suddette regole tecniche di prevenzione incendi.
Si consideri che la regola tecnica relativa alle stazioni di rifornimento di idrogeno è ritenuta significativamente più restrittiva in confronto all'approccio di altri paesi europei.
Nel caso delle competizioni il rifornimento di idrogeno è può avvenire mediante soluzioni containerizzate a causa del ristretto impegno di spazio a disposizione, ossia mediante stazioni "integrate" dove all'interno di un container è presente: 1) il compressore, 2) i componenti ausiliari, 3) il sistema di controllo e 4) lo stoccaggio in alta pressione. L'impianto è progettato per il rifornimento sino a 70 MPa.
I materiali impiegati per l'impianto gas devono rispondere ai requisiti di cui al d.lgs 15 febbraio 2016, n. 26. Le pressioni di progetto dell'impianto devono essere almeno del 10% superiori alle massime pressioni nominali di esercizio e, in ogni caso, non inferiori alle pressioni di intervento delle valvole di sicurezza. La sovrappressione nella linea di alimentazione del dispositivo di erogazione gas non deve essere superiore all'1% della pressione di erogazione, con pulsazioni della pressione non superiori al 4%.
Per quanto attiene lo stoccaggio di idrogeno, dall'analisi degli scenari a rischio più elevato, è stato osservato che quello critico più ricorrente e la perdita da serbatoio. La classificazione di rischio più elevata può essere deriva dall'alta frequenza di piccole perdite sugli accessori, perdita sulle valvole, rottura delle tubazioni degli strumenti.
Si tenga conto che l'idrogeno una volta rilasciato può essere innescato e dare luogo ai seguenti scenari: 1) Jet fire in caso di innesco immediato del gas infiammabile rilasciato; 2) UVCE (esplosione non confinata) e flash-fire in caso di innesco ritardato di una nube infiammabile; 3) VCE (esplosione confinata) in caso di perdita di idrogeno in uno spazio ristretto, con conseguente esplosione in caso di innesco ritardato.
Riguardo agli scenari di rischio possibili, si può evidenziare che alcuni di essi sono specifici dell'idrogeno liquido LH2, altri dello stato gassoso cGH2 o simili. L'innesco da un rilascio ad alta pressione di idrogeno liquido LH2 è ritenuto del tutto simile ad un rilascio ad alta pressione di idrogeno gassoso (cGH2), con effetti di sovrapressione dovuti all'accensione.
Ai fini della definizione degli scenari di rischio nella fase di riempimento del serbatoio di LH2 e delle modalità di guasto sono da prendere in particolare considerazione il fenomeno della: 1) rapida transizione di fase (rapid phase transition, RPT); 2) pressione di picco (pressure peaking phenomenon, PPP). Il primo può avvenire in presenza di rilascio involontario di idrogeno liquido sull'acqua che può portare ad un'improvvisa e violenta vaporizzazione dell'idrogeno stesso: in tal caso il notevole incremento del gradiente di vaporizzazione di LH2 in presenza di un innesco efficace può portare a gravi conseguenze incidentali. Il secondo caso può essere prodotto in presenza di rilascio di idrogeno in area confinata a limitata ventilazione e si verifica

solo quando la velocità di rilascio dell'idrogeno è sufficientemente elevata da rimuovere completamente l'aria dallo spazio chiuso in caso di perdita prolungata. Il valore della pressione di picco è funzione della portata di efflusso dell'idrogeno.

6. Alternative operative

In alternativa al rifornimento tradizionale, è ipotizzato l'impiego di serbatoi precaricati intercambiabili per migliorare sicurezza e tempi ciclo.



Figura 6. Sistema automatico con serbatoi precaricati

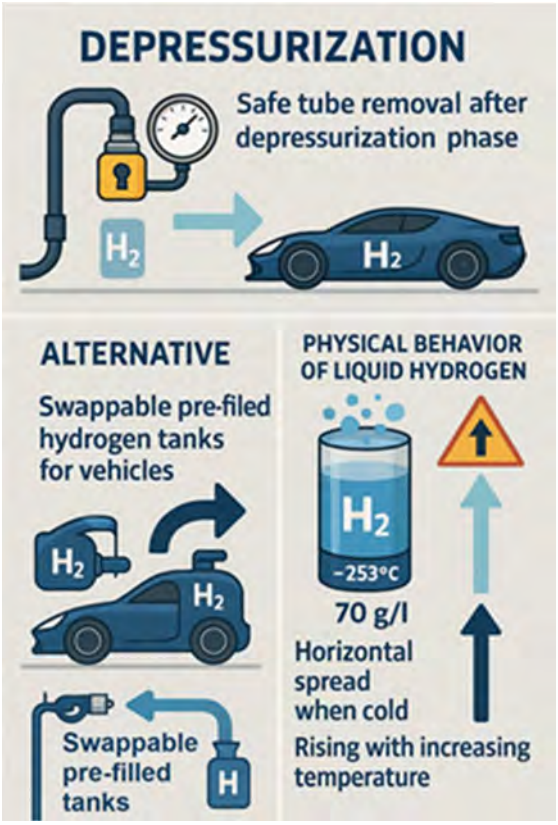


Figura 7. Serbatoi precaricati e co mportamento fisico dell'Idrogeno liquido

La procedura è diversa nel caso di utilizzo di combustibile liquefatto, poiché le pressioni inferiori rendono la procedura simile a quella utilizzata per altri gas liquefatti, come ad esempio il GPL. L'idrogeno liquido, pur a pressioni inferiori,

richiede la gestione dell'evaporazione e delle variazioni di densità del gas con la temperatura.

7. Ricerca, collaborazioni e trasferimento tecnologico

Il progetto in corso sugli impianti di distribuzione valorizza collaborazioni con enti di ricerca e organismi di normazione, con l'obiettivo di validare soluzioni in ambito motorsport e trasferirle all'impiego su strada. Sono previste attività sperimentali e di standardizzazione in un arco triennale con il coinvolgimento di partner accademici e istituzionali, in particolare per quanto riguarda lo studio dei dispositivi di cattura.
La proposta nasce dall'attività di ricerca nel settore della fusione nucleare, in cui vengono utilizzati isotopi dell'idrogeno, come ad esempio il deuterio.
In questo ambito vengono utilizzati dispositivi di cattura come quello rappresentato in figura 8.
L'obiettivo è quello di definire una soluzione integrata, che includa i sistemi di rifornimento, sensori, dispositivi di sicurezza e controllo, combinati con sistemi automatici per il ripristino delle condizioni di sicurezza in caso di necessità. La soluzione potrebbe includere anche sistemi AI, opportunamente integrati con la strumentazione e comunque con la supervisione dell'operatore.

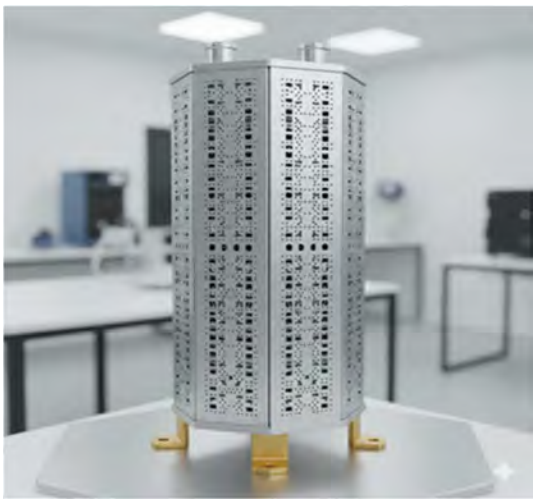


Figura 8. Cartuccia per il recupero di deuterio nel sistema NBTF

8. Conclusioni

L'esperienza di INAIL sugli impianti a pressione, integrata con la sperimentazione in contesti ad alte prestazioni, consente di delineare nuove procedure sperimentali per il rifornimento di idrogeno.
La combinazione di misure organizzative, scelte impiantistiche conformi alle norme e sviluppo di nuove tecnologie di mitigazione costituisce la base per un'evoluzione sostenibile e sicura del vettore idrogeno nel trasporto.
L'esperienza storica e tecnico-scientifica di INAIL ora, ISPESL ed ANCC in precedenza, nel settore degli impianti a pressione, applicata a contesti ad alte prestazioni come il

motorsport, rappresenta un laboratorio avanzato per sviluppare e validare soluzioni innovative di sicurezza per l'impiego dell'idrogeno.
In particolare, viene evidenziato che:

- La sperimentazione in ambito competitivo consente di definire nuove procedure sperimentali di rifornimento dell'idrogeno, difficilmente testabili in altri contesti, ma con forte potenziale di trasferimento verso il trasporto e la distribuzione in ambito stradale.
- La sicurezza complessiva degli impianti di distribuzione dell'idrogeno può essere migliorata solo attraverso una combinazione integrata di:
- misure organizzative,
- scelte impiantistiche coerenti con il quadro normativo vigente,
- sviluppo e adozione di **nuove tecnologie di mitigazione dei rischi (ad esempio per stoccaggio, rifornimento e gestione delle fasi critiche).
- L'approccio proposto costituisce la base tecnica e metodologica per un'evoluzione sicura e sostenibile del vettore idrogeno nel settore dei trasporti, partendo dal motorsport come ambito di prova avanzato.

Ringraziamenti
Si ringraziano i colleghi del Dit e la UOT dell'Inail di Piacenza per il supporto tecnico-scientifico, i partner accademici coinvolti per il supporto nelle attività di ricerca.

Bibliografia
[1] Direttiva 2014/34/UE (ATEX) – Apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.
[2] Direttiva 1999/92/CE (ATEX) – Prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori.
[3] ISO 19880-1:2020 – Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements.
[4] ISO/TR 15916:2015 – Basic considerations for the safety of hydrogen systems.
[5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) – Sezioni rilevanti per recipienti in pressione.
[6] CEN/CENELEC Guide e norme pertinenti per impianti a idrogeno in ambito UE.
[7] Loris Lombardo, Taichi Nishiguchi, Thi Ha My Pham, Andreas Züttel, and Satoshi Horike, Deep Eutectic Solvents Formed by Complex Hydrides: A New Class of Hydrogen-Rich Liquid, Adv. Mater. 2025, https://doi.org/10.1002/adma.202502566.
[8] Kim, Changsoo, Younggeun Lee, and Kyeongsu Kim. 2023. "Comparative Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station Using Gaseous Hydrogen and Formic Acid as the Hydrogen Carrier" Energies 16, no. 6: 2613. https://doi.org/10.3390/en16062613.
[9] Jianbo Zhao, Mingkun Wu, Hongpeng Lu, Guidong Li, Yuzhi Xu, and Mengkui Tian, Quantitative Risk Assessment of an Oil-Gas-Hydrogen-Electricity Integrated

Energy Station in China, ACS Omega 2024 9 (37), 38887-38896, DOI: 10.1021/acsomega.4c05050.
[10] Zhaoqi Zheng, Anyi Xu, Wenbing Jiang, Bin Wang, Peijie Sun, Peng Li, Yonghua Huang, Simulation of sloshing and settling behavior of liquid hydrogen in an insulated tank during coastal period, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 97, 2025, Pages 117-129, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.344.
[11] D. Marcuzzi, V. Toigo, M. Boldrin, S. Dal Bello, P. Sonato, A. Tonti, F. Panin, et al., Lessons learned after three years of SPIDER operation and the first MITICA integrated tests, Fusion Engineering and Design, Volume 191, 2023, 113590, ISSN 0920-3796, https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113590.

La gestione della sicurezza e affidabilità di attrezzature e impianti in una fonderia di precisione: dagli impianti a pressione a pratiche operative verso lo "Zero Harm"

G. Battista[1], O. Di Donato[1], R. Di Leo[1], P. De Luca[2], L. Mosca[2]

[1]Inail - Uot Avellino
[2]Europea Microfusioni Aerospaziali S.p.A.

Sommario
La Europea Microfusioni Aerospaziali S.p.A., in sigla nota come EMA, è una fonderia di precisione attiva dal 1998 che produce palette rotoriche e statoriche in superleghe (base nickel) per turbine di motori aeronautici, sia civili che militari, e per le turbine industriali per la generazione di energia elettrica (cogenerazione, cosiddette IGT Industrial Gas Turbine).
All'interno del sito produttivo si alternano processi altamente artigianali, come ad esempio l'attività degli orafi, e processi completamente automatizzati, dove l'eccellenza operativa richiede un altissimo livello di specializzazione delle maestranze ed impianti all'avanguardia della tecnica. Il ciclo produttivo è conosciuto come produzione di "microfusioni in leghe a cera persa" o anche "Investment Casting".
Questi impianti, macchine ed apparecchiature sono sempre più spesso "dedicate" ovvero progettate e costruite per questo specifico processo.
La progettazione delle stesse, da parte dei costruttori, implica sempre un'interfaccia continua con i tecnici di processo e di ingegneria di EMA, per le specifiche caratteristiche dei processi da attuare ed i risultati da ottenere.

1. Obiettivo

Nel presente lavoro si analizzano sia le condizioni di installazione che le modalità di utilizzo e soprattutto i relativi rischi connessi (pressioni, alte temperature, alto vuoto, etc.), nonché, quale principale obiettivo, l'adozione di tecniche ed approcci per controllare tali rischi.
Come affermato sopra, gli impianti in oggetto sono costruiti "ad hoc" per siti produttivi come quello di EMA. Di siti simili se ne contano in Italia 2 o 3 al massimo, e un totale di circa 20 nel mondo, per l'utilizzo delle particolari leghe base nickel e fusioni in alto vuoto (riduzione della ossidazione). Tali peculiarità implicano una conseguente ridotta esperienza sui rischi correlati; a tal proposito si evidenziano alcune considerazioni:

a) sono macchine ed impianti specifici;
b) lavorano ad alte temperature e pressioni o addirittura in alto vuoto;
c) sono specifiche e non generalizzabili;
d) hanno una rilevanza sulla continuità del business;
e) presentano pericoli e rischi molto specifici.

L'obiettivo finale, dunque, di questo caso studio è la conoscenza di tecniche e

l’adozione di corretti approcci che diminuiscano le probabilità di incidenti.

2. Descrizione dell’impianto (caso di studio principale)

L’impianto “autoclave”, installato presso il sito produttivo, è costituito da due camere cilindriche poste in orizzontale, una più piccola inserita dentro l’altra più grande ed è utilizzato per “decerare”, o meglio “sciogliere”, la cera dall’interno dei calchi ceramici.
ll deceramento è la fase del processo di fusione a cera persa durante la quale la cera viene riscaldata fino alla sua completa fusione, liberando lo spazio occupato all’interno del guscio ceramico in cui dovrà essere colato il metallo fuso. La fusione della cera deve avvenire in pochi secondi, per evitare che la sua dilatazione termica vada a crepare il guscio ceramico. Al fine di ottenere un riscaldamento omogeneo e controllato, si inseriscono le forme in una autoclave in cui viene immesso, tramite apertura di una valvola, del vapore surriscaldato ad alta pressione. In tale apparecchiatura il sistema viene investito da vapore caldo (temperature dell’ordine di 180 °C) e alta pressione (circa 9 bar).
Ovviamente si parla di cere specifiche, con caratteristiche ben definite (plasticità, resistenza, etc.) e trattate in quantitativi importanti. Punto fondamentale, la cera sciolta viene recuperata per il corretto riutilizzo/riciclaggio, sia in termini di impatto ambientale che per le sue specifiche caratteristiche (verrà poi ritrattata dal produttore e riutilizzata nel ciclo produttivo sempre di EMA).
EMA possiede ad oggi 2 di questi impianti autoclavi (Boilerclave^{TM}) forniti da una ditta con sede in Gran Bretagna.

3. Funzionamento dell’impianto in esame

L’ingresso del vapore in autoclave fa sì che la pressione e la temperatura interne aumentino in un tempo breve (nell’ordine dei secondi) fino a raggiungere le condizioni termodinamiche ideali per lo scioglimento della cera (dewaxing). Il vapore trasferisce calore alla superficie del guscio ceramico e, attraverso di esso, alla cera che, per effetto dell’aumento di temperatura, espande prima di fondere ed evacuare dal guscio. Tale espansione può essere fatale per l’integrità del materiale ceramico, come già detto.
Il processo di deceramento è costituito da tre fondamentali fasi:

- riempimento dell’autoclave con vapor d’acqua;
- scambi termici tra il vapore e la cera attraverso il guscio ceramico;
- fusione e deflusso della cera.

Chiaramente durante queste tre fasi si incorre in diversi fenomeni, quali la penetrazione del vapore attraverso il mezzo poroso rappresentato dal guscio, la condensazione del vapore surriscaldato sulle pareti fredde dello stampo, il passaggio della cera attraverso il guscio, l’espansione della cera durante il riscaldamento, etc..
La rimozione del modello in cera dal guscio ceramico è pertanto una parte fondamentale del processo di microfusione a cera persa.
Come detto in precedenza, EMA possiede nel suo sito produttivo 2 boilerclave; il Fabbricante opera nel settore della microfusione da oltre 50 anni. L'azienda ha

sviluppato il concetto (registrato) di caldaia e autoclave combinate (Fig. 1), che è diventato immediatamente lo standard del settore grazie alle sue prestazioni significativamente migliorate, all'ingombro ridotto, alla bassa manutenzione e alla maggiore efficienza.



Figura 1. Autoclave (Boilerclave™ LBBC)

L'impianto in esame, così come l'altro, ha cicli specifici ed è capace di lavorare h24 per giorni e giorni consecutivi (esclusi i fermi macchina per manutenzione programmata e per la pulizia della camera e del portello).

4. Scopo dello studio

Questo studio, partendo da un solo impianto (ma applicabile poi a tutti gli altri utilizzati in siti e processi specifici come quello di EMA), illustra ed analizza il legame inseparabile tra la sicurezza di processo (Process Safety) e l'affidabilità degli impianti (Reliability).

Purtroppo, sono spesso trattate come discipline e valutazioni separate, ma una rappresenta il prerequisito tecnico dell'altra, ovvero un impianto essenzialmente inaffidabile non potrà mai essere considerato sicuro, o meglio intrinsecamente sicuro. Solo con questa consapevolezza, che investe tutti gli aspetti di una macchina, impianto o apparecchiatura, si può raggiungere l'obiettivo dello "Zero Harm" ovvero del "danno zero" inteso come nessun infortunio e nessun incidente.

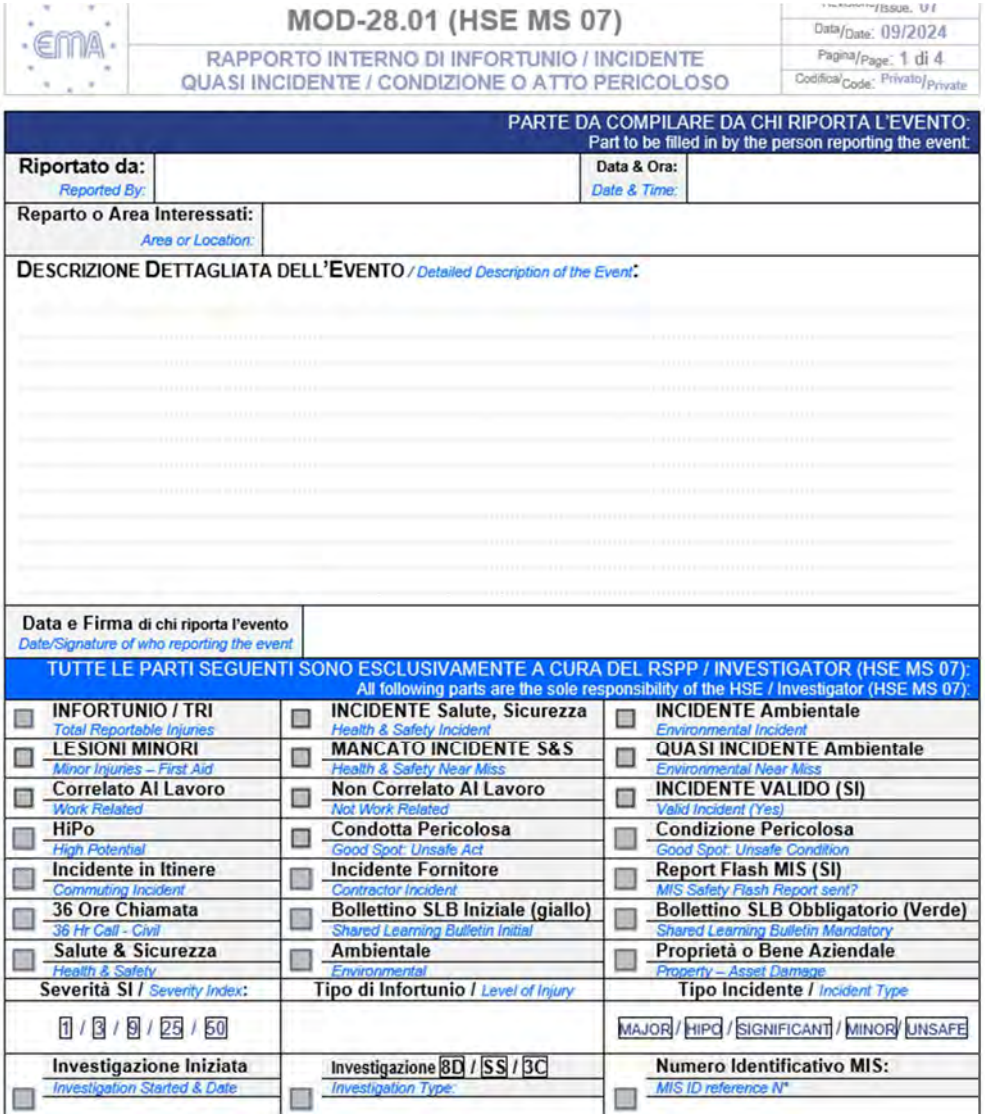
Il punto è il modo in cui mettere insieme queste discipline; la risposta sta semplicemente nell'adozione e nel relativo studio dei "Near Miss" ovvero riportare e verificare i "Mancati Incidenti" [si veda a tal proposito l'obbligo inserito nell'ultima modifica al D. Lgs. 81/2008 (Gennaio 2026 n.d.r.) con l'approvazione in legge del D.L. 159/2025].

Che cos'è un "mancato incidente" o "Near Miss": è qualsiasi evento o serie di eventi che accadono in occasione del lavoro o del funzionamento di impianti o macchine, generati da una situazione imprevista e improvvisa, che potenzialmente avrebbe potuto causare un danno, un malfunzionamento, un incidente o un infortunio, ma che non comporta conseguenze negative grazie alla presenza di condizioni fortuite favorevoli.

Di seguito si analizzano alcuni "Near Miss", analizzando i fatti del caso studio specifico ovvero dell'impianto utilizzato nell'ambito produttivo di EMA.

5. Descrizione del problema dell'impianto in esame

La problematica sorta su questa apparecchiatura a pressione è affrontata con l'approccio rendicontato della presa in carico di differenti malfunzionamenti e problemi, ovviamente correttamente riportati attraverso la modulistica interna (MOD-28.01 – Fig. 2) e quindi con la gestione e la presa in carico dei c.d. "Near Miss".



MOD-28.01 (HSE MS 07)

RAPPORTO INTERNO DI INFORTUNIO / INCIDENTE
QUASI INCIDENTE / CONDIZIONE O ATTO PERICOLOSO

Data/Date: 09/2024
Pagina/Page: 1 di 4
Codifica/Code: Privato/Private

PARTE DA COMPILARE DA CHI RIPORTA L'EVENTO:
Part to be filled in by the person reporting the event:

Riportato da: *Reported By:*		**Data & Ora:** *Date & Time:*	
Reparto o Area Interessati: *Area or Location:*			

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELL'EVENTO / *Detailed Description of the Event*:

Data e Firma di chi riporta l'evento *Date/Signature of who reporting the event*	

TUTTE LE PARTI SEGUENTI SONO ESCLUSIVAMENTE A CURA DEL RSPP / INVESTIGATOR (HSE MS 07):
All following parts are the sole responsibility of the HSE / Investigator (HSE MS 07):

☐ **INFORTUNIO / TRI** *Total Reportable Injuries*	☐ **INCIDENTE Salute, Sicurezza** *Health & Safety Incident*	☐ **INCIDENTE Ambientale** *Environmental Incident*
☐ **LESIONI MINORI** *Minor Injuries – First Aid*	☐ **MANCATO INCIDENTE S&S** *Health & Safety Near Miss*	☐ **QUASI INCIDENTE Ambientale** *Environmental Near Miss*
☐ **Correlato Al Lavoro** *Work Related*	☐ **Non Correlato Al Lavoro** *Not Work Related*	☐ **INCIDENTE VALIDO (SI)** *Valid Incident (Yes)*
☐ **HiPo** *High Potential*	☐ **Condotta Pericolosa** *Good Spot: Unsafe Act*	☐ **Condizione Pericolosa** *Good Spot: Unsafe Condition*
☐ **Incidente in Itinere** *Commuting Incident*	☐ **Incidente Fornitore** *Contractor Incident*	☐ **Report Flash MIS (SI)** *MIS Safety Flash Report sent?*
☐ **36 Ore Chiamata** *36 Hr Call - Civil*	☐ **Bollettino SLB Iniziale (giallo)** *Shared Learning Bulletin Initial*	☐ **Bollettino SLB Obbligatorio (Verde)** *Shared Learning Bulletin Mandatory*
☐ **Salute & Sicurezza** *Health & Safety*	☐ **Ambientale** *Environmental*	☐ **Proprietà o Bene Aziendale** *Property – Asset Damage*
Severità SI / *Severity Index*:	**Tipo di Infortunio** / *Level of Injury*	**Tipo Incidente** / *Incident Type*
1 / 3 / 9 / 25 / 50		MAJOR / HIPO / SIGNIFICANT / MINOR / UNSAFE
☐ **Investigazione Iniziata** *Investigation Started & Date*	☐ **Investigazione** 8D / SS / 3C *Investigation Type:*	☐ **Numero Identificativo MIS:** *MIS ID reference N°*

Figura 2. Modulistica SGI EMA per rendicontazione di incidenti o condizioni pericolose.

Tra i tanti impianti, macchine e diverse apparecchiature installate nello stabilimento EMA, una di quelle più rappresentative, se non la più rappresentativa, è proprio il boilerclave, essendo un'apparecchiatura a pressione nel termine propriamente detto, che ha però specifici rischi intrinseci e che, in caso di problemi o malfunzionamenti non risolti, può causare un serio incidente ed anche problemi produttivi correlati.
La macchina è strutturata per generare del vapor d'acqua, tramite delle resistenze elettriche nella caldaia, che, una volta raggiunta la pressione di 9.0 bar, viene aperto

alla camera interna dove si completa il ciclo di lavoro.
La suddetta camera di lavoro, anche chiamata “vessel”, è aperta all’ambiente esterno tramite un portellone di forma circolare del diametro di circa 2 metri (Fig. 3) percorso perimetralmente da una guarnizione a labbro agganciata al portellone tramite una cava a coda di rondine.

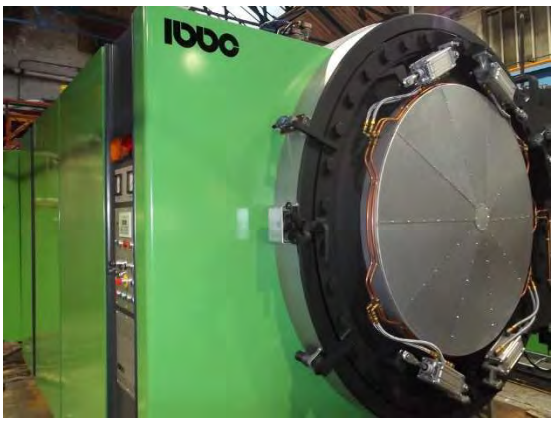


Figura 3. Portellone esterno per caricamento lavorati in cera.

Dopo diversi eventi “Near Miss o mancati incidenti” comunicati attraverso il MOD-28 di Figura 2, è stata presa in carico una revisione della problematica, con un approccio improntato al “Safety First”, ovvero fermando l’apparecchiatura per verificare il perché di questi eventi continui.
Nell’analisi di questi eventi, sempre in una ottica fondamentale “Safety First”, sono stati contattati gli altri siti della casa madre in possesso di apparecchiature uguali, i tecnici di processo e la ditta costruttrice, al fine di verificare e condividere con loro se fosse accaduto lo stesso ad impianti simili o uguali (il cosiddetto insegnamento condiviso da esperienze o eventi negativi, in inglese “Shared Learning”, per evitare che accada a qualcun altro oppure che accada ad impianti simili in maniera più grave, seria e disastrosa). Nello specifico, la problematica di nostro interesse ha riguardato la difettosità della guarnizione del portellone, che fuoriusciva dalla propria sede al momento dell’apertura, ovvero al termine del ciclo di lavoro (Fig. 4).



Figura 4. Guarnizione difettosa del Portellone esterno.

Il problema non si manifestava sempre nello stesso punto della guarnizione, ma di volta in volta accadeva lungo tutta la parte superiore della circonferenza.
Manifestatosi anche con guarnizioni nuove, sostituite ogni qualvolta l'evento si presentasse, pareva essere un difetto della cava del portellone, ipotizzando una deformazione a causa delle temperature e pressioni elevate, escludendo in prima battuta che i ricambi ufficiali forniti dal costruttore fossero difettosi.
Effettuando un controllo puntuale della sede per l'intera circonferenza, non si riscontravano, però, particolari segni d'usura o apprezzabili variazioni di dimensioni, come anche confermato dal report di lavoro redatto dal costruttore in seguito al service annuale previsto da contratto di manutenzione; l'attenzione si è quindi spostata sulla guarnizione stessa. Illustrata al costruttore l'ipotesi della possibile difettosità riscontrata, si è cominciato a monitorare il comportamento della guarnizione, come ad esempio dopo quanti cicli di lavoro il problema si manifestasse, riscontrando, in alcuni casi, che l'effettiva funzionalità degradasse già dopo un singolo ciclo di lavoro.
Difatti la guarnizione, realizzata per estrusione, tendeva leggermente a restringersi durante il riscaldamento, finendo per distaccarsi dal portellone in fase di apertura, in quanto soggetta a forze di adesione con la superficie di contatto.
Talvolta il fenomeno era ristretto ad una piccola area che ne rendeva difficile l'individuazione, soprattutto se accadeva nella parte superiore, tant'è che in una occasione (Near Miss) la guarnizione è risultata intaccata durante la fase di chiusura provocando la fuoriuscita del vapore (uno degli eventi considerato quale condizione pericolosa).
In attesa che il costruttore effettuasse i controlli interni sul processo di fabbricazione, la problematica è stata gestita intensificando e sensibilizzando gli operatori ad un controllo più approfondito della guarnizione lungo tutta la circonferenza ed esortandoli a richiedere l'intervento manutentivo (Fig. 5).



Figura 5. Operazione Manutentiva straordinaria di verifica, pulizia e messa in sicurezza.

In caso di situazioni anomale, l'approccio è l'utilizzo della modalità di Valutazione Dinamica dei Rischi (Dynamic Risk Assessment), ovvero un modulo di facile utilizzo (Figura 6) dove prima di effettuare delle operazioni, considerate normali, si applica il motto "*se è sicuro lo uso sennò mi fermo*" (Stop, Think and Act)

Sito, Reparto o Area:		Nome/i di colui o coloro che intraprendono il lavoro:	
Data:		Attività:	

All'arrivo / Prima dell'inizio dei lavori:	SI	No	NA
Hai effettuato l'accesso al sito e hai ricevuto i DPI obbligatori?			
Sei stato istruito su procedure di emergenza, sui contatti, politica sui DPI, regole del sito, etc.)?			
Disponi di necessarie valutazioni, di permessi, della documentazione tecnica e delle procedure di lavoro in sicurezza?			
Hai i DPI e gli strumenti adeguati per svolgere l'attività lavorativa?			
Hai un accesso adeguato all'area di lavoro e questa è libera da ostacoli?			
Hai le competenze necessarie per portare a termine il lavoro, ad esempio una formazione adeguata?			

Tutte le fonti energetiche ed i sistemi rilevanti sono isolati, bloccati e contrassegnati?						SI	No	NA
Elettrico	Pneumatico	Idraulico	Metano / GPL	Chimico (Acidi / Basici)	Altro (descrivere)			
Gravità	Spegnimento Automatico (CO_2)	Oli	Alcoli	Alte Temperature				

Valutazione iniziale della sicurezza:	SI	No	NA
La valutazione specifica dei rischi/il sistema di lavoro sicuro affronta e controlla adeguatamente tutti i rischi? (Se no, è necessario completare la valutazione riportata di seguito)			

A - Alto M - Medio B - Basso NA - Non Applicabile

Contrassegnare se è presente un pericolo. Se H o M sono contrassegnati, vedere Controllo dei rischi di seguito.

Rischio	A	M	B	NA	Rischio	A	M	B	NA
Ambiente Rumoroso					Lavori in Solitario				
Ambiente Umido / Alta Temperatura					Lavori in Altezza / Cadute dall'alto				
Condizioni Climatiche Avverse					Oggetti cadenti / Volanti				
Ambiente Pericoloso					Macchinari / Impianti / Veicoli in movimento				
Sostanze Nocive					Superfici Calde				
Pericoli Biologici					Movimentazione Manuale				
Polvere / Fumi / Vapori					Vibrazioni				
Calore / Incendio / Esplosioni					Ribaltamento / Crollo				
Illuminazione Insufficiente					Carichi instabili				
Pavimenti Irregolari / Insicuri					Scivolamenti, inciampi, cadute				
Spazi Confinati					Apparecchiature a Pressione				
Elettricità AT / MT / BT					Altri che lavorano nelle vicinanze / Interferenze				
Radiazioni Non Ionizzanti (CEM, etc)					Radiazioni Ionizzanti				
Impatto Ambientale					Altro (Specificare)				

Controllo dei Rischi	
NA	Procedere, ma annotare eventuali cambiamenti dei pericoli durante il lavoro;
B = BASSO	Procedere con cautela. Prestare attenzione a eventuali cambiamenti dei pericoli durante il lavoro;
M = MEDIO	Misure adottate per ridurre il rischio:
A = ALTO	FERMATI! Contatta il Responsabile del sito o il tuo Responsabile in merito al pericolo/problema. NON INIZIARE IL LAVORO finché il rischio non è stato ridotto in modo da consentire il proseguimento del lavoro in sicurezza.

Conclusioni:	SI	NO
Tu e i tuoi colleghi siete al sicuro?		
Pensate sia necessario un Permesso di Lavoro specifico e l'ausilio continuo delle Squadre di Emergenza EMA?		

Se hai risposto "No", consulta la lettera "H" nella sezione Controllo dei rischi (sopra).

Nome Valutatore:		Nome Cliente / Supervisore:	
Firma Valutatore:		Firma Cliente / Supervisore:	

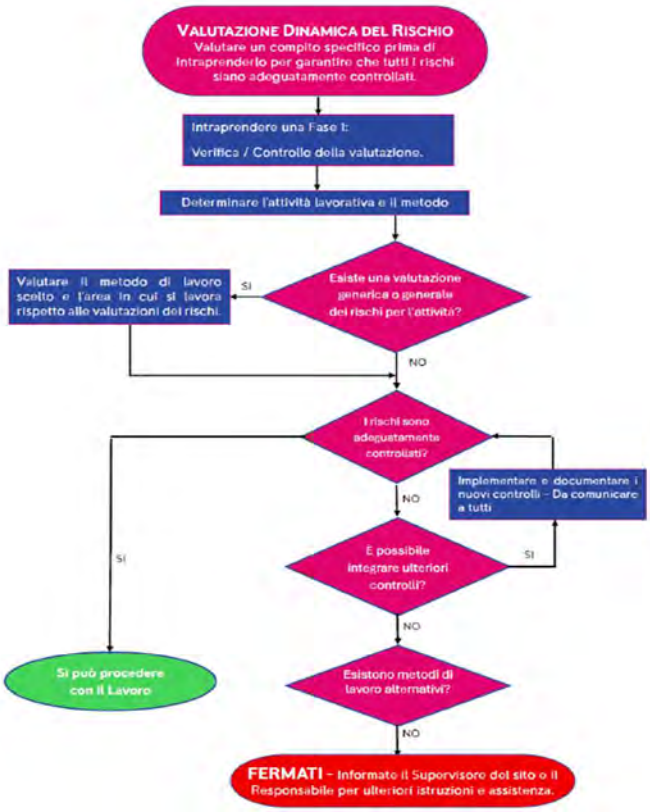


Figura 6. Modulo Valutazione Dinamica dei Rischi (Dynamic Risk Assessment) e Flowchart relativo

A circa due mesi dal primo episodio, il labbro di una di queste guarnizioni presentava vistose deformazioni (Fig. 7); informato il fornitore dell'evento, questi ha indagato sul materiale utilizzato per la sua realizzazione.



Figura 7. Danneggiamento del labbro della guarnizione.

Dopo alcuni tentativi non a buon fine, l'azienda comunicava di aver proceduto alla correzione della formulazione della mescola di costruzione rendendola più efficiente alle condizioni di lavoro previste.
Tutte queste esperienze, verifiche e controlli, ma soprattutto le modifiche, sono state quindi, condivise in apposite sessioni con gli altri stabilimenti della casa madre, anche attraverso presentazioni dette "Safety Moment" o specifiche proprio sul rischio identificato.
Da questa condivisione e a seguito di apposite valutazioni dei rischi dello specifico processo (Process safety e HazOP – Hazard and Operability Study) e delle relative risultanze, è nata, per uno dei siti, l'esigenza di sostituire una macchina in esercizio (simile all'autoclave in studio) per fine vita a causa dello spessore "ideale" del portellone di chiusura viste le importanti deformazioni e quindi non più riparabile.

6. Considerazioni

L'approccio della comunicazione immediata di eventi, in apparenza non importanti, deve indurre a considerare che la valutazione deve essere sempre oggettiva e non soggettiva, incaricare gli specialisti e riportare anche il più insignificante evento.
La gestione documentata di ogni condizione normale, anormale e ancor di più in emergenza, può far trasformare ogni evento da potenzialmente critico a controllabile/accettabile, con gli opportuni approcci.
Esistono molte tecniche di valutazione applicabili a diversi processi ed alle diverse apparecchiature, impianti e macchinari, quali ad esempio:

- Verifica di Affidabilità o "Reliability", ovvero la probabilità che un componente o un sistema svolga la sua funzione specifica in determinate condizioni per un periodo di tempo definito. Questa è squisitamente concentrata sulla continuità operativa e sulla riduzione dei guasti;

- La Sicurezza di Processo o “Process Safety” che è un contesto ingegneristico e gestionale volto a prevenire rilasci catastrofici di sostanze pericolose o energia (esplosioni, incendi, tossicità), concentrandosi sul contenimento dei rischi maggiori;
- ***Nel caso specifico il legame tra “Guasto e Incidente”; il punto fondamentale di contatto tra due discipline è il concetto di integrità meccanica. Un guasto tecnico che è stata la caduta della guarnizione (problema di affidabilità) può essere l’evento iniziatore di uno scenario incidentale (eventuale fuoriuscita di vapore a pressione ed alte temperature che avrebbe potuto investire delle persone).***
- La Curva a Vasca che normalmente tiene in considerazione le fasi di MTBF (Mean Time Between Failures o difetti di progettazione), la vita utile (dove sono presenti guasti casuali a costante accadimento) e l’Usura (criticità di vecchi impianti o fine vita tecnica).

Esiste quindi, allo scopo di attivare necessarie strategie di Mitigazione e di Ridondanza in ottica di “Safety First” e di continuità operativa “Business Continuity” ovvero per garantire la sicurezza di processo, l’ingegneria dell’affidabilità che introduce concetti chiave, quali:

- Ridondanza (1-out-of-2, 2-out-of-3), che è l'uso di componenti duplicati affinché il sistema funzioni anche in caso di guasto singolo;
- Sistemi Strumentati di Sicurezza (SIS), che sono i circuiti progettati per portare l’impianto in “stato sicuro” in caso di deviazione dai parametri. L’affidabilità di questi sistemi viene misurata tramite il livello definito SIL (Safety Integrity Level);
- Fail-Safe, quindi con il progettare i componenti in modo che, in caso di guasto (es. disconnessione di fonti energetiche o perdita di alimentazione), si portino automaticamente nella posizione più sicura (es. una valvola che si chiude) o l’ascensore che torna al piano aprendo le porte.

Per l’impianto oggetto dello studio, la migliore tecnica attuabile è quella di analizzare i principi fondamentali della “Process Safety” applicati alle apparecchiature a pressione (Pressure Equipment). La sicurezza di questi sistemi è critica, poiché un cedimento strutturale può portare a rilasci catastrofici di energia, sostanze tossiche, esplosioni o incendi.

A differenza della sicurezza sul lavoro classica (meglio conosciuta come HSE), che si concentra sugli infortuni individuali, la Process Safety mira a prevenire incidenti industriali gravi.

Per le apparecchiature a pressione, gli obiettivi da raggiungere sono:

- Prevenire la perdita di contenimento (Loss of Containment - LOC);
- Garantire l'integrità strutturale durante l’intero ciclo di vita ed estenderlo eventualmente;
- Mitigare le conseguenze di eventuali sovrappressioni.

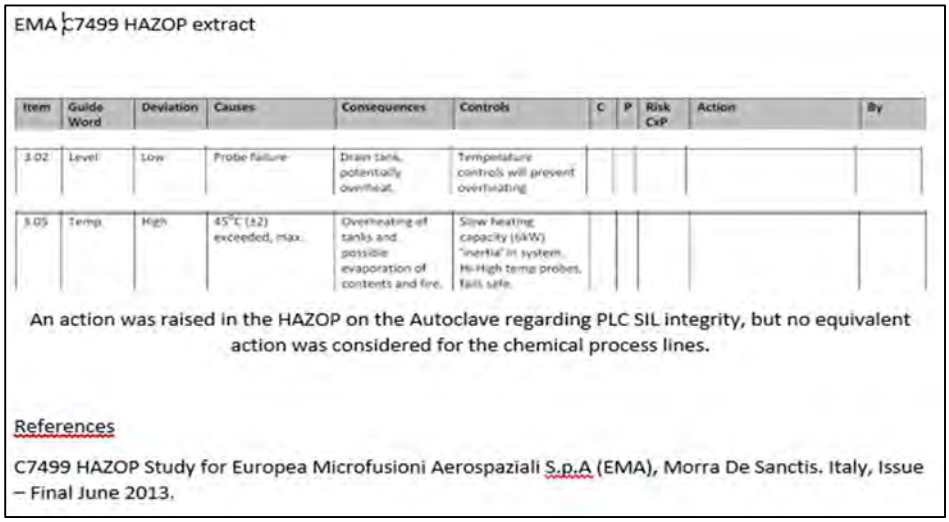
Per raggiungere questi obiettivi occorre:

- Design corretto, ovvero in fase di progettazione tenere conto di tutti i parametri critici (Pressione, Temperatura, sovrappressione massima ammissibile, tipologia di metalli e materiali, corrosione erosione);

- Appropriati sistemi di Protezione e Mitigazione, ovvero prevenire il superamento dei limiti di sicurezza, adottando analisi sui diversi “strati di protezione” (Layers of Protection Analysis);
- Dispositivi di limitazione della pressione (Pressure Relief Devices) quali Valvole di Sicurezza (PSV), ovvero dispositivi meccanici che si aprono automaticamente al raggiungimento di una pressione prefissata, Dischi di Rottura, ovvero Membrane progettate per rompersi a una pressione specifica, usati spesso per fluidi corrosivi oppure per risposte immediate;
- Sistemi Strumentati di Sicurezza (SIS), ovvero sistemi elettronici quali sensori, logica e attuatori, che intervengono per isolare l'apparecchiatura prima del verificarsi di una condizione di pericolo (ad es. High-Pressure Trip);
- Gestione dell’integrità o “Asset Integrity”, la cui installazione garantisce un monitoraggio per evitare il degrado incontrollato della macchina/impianto;
- Ispezioni basate sul rischio “Risk Based Inspection RBI”, ovvero la frequenza di ispezione basata sulla probabilità di guasto e sulla gravità delle conseguenze; i relativi NDT o Controlli Non Distruttivi, quali Ultrasuoni, Radiografie e test con i liquidi penetranti per individuare crepe, inclusioni o riduzioni di spessore;
- Manutenzione delle Valvole c.d. “di sicurezza”, con la taratura periodica delle PSV ma anche la sostituzione pre-tempo, per assicurare il corretto funzionamento.

Atto finale e decisivo è la disponibilità delle analisi dei rischi (Hazard Analysis), quindi metodologie standard per identificare i pericoli legati alle apparecchiature a pressione (Fig. 8 - estratto HAZOP/LOPA Autoclave EMA).
Esempi validi come indicato sopra, sono:

- L’HazOp (Hazard and Operability Study), ovvero l’Analisi sistematica delle deviazioni dai parametri di processo (es. "*Cosa succede se la pressione aumenta troppo?*"), che si effettua con diversi attori in campo (Manutenzione, HSE, Utilizzatori, etc.) e che tiene conto delle domande e risposte, nell’utilizzo operativo;
- Il LOPA (Layer of Protection Analysis), quale valutazione dell’efficacia delle barriere di sicurezza esistenti.


EMA C7499 HAZOP extract

Item	Guide Word	Deviation	Causes	Consequences	Controls	C	P	Risk CxP	Action	By
3.02	Level	Low	Probe failure	Drain tank, potentially overheat.	Temperature controls will prevent overheating					
3.05	Temp	High	45°C (±2) exceeded, max.	Overheating of tanks and possible evaporation of contents and fire.	Slow heating capacity (6kW) "inertia" in system. Hi-High temp probes, fails safe.					

An action was raised in the HAZOP on the Autoclave regarding PLC SIL integrity, but no equivalent action was considered for the chemical process lines.

References

C7499 HAZOP Study for Europea Microfusioni Aerospaziali S.p.A (EMA), Morra De Sanctis. Italy, Issue – Final June 2013.

Figura 8. EMA estratto dell’HazOp Study effettuati sulla Autoclave in esame.

7. Corrette pratiche, standard HSE interni e Governance EMA

Tutto quanto descritto sopra è parte di quello che nella pratica consolidata si effettua in EMA ed ormai è applicata giornalmente, non solo all'apparecchiatura in esame, ma bensì a tutte le attrezzature, macchine, impianti ed addirittura fino a stampi e adattatori (fixture) facenti parte del processo.

Ovviamente questo approccio, definito, standardizzato e seguito, non rappresenta un "ritardo" nella gestione o nel processo, ma bensì un enorme aiuto per la pianificazione integrata, come già detto sopra, per evitare ritardi, incidenti, fermi, rotture e problemi di continuità del business, chiaramente per impianti unici, costosi e difficilmente sostituibili.

Lo scopo è porre attenzione immediata, continua e con "memoria" degli eventi al fine non di "accusare o colpire" ma precisamente "ricordare ed imparare" affinché non accada più e le lezioni "da cui imparare", con le relative azioni di mitigazione, contenimento, decise e globalmente finalizzate, possano essere applicate in tutti i siti similari.

L'applicazione di queste tecniche, di queste modalità ed approcci integrati ha fatto sì di dimezzare o anche meglio annullare molti incidenti, passivamente a volte accettati, ma come riportato prima, con un atteggiamento "proattivo".

L'utilizzo condiviso "attivo" di queste buone pratiche ha di fatto proposto e modificato procedure, istruzioni e modalità operative, che nello specifico realmente ha dimostrato la diminuzione di eventi il cui impatto è calato da alto a medio o basso, oltre che annullare la probabilità, nella migliore accezione della applicabilità della "Gerarchia dei Controlli", base a nostro avviso della Salute, Sicurezza e Ambiente nelle attività lavorative.

8. Conclusioni

In primo luogo, la sicurezza delle apparecchiature a pressione non dipende da un singolo componente, ma da un approccio integrato che combina progettazione rigorosa, sistemi di protezione affidabili e un piano di manutenzione costante. La cultura della sicurezza e il rispetto delle normative (nel caso specifico PED) sono gli strumenti principali per prevenire incidenti industriali.

In secondo luogo, la gestione dei Near Miss, che trasforma un evento potenzialmente negativo in un'opportunità di notevole apprendimento, cambiando la cultura aziendale che non punisce chi segnala ma premia la prevenzione ed il "Safety First", è il miglior dispositivo di protezione collettivo ed individuale disponibile e la manutenzione non è vista solo come un costo per evitare fermi macchina, ma come una barriera di sicurezza attiva.

Infine, solamente applicando un approccio di "Alta Affidabilità", ovvero che la sicurezza è parte del nostro DNA, si potrà avere l'eccellenza operativa.

Tutto questo studio serve a condividere tecniche, approcci e conoscenze di valutazione dei rischi specifici delle macchine e soprattutto a non soffermarsi sulla mera "Sicurezza operativa", ovvero la gestione degli incidenti infortunistici e perdendo importanti segnali, ma sulla previsione di probabili incidenti dagli esiti a

volte distruttivi e sicuramente importanti per impatti su salute, sicurezza e ambiente. Questo studio è altresì trasferibile ad altri contesti industriali, sia per le tecniche richiamate che per l'importanza del riportare i "Near Miss" per avere conoscenza di ogni eventuale discostamento.
A conclusione dello studio e a suggellarne i contenuti appare quanto mai significativa la frase di Benjamin Franklin

"Dimmelo e me ne dimenticherò,
Insegnami e io lo ricorderò,
COINVOLGIMI E IO IMPARERÒ".

Bibliografia

[1] LBBC: Manuali Uso e Manutenzione, Valutazione Rischi e Fascicolo della macchina;
[2] EMA: Rolls-Royce/BB&K UK – JtZH e EMA PSGI, IO e MOD del Sistema Gestione Integrato della EMA S.p.A.;
[3] Linea Guida: Gestione degli incidenti - procedura per la segnalazione dei Near Miss, INAIL, 2021;
[4] Safety First! Really?: How to be a Credible Safety Leader (Safety through Story), Paperback, Arnold Marsden 2023;
[5] Safety First: The Essentials of OHS Plans, Salatiso Mdeni, 2025.
[6] Condivido: Un approccio integrato in reti collaborative per lo sviluppo delle conoscenze sui near miss (mancati infortuni) INAIL, 2025.

Riduzione dell'impatto ambientale degli apparecchi elettrici ad alta tensione

A. Casillo[1], E. Cadei[2]

[1]Inail – UOT di Bergamo
[2]IMEQUADRI DUESTELLE SPA

Sommario
Siamo sempre più attenti all'impatto ambientale che abbiamo sul nostro pianeta. Nell'ottica di continuo miglioramento, l'Unione Europea ha emanato un regolamento che mette al bando una serie di gas fluorurati. Tra questi gas è presente l'esafluoruro di zolfo (SF_6), largamente utilizzato nell'industria elettrica di alta tensione sia per l'isolamento che per l'interruzione degli archi elettrici. Questo cambio ha spinto i costruttori a ricercare gas e soluzioni alternative che possano soddisfare i requisiti tecnici mantenendo prestazioni, dimensioni e competitività sul mercato. L'utilizzo dell'aria secca è una delle strade intraprese per ridurre il potenziale di riscaldamento globale (GWP) degli apparecchi elettrici: l'aria secca ha infatti un GWP minore di 1 dato che contiene quantità infinitesimali di anidride carbonica, il che riduce notevolmente l'impatto globale degli apparecchi che utilizzano il gas SF_6, il quale ha un GWP pari a 23000. L'utilizzo dell'aria secca comporta tuttavia un aumento delle pressioni del gas rispetto all'equivalente in SF_6, superando la soglia di 0,5 bar relativi e rientrando nell'ambito degli apparecchi a pressione. Con l'intenzione di abbassare il più possibile la pressione, si sono ridisegnate le geometrie delle parti conduttive e introdotte delle paratie in materiale isolante per separare le parti a deversa tensione. Determinate le forme dei vari componenti, si ricerca quale sia la pressione minima per il corretto funzionamento utilizzando un generatore di impulsi, il quale simula un fulmine che colpisce una linea elettrica. I risultati ottenuti dalle ricerche dimostrano di poter garantire la funzionalità e la compattezza degli apparecchi mantenendo un livello contenuto di pressione.

1. Introduzione

Il presente elaborato si inserisce nel contesto della crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale nel settore elettrotecnico, con particolare riferimento alle apparecchiature ad alta tensione. In tale ambito, assume rilevanza centrale la progressiva dismissione del gas esafluoruro di zolfo (SF_6), caratterizzato da un elevato potenziale di riscaldamento globale, a favore di soluzioni tecnologiche alternative a minore impatto ambientale. L'analisi si sviluppa considerando sia il quadro normativo europeo e nazionale, sia le implicazioni progettuali e prestazionali derivanti dall'introduzione di nuovi mezzi isolanti, quali l'aria secca. L'elaborato si propone di perseguire i seguenti obiettivi:

✓ Esaminare il quadro normativo di riferimento relativo alle apparecchiature elettriche ad alta tensione;
✓ Analizzare le criticità ambientali connesse all'utilizzo del SF_6 e le motivazioni della sua progressiva eliminazione;
✓ Descrivere le principali soluzioni tecnologiche alternative, con particolare attenzione all'impiego dell'aria secca;
✓ Valutare le prestazioni e l'affidabilità delle nuove apparecchiature attraverso prove di tipo elettrico e meccanico;
✓ Individuare le principali implicazioni progettuali e costruttive connesse alla transizione verso tecnologie SF_6-free.

2. Lo sviluppo normativo

Nel settore dell'industria elettrica di alta tensione (AT), le apparecchiature destinate all'isolamento e all'interruzione degli archi elettrici – quali interruttori di potenza, sezionatori, interruttori di manovra-sezionatori, quadri isolati in aria o in gas (GIS) – sono regolate da un insieme coordinato di norme tecniche e direttive, volte a garantire sicurezza, affidabilità e continuità del servizio. A livello internazionale, il riferimento principale è costituito dalle norme IEC (International Electrotechnical Commission). In particolare, la serie IEC 62271 disciplina le apparecchiature di manovra e di comando per alta tensione, definendo requisiti costruttivi, prestazioni nominali, prove di tipo e di routine, nonché criteri di sicurezza in presenza di archi interni. All'interno di tale serie, norme specifiche riguardano gli interruttori di potenza (IEC 62271-100), i sezionatori e interruttori di terra (IEC 62271-102) e i quadri isolati in gas SF_6 o miscele alternative (IEC 62271-200). Per quanto concerne l'isolamento elettrico, assumono rilievo le norme IEC 60071 sull'isolamento coordinato, che stabiliscono i livelli di tenuta agli impulsi e alle sovratensioni, e le norme IEC 60060 relative alle tecniche di prova in alta tensione. Tali documenti assicurano che le apparecchiature siano idonee a sopportare le sollecitazioni elettriche previste in esercizio e in condizioni di guasto. Nel contesto europeo, le norme IEC sono generalmente recepite come norme EN, fornendo presunzione di conformità ai requisiti essenziali di sicurezza. Le apparecchiature AT non rientrano nel campo di applicazione della Direttiva Bassa Tensione.
In Italia, il quadro normativo di riferimento è costituito da un insieme di norme tecniche (DM del 01/12/1980) e disposizioni legislative (D. Lgs. 81/2008) in linea con il contesto europeo nell'approccio metodologico. Dal punto di vista legislativo, il Decreto Legislativo 81/2008 sulla tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro impone l'adozione di apparecchiature conformi alle norme tecniche applicabili e l'implementazione di misure di prevenzione contro il rischio elettrico, inclusi gli effetti degli archi elettrici. Il decreto richiede inoltre un'adeguata valutazione dei rischi e la formazione del personale.

2.1 Regolamento Europeo sul divieto di utilizzo del gas SF_6

Il gas esafluoruro di zolfo (SF_6) è stato storicamente impiegato nelle apparecchiature elettriche di media e alta tensione per le sue eccellenti proprietà dielettriche e di estinzione dell'arco elettrico, che hanno consentito la realizzazione di quadri compatti e altamente affidabili, in particolare nelle soluzioni GIS. Tuttavia, l'SF_6 è caratterizzato da un potenziale di riscaldamento globale (GWP) estremamente elevato e da una lunga permanenza in atmosfera.

Il Regolamento (UE) 2024/573 sui gas fluorurati, che abroga il Regolamento (UE) n. 517/2014, introduce un quadro normativo più restrittivo finalizzato alla progressiva eliminazione dell'uso dell'SF_6, in linea con gli obiettivi del Green Deal europeo e della neutralità climatica al 2050. Dal punto di vista tecnico, il regolamento prevede il divieto di immissione e esportazione sul mercato UE di nuove apparecchiature elettriche contenenti SF_6 secondo tempistiche differenziate che vanno dal 2026 al 2032 in funzione del livello di tensione e della tipologia di applicazione. In particolare:

- ✓ 1° Gennaio 2026: Divieto assoluto di immissione sul mercato europeo per apparecchiature elettriche (es. quadri MT) contenenti SF_6 fino a 24 kV;
- ✓ 1° Gennaio 2028: Divieto per apparecchiature di alta tensione (AT) da 52 kv a 145 kV;
- ✓ 1° Gennaio 2032 Divieto per apparecchiature elettriche di alta tensione (AT) superiori a 145 kV.

Restano previste alcune deroghe limitate per applicazioni specifiche in cui non siano ancora disponibili soluzioni tecnicamente ed economicamente valide, nonché obblighi stringenti in materia di controllo delle perdite, recupero del gas e corretta gestione a fine vita delle apparecchiature esistenti. Il regolamento incentiva l'adozione di tecnologie alternative a basso impatto ambientale, quali gas isolanti con ridotto GWP, miscele innovative, isolamento in aria o soluzioni prive di gas fluorurati, a condizione che siano garantite prestazioni equivalenti in termini di isolamento, capacità di interruzione dell'arco e conformità alle norme tecniche della serie CEI EN 62271. Per le apparecchiature esistenti contenenti SF_6 non è prevista una dismissione immediata, ma vengono rafforzati gli obblighi di gestione tecnica, inclusi il monitoraggio delle perdite, la tracciabilità delle quantità di gas e il recupero dell'SF_6 a fine vita. L'approccio regolatorio è quindi orientato alla riduzione delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita degli impianti. In sintesi, il regolamento europeo sul divieto dell'SF_6 rappresenta un passaggio chiave verso un'industria elettrica più sostenibile, incentivando l'innovazione tecnologica e riducendo in modo significativo le emissioni di gas serra ad elevato impatto climatico.

2.2 Decreto ministeriale del 01 Dicembre 1980

Ad oggi il Decreto Ministeriale 01/12/1980 si applica anche ai commutatori elettrici a media tensione per la distribuzione primaria e secondaria fino a 52kV inclusi, in

particolare esso disciplina le attrezzature a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche. Esso rimanda la sua pratica attuazione nell'allegato A dal titolo "*Prescrizioni tecniche per la costruzione e l'impiego dei contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico collegate pneumaticamente e contenenti parti attive di apparecchiature elettriche*". Esso è articolato in sei punti:

1) Campo di applicazione;
2) Requisiti e costruzione;
3) Procedure per la certificazione del prototipo;
4) Costruzione dei contenitori e controlli;
5) Esercizio dei contenitori;
6) Disposizione transitorie.

Il rispetto dei primi quattro punti è riferito alla costruzione del prototipo su cui si baserà la validazione della costruzione seriale delle attrezzature da parte del fabbricante. In particolare il primo punto delimita la costruzione ai contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico collegate pneumaticamente e contenenti parti attive di apparecchiature elettriche aventi capacità superiore a 25 litri e pressione di progetto superiore a 0,05 bar, il secondo stabilisce i requisiti di rispondenza del prototipo alle specifiche tecniche Raccolta "M" e Raccolta "S", mentre i punti tre e quattro definiscono le procedure e i controlli ai fini della resistenza meccanica (pressione) da farsi sulle membrature metalliche e isolanti del contenitore ai sensi del codice di costruzione VSR capitolo VSR.8.B.2 punti 2.b e 2.c (vedi paragrafo 3.4).
Infine, è da precisare che l'applicazione del codice VSR e Raccolta "M" sono comunque in linea con gli standard EN di costruzione per le attrezzature oggetto della presente memoria, Mentre la Raccolta "S" rappresenta in alcune circostanze una criticità, in particolare quando la tipologia dei giunti da saldare (saldatura ad orlo EN 15613) non corrisponde ai tipi di giunti previsti in raccolta.

2.3 Modalità di richiesta dell'istanza per l'omologazione di attrezzature con parte elettriche attive: Procedure CIVA

Ad oggi ogni istanza fatta da un privato e pubblico per espletazione un obbligo di legge è gestita per via telematica, in quanto ciò rientra nel processo di digitalizzazione della pubblica amministrazione consiste nella trasformazione dei servizi pubblici attraverso l'adozione di tecnologie digitali. L'obiettivo principale è rendere il rapporto tra Stato e cittadini più efficiente, trasparente e veloce, abbattendo la burocrazia cartacea.
Il portale su cui effettuare l'istanza, dopo opportuna profilazione (registrazione) e chiamato CIVA. Nella fattispecie l'istanza in questione è definita con la prestazione

"*APPARECCHI A PRESSIONE - Omologazione attrezzature con parti elettriche attive*" essa genera un codice ID definito come pratica MASTER composto dalla data di inserimento dell'istanza da parte del richiedente (rosso), un codice seriale generato dal sistema (nero) e un codice di prestazione richiesta dal richiedente (verde) es. 20251006.006625938.POASF. A tale istanza dopo la verificata dell'adeguatezza amministrativa della pratica (corretta documentazione inserita) da parte del personale amministrativo, il sistema assegnerà una matricola che corrisponderà al prototipo da omologare, matricola composta dall'anno (rosso), settore (nero), numero seriale (verde) e UOT di immatricolazione (blu) es. 2025/7/50671/BG
A questo punto il tecnico a cui verrà assegnata la pratica MASTER genererà all'interno della stessa delle sotto richieste a cui il sistema produrrà dei codici ID così come suddetti in maniera automatica, corrispondenti alle prestazioni POAS0 "*APPARECCHI A PRESSIONE - Esame progetto omologazione a.p.e.t.*" e POAS2 "*APPARECCHI A PRESSIONE - Verifica finale omologazione a.p.e.t.*". esse serviranno rispettivamente all'espletamento dell'allegato A del DM 01/12/1980 per quanto attinente ai punti 2 e 4.
Si precisa che tra le ultime due sotto richieste approvazione progetto e verifica finale il sistema può generale ulteriori sotto richieste intermedie (prestazione POAS1) che hanno la finalità di gestire tutte le attività, presso il richiedente, propedeutiche alla verifica finale.

3. Descrizione e principio di funzionamento delle nuove attrezzature realizzate

Per rispondere al regolamento emanato dall'Unione Europea, diverse aziende che progettano e costruiscono apparecchiature e quadri elettrici con tensione di funzionamento superiori ai 1000 V AC, hanno intrapreso un percorso di adeguamento dei prodotti ai nuovi dettami comunitari. Tra queste aziende, quelle operanti nel settore della cosiddetta "media tensione" (con tensioni nominali che vanno tipicamente dai 1000 V AC a 40,5 kV AC) sono le prime in ordine temporale hanno visto l'introduzione del nuovo regolamento e la messa al bando dell'utilizzo del gas SF_6. Negli ultimi decenni, il mercato dei quadri elettrici di media tensione ha visto l'evolversi delle apparecchiature inserendo gli elementi di sezionamento e interruzione dell'arco elettrico all'interno di serbatoi a tenuta molecolare riempiti, tipicamente con il gas SF_6. Questo gas ha grandi capacità di interruzione delle ottime caratteristiche di isolamento, consentendo la riduzione delle dimensioni degli apparecchi e, di conseguenza, dei quadri elettrici. Ulteriore beneficio è stato l'allungarsi sia dei tempi di manutenzione che della vita utile dei prodotti, derivata dall'avere in un ambiente protetto gli elementi più critici dell'intero sistema. Le pressioni di riempimento del gas SF_6 per la fascia di prodotti della media tensione sono tipicamente comprese tra 0,1 e 0,35 bar rel. a 20°C per gli interruttori di manovra-sezionatori e i sezionatori a vuoto.

3.1 *Sostanze e materiali*

Al bando del gas SF_6, il mercato ha comunque richiesto che venissero mantenute le caratteristiche e le migliorie sopra descritte. Per soddisfare tale aspettativa, i produttori hanno valutato sia diversi gas e miscele che l'aumento delle pressioni di riempimento. Tra i gas identificati come idonei è presente l'aria secca, con un GWP inferiore a 1. Questo gas viene utilizzato per l'isolamento e, in modo marginale, per l'interruzione dell'arco elettrico. L'isolamento con aria secca ha comunque comportato, all'interno degli apparecchi, l'allontanamento delle parti a massa dai conduttori in tensione, l'inserimento tra questi di setti e paratie isolanti e l'aumento della pressione del gas. I setti e le parie per l'isolamento sono realizzati in vari materiali isolanti, tra i più utilizzati figurano resina epossidica, nylon e policarbonato. L'aumento della pressione del gas ha come conseguenza l'aumento dell'isolamento tra le parti attive e le parti connesse a massa. Il principio è che, frapponendo più molecole di gas tra le parti a diverso potenziale, la scarica elettrica incontrerà maggiore resistenza e di conseguenza sarà meno probabile che si inneschi un arco elettrico. Tale andamento è tuttavia meno che lineare e, a livello esemplificativo, raddoppiare la pressione di riempimento non garantisce l'isolamento al doppio della tensione ma con l'aumento della pressione si deve adeguare la tenuta meccanica dell'involucro delle apparecchiature. Nel mercato si riscontrano due famiglie di materiali utilizzati per gli involucri degli apparecchi: resina epossidica, caratterizzata da elevata rigidità dielettrica, discreta resistenza meccanica e realizzabile in svariate forme e dimensioni tramite lo stampaggio, e acciai, sia inossidabili che al carbonio (successivamente verniciato per resistere alla corrosione), i quali garantiscono grandi resistenze meccaniche a fronte di spessori contenuti e buona lavorabilità.

3.2 I componenti principali dell'attrezzatura

Lo sviluppo è stato effettuato su due tipologie di apparecchiature tripolari con tensione nominale 24 kV: un sezionatore a vuoto combinato linea più terra (nel seguito ARI) e un interruttore con sezionatore di linea integrato (nel seguito SinterAir). L'apparecchio ARI è costituito da un involucro metallico in acciaio inossidabile AISI 304, isolatori passanti in resina epossidica con annegata al loro interno una barra passante in rame, contatti fissi di linea e terra e contatti mobili a doppio sezionamento che, nelle tre posizioni, possono connettere i contatti fissi superiori con quelli inferiori, sezionare la line o connettere i contatti inferiori con i contatti di terra. L'apparecchio SinterAir è costituito da un involucro metallico in acciaio inossidabile AISI 304 di dimensioni ridotte rispetto a quello dell'ARI, isolatori passanti in resina epossidica, ampolle in vuoto per l'interruzione del corto circuito e il sezionatore di linea. Uno dei vincoli di progetto è che i nuovi apparecchi SF_6-free fossero intercambiabili con le precedenti apparecchiature in SF_6 e che quindi rimanessero inalterate gli ingombri esterni e i punti di fissaggio.
Questo ha comportato l'aumento della pressione di riempimento e conseguentemente dello spessore delle lamiere con cui sono realizzati gli involucri,

oltre all'aggiunta di rinforzi. Di seguito la comparazione tra le pressioni e gli spessori delle lamiere degli apparecchi in SF_6 e quelli in SF_6-free:

Apparecchio	Gas per l'isolamento	Volume apparecchio [L]	Pressione del gas [MPa rel.@20°C]	Spessore lamiera [mm]
Sinter	SF6	50	0,03	2
SinterAir	Aria secca	50	0,12	3
SRI	SF6	70	0,035	1,5
ARI	Aria secca	70	0,07	2,5

Poiché per i nuovi apparecchi il volume è maggiore di 25 lt e la pressione di riempimento è maggiore di 0,05 MPa rel., questi dispositivi rientrano nelle prescrizioni per gli apparecchi a pressione del d.p.r. 1° dicembre 1980.

3.3 Verifiche elettriche effettuate sull'attrezzatura

Per la validazione dei nuovi prodotti, sono state effettuate prove sia dielettriche che meccaniche (per la resistenza alla pressione).
Le prove dielettriche sono quelle richieste dalle normative di prodotto IEC 62271-1 e IEC 62271-200 e prevedono la prova di tenuta alla tensione di impulso atmosferico (125 kV – 145 kV per apparecchi con tensione nominale 24 kV) e di tenuta alla tensione a frequenza di esercizio (50 kV – 60 kV).

3.4 Verifiche meccaniche effettuate sull'attrezzatura

PROVE SPINTE A ROTTURA SU MEMBRATURE DI MATERIALE METALLICO:
Le membrature di materiale metallico sono costituite in acciaio inossidabile tipo AISI 304 (EN-UNI X5 CrNi 18-10). I materiali metallici sono ammessi all'impiego nella costruzione di apparecchi a pressione della Raccolta M o appartengono a norme EN relative a materiali metallici previsti per l'impiego per apparecchi a pressione. Queste membrature sono lavorate tramite piegatura e saldatura al fine di ottenere la forma geometrica desiderata. Si sono effettuate le prove idrauliche a pressione spinta fino a rottura delle membrature metalliche in presenza di Ispettore INAIL, applicando la formula indicata al punto 2c della VSR 8.B.2:

$$p_r = 4{,}25 \times \frac{R}{R_m} \times \frac{s}{s_m} \times p$$

In cui:
p_r = pressione minima di rottura [kg/cm^2]
R = carico di rottura effettivo del materiale [MPa]
R_m = carico di rottura minimo tabellare del materiale [MPa]
s = spessore effettivo in materiale [mm]

s_m = spessore minimo di progetto del materiale [mm]
p = pressione di progetto [kg/cm^2]

Il rapporto s/sm equivale a 1 dato che lo spessore minimo della lamiera equivale allo spessore effettivo. I valori R e Rm sono stati ricavati dai certificati 3.1 delle lamiere utilizzate per la realizzazione dei prototipi:

Apparecchio	Pressione di progetto p [kg/cm^2]	Nr. Certificato	Spessore lamiera [mm]	Rm [MPa]	R [MPa]
SinterAir	1,2	RR24/CCG0302-CFS	3	520	682
ARI	0,7	B24247A28	2,5	520	679
		02316821	1,5	520	613

Per il prototipo ARI si è utilizzato il valore R pari a 679 MPa in quanto condizione peggiorativa. Applicando la formula sopra e utilizzando i valori ricavati dai certificati 3.1 si ricava:

Apparecchio	Pressione minima di rottura pr [kg/cm^2]
SinterAir	6,7
ARI	3,9

Durante la prova si sono rilevati i seguenti valori di rottura:

Apparecchio	Pressione effettiva di rottura [bar]
SinterAir	15
ARI	9

Di seguito gli esiti delle prove:
SinterAir: 15 bar = 15 kg/cm^2 > 6,7 kg/cm^2 → ESITO POSITIVO
ARI: 9 bar = 9 kg/cm^2 > 3,9 kg/cm^2 → ESITO POSITIVO

PROVE SPINTE A ROTTURA SU MEMBRATURE DI MATERIALE ISOLANTE:
Le membrature di materiale isolante sono realizzate in resina epossidica vincolate alle membrature di materiale metallico tramite viti inserite nei corrispondenti inserti metallici annegati nella resina epossidica.

Le viti e gli inseti metallici non contribuiscono alla tenuta meccanica alla pressione della membratura isolante. Si sono effettuate le prove idrauliche a pressione spinta fino a rottura delle membrature metalliche in presenza di Ispettore INAIL, applicando la formula indicata al punto 2b della VSR 8.B.2:

$$p_r = 4{,}25 \times \frac{R}{R_m} \times p$$

In cui:
p_r = pressione minima di rottura [kg/cm^2]
R = carico di rottura effettivo del materiale [MPa]
R_m= carico di rottura minimo tabellare del materiale [MPa]
p = pressione di progetto [kg/cm^2]

Il valore R è la media dei valori di rottura a trazione ricavati dalle prove effettuate in laboratorio, mentre il valore Rm è il valore minimo di rottura a trazione indicato sul datasheet del fornitore:

Apparecchio	Pressione di progetto p [kg/cm^2]	Rm [MPa]	R [MPa]
Sinter Air	1,2	45	50
ARI	0,7	45	57,6

Applicando la formula sopra e utilizzando i valori ricavati durante le prove si ricava:

Apparecchio	Pressione minima di rottura pr [kg/cm^2]
Sinter Air	5,7
ARI	3,8

Durante la prova si sono rilevati i seguenti valori di rottura:

Apparecchio	Pressione effettiva di rottura [bar]
Sinter Air	30
ARI	>55*

La prova è stata interrotta a 55 bar per raggiunti limiti della pompa senza che si sia verificato il cedimento della membratura.
Di seguito gli esiti delle prove
SinterAir: 30 bar = 30 kg/cm^2 > 5,7 kg/cm^2 → ESITO POSITIVO
ARI: 55 bar* = 55 kg/cm^2 > 3,8 kg/cm^2 → ESITO POSITIVO

4. Conclusione

Alla luce delle analisi condotte, emerge come la transizione verso apparecchiature elettriche prive di SF_6 rappresenti un passaggio imprescindibile nel percorso di sostenibilità del settore energetico.

I risultati evidenziano che le soluzioni alternative attualmente disponibili, quali l'impiego dell'aria secca, risultano in grado di garantire adeguati livelli di prestazione, sicurezza e affidabilità, pur richiedendo significativi adattamenti in termini progettuali e costruttivi. Il quadro normativo europeo si configura come un elemento propulsivo fondamentale, in grado di orientare l'innovazione tecnologica verso soluzioni a ridotto impatto ambientale.

In conclusione, l'evoluzione descritta costituisce un contributo concreto al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione e neutralità climatica, promuovendo un modello di sviluppo industriale più sostenibile.

Bibliografia

[1] Regolamento (UE) 2024/573;
[2] Norme tecniche della serie CEI EN 62271;
[3] DM del 01/12/1980;
[4] D.Lgs. 81/2008;
[5] Codice VSR capitolo VSR.8.B.2;
[6] Raccolte "M" ed "S";
[7] Applicativo CIVA.

La sicurezza degli stabilimenti RIR nelle ore di chiusura

M. del Gaudio[1], D. Cerrone[2]

[1]Inail - UOT di Avellino
[2]Ufficio Prevenzione Incendi della Direzione Regionale dei Vigili del Fuoco Puglia

Sommario
Le attività classificate a rischio di incidente rilevante secondo il D.lgs. 105/2025 costituiscono un potenziale pericolo per l'ambiente circostante.
Queste attività dovrebbero essere presidiate durante tutte le 24 ore per evitare che eventuali anomalie o l'ingresso di estranei, possano degenerare in incidenti gravi.
Molti stabilimenti non sono presenziati nelle ore notturne o comunque in orari in cui le attività sono ferme. Normalmente si tratta di attività di stoccaggio di sostanze pericolose in cui non è quindi presente un ciclo di produzione ma solo di immagazzinamento ed eventualmente di vendita diretta dei prodotti.
In occasione delle visite ispettive viene esaminata anche la modalità con cui il Gestore provvede alla sorveglianza del sito e non sempre le scelte sono da ritenersi sufficientemente sicure. A partire da quanto indicato dai gestori in sede di ispezione e quanto riportato nei PEI sono state analizzati i metodi utilizzati per assicurare la sicurezza del sito nelle ore di chiusura.

1. Gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante.

Il Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n. 105, definisce "Stabilimento a rischio di incidente rilevante (RIR)", 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. Per sostanza pericolosa "*si intende una sostanza o miscela di cui alla parte 1 o elencata nella parte 2 dell'allegato 1, sotto forma di materia prima, prodotto, sottoprodotto, residuo o prodotto intermedio*". Per ciascuna sostanza presente, il D.lgs. 105/15, fissa una quantità massima oltre la quale lo stabilimento deve essere classificato a rischio di incidente rilevante. Come esplicitato nell'allegato 1 del D.lgs. 105/15, quando le sostanze pericolose sono più di una, occorre verificare il superamento del limite calcolando un indice che tiene conto della somma dei rapporti tra quantità presente e limite massimo di ciascuna sostanza.
Il Decreto definisce il Gestore 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".*
Il Gestore ha quindi la responsabilità di prevenire gli incidenti che possono provocare danni allo stabilimento ed ai suoi lavoratori, ma anche di evitare che gli effetti di un incidente interessino il territorio circostante lo stabilimento. A tal fine viene realizzato

un documento definito "*Politica di prevenzione degli incidenti rilevanti*" *in cui il Gestore "definisce la propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti, allegando allo stesso, il programma adottato per l'attuazione del sistema di gestione della sicurezza (l'adozione in stabilimenti RIR è obbligatorio);*
Tale politica è proporzionata ai pericoli di incidenti rilevanti e comprende: gli obiettivi generali e i principi di azione del Gestore, il ruolo e la responsabilità degli organi direttivi, nonché l'impegno al continuo miglioramento del controllo dei pericoli di incidenti rilevanti, garantendo al contempo un elevato livello di protezione della salute umana e dell'ambiente.
A seconda delle quantità e qualità delle sostanze presenti gli stabilimenti possono essere classificati in "stabilimenti di soglia inferiore" ed in stabilimenti di "soglia superiore" ed in base a questa classificazione il Gestore deve adempiere a obblighi diversi.
Il Gestore (il soggetto responsabile) dello stabilimento, ai sensi dell'art.13 del D.lgs. 105/15 è obbligato a trasmettere, al CTR, alla Regione o al soggetto da essa designato, al Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare tramite l'ISPRA, alla Prefettura, al Comune, al Comando provinciale dei Vigili del fuoco, una "Notifica" che deve indicare oltre ai rifermenti aziendali, le sostanze utilizzate e la loro pericolosità, la descrizione dei processi, le possibili interferenze da e verso l'ambiente circostante. La notifica deve essere aggiornata ogni volta che ci sia una modifica di quantità e qualità delle sostanze detenute, modifiche dello stabilimento con aggravio del rischio, chiusura o cessione dello stabilimento.
La verifica di quanto dichiarato è demandato ad Ispra ed è a spese del Gestore.
Per gli stabilimenti di soglia superiore il Gestore deve presentare ed aggiornare periodicamente un "Rapporto di sicurezza" in cui dichiara tutte le attività svolte ai fini della prevenzione degli incidenti che viene esaminato ed approvato dal Comitato Tecnico Regionale presieduto dalle Direzioni Regionali dei Vigili del Fuoco e a cui partecipano anche l'Inail, le asl, le regioni ed anche le amministrazioni locali.
Per i soli stabilimenti di soglia superiore il Gestore predispone il piano di emergenza interna (PEI) sentiti i lavoratori e le eventuali ditte esterne che operano all'interno dello stabilimento ai sensi dell'Art. 20 del D.lgs. 105/15 e con le modalità previste dal D.M. 138/09. Per gli stabilimenti di soglia inferiore il Gestore, ai sensi dell'art 12 del D.lgs. 105/15 "*è tenuto ad adottare tutte le misure idonee a prevenire gli incidenti rilevanti e a limitarne le conseguenze per la salute umana e per l'ambiente*" producendo una procedura di salute e sicurezza interna SSI.
Ai sensi dell'art. 21 la Prefettura sentiti gli Enti coinvolti e la popolazione predispone il piano di emergenza esterno (PEE) che ha l'obiettivo di individuare i soggetti coinvolti e le azioni da mettere in atto per contrastare gli effetti di un incidente. Il Gestore ai sensi del art. 19 comma 3 (effetto domino) e Art. 20 comma 4 (Piano di emergenza interno) del D.lgs. 105/15 deve fornire le informazioni necessarie.

A seconda delle sostanze presenti l'impatto sull'ambiente circostante può interessare matrici ambientali diverse. Il maggiore danno probabilmente può provenire dalla dispersione in aria di sostanze tossiche in forma di gas o di particolato provenienti da reazioni incontrollate, combustioni o miscele di sostanze.
Non meno preoccupanti sono le dispersioni nel suolo che evidentemente sono più gravi quando le caratteristiche di permeabilità dei suoli permettono di raggiungere le falde acquifere. Infine, occorre prevedere gli effetti di incendi ed esplosioni che normalmente interessano distanze minori dallo stabilimento sia in termini di effetto onda d'urto che di diffusione delle fiamme.

Gli stabilimenti RIR possono essere di vario tipo e distinguiamo principalmente: Stabilimenti di produzione di sostanze chimiche, stabilimenti petrolchimici di raffinazione, depositi di gas combustibili, stabilimenti di produzione di materiali esplosivi, stabilimenti in cui sono detenute sostanze pericolose in quanto parte integrante del processo produttivo e stabilimenti in cui le sostanze pericolose costituiscono il sottoprodotto dell'attività principale.
Non tutti gli stabilimenti hanno produzione h24 ma molte rispettano un orario di chiusura, in particolare nelle ore notturne.
Quando lo stabilimento è chiuso il Gestore deve preoccuparsi di garantire la sicurezza da eventuali intrusioni dall'esterno ma anche di garantire che in caso di incidente possano essere attivate le misure previste nel PEI e nel PEE.

2. L'esperienza delle visite ispettive

Durante le visite ispettive ex art. 27 del D. Lgs. n. 105/2015 è stato possibile verificare le varie soluzioni adottate quando gli stabilimenti sono chiusi.
Tutti gli impianti sono normalmente recintati con muri o reti e con elementi che impediscono di scavalcarli agevolmente. Anche le vie di accesso sono protette da cancelli particolarmente robusti e bloccati da lucchetti o altri tipi di serrature. Queste aperture peraltro costituiscono anche le vie di fuga nelle situazioni d'emergenza e quindi sono normalmente sbloccate nelle ore in cui è presente il personale.
Il perimetro esterno dell'azienda può essere dotato di sensori antintrusione, collegati ad un impianto di allarme sonoro ed eventualmente collegato ad una centralina telefonica per avvertire il Gestore o altri del tentativo di intrusione.
Anche l'illuminazione è normalmente realizzata in modo da rendere visibile dall'esterno la presenza di persone. Solo in pochi casi c'è la presenza di un custode che è presente nell'orario di chiusura o che risiede stabilmente nel sito produttivo.
Le intrusioni da parte di persone hanno più spesso l'obiettivo di asportare materiali o piccole attrezzature, perché i prodotti dell'attività non sono l'obiettivo dei furti in quanto spesso sono voluminosi o di difficile commercializzazione. Non è comunque da escludere che sostanze particolarmente pericolose possano essere sottratte ed utilizzate per azioni dimostrative. I ladri possono o meno essere consapevoli del luogo in cui si trovano e possono sottrarre attrezzature e materiali (ad esempio cavi

elettrici in rame) innescando involontariamente l'incidente. Questi siti inoltre possono essere possibili obiettivi di terroristi che volontariamente vogliano creare incidenti.



Figura 1. Recinzione in muratura di deposito di GPL con aperture d'emergenza.(Fonte Autori).

Molto più spesso i gestori affidano la sorveglianza a società di vigilanza che provvedono a visitare lo stabilimento con ronde notturne che hanno il compito di verificare che non ci siano intrusioni o che non si verifichino incendi o altri eventi. Questi addetti normalmente non accedono al sito autonomamente ma hanno il compito di segnalare eventuali anomalie al Gestore.
Anche se il ciclo produttivo è sospeso è inoltre da considerare l'eventualità che si possa verificare un evento previsto dal PEI anche a seguito di calamità naturali in cui può essere necessario attivare le procedure di emergenza.
In stabilimenti opportunamente attrezzati sono stati installati sistemi di controllo che permettono di accedere da remoto ai quadri di controllo e di verificare eventuali malfunzionamenti inviando ai referenti in tempo reale gli alert degli eventi in corso e.
Nella tabella sono descritti i risultati dell'analisi dei PEI di siti che sono stati oggetto di visite ispettive da parte dei tecnici della UOT di Avellino e che non erano direttamente presidiati nelle ore di chiusura.

	Tipologia	Recinzione	Presidio ore notturne
1	Deposito ed imbottigliamento GPL	Muro	Visite vigilanza privata
2	Deposito ed imbottigliamento GPL	Muro	Visite vigilanza privata e sistema di telecontrollo da remoto
3	Deposito fuochi d'artificio	Depositi interrati	Visite vigilanza privata ed antintrusione
4	Deposito e commercializzazione	Muro	Presenza in sito Guardie

	esplosivi da mina		giurate 24/24
5	Deposito ed imbottigliamento GPL	Rete metallica	Visite vigilanza privata ed antintrusione
6	Deposito e commercializzazione prodotti chimici	Muro	Visite vigilanza privata e collegata ad antiintrusione
7	Deposito e commercializzazione prodotti chimici	Muro	Visite vigilanza privata formata e collegata ad antintrusione

Tabella 1. Esame attività di controllo nelle ore di chiusura.



Figura 2. Sistemi di controllo e verifica controllabili da remoto. (Fonte Autori)

3. Considerazioni

Le modalità con cui sorvegliare il sito RIR nelle ore di chiusura sono molteplici perché vengono scelte dal Gestore e sono riportate nei piani di emergenza sottoposti alla verifica da parte degli Enti preposti. La scelta ovviamente deve tener conto delle caratteristiche del sito delle sostanze immagazzinate e dei danni che eventualmente possono scaturire da eventi in assenza del personale o dovuti a manomissioni volontarie o accidentali da parte di soggette esterni all'azienda.

La valutazione dei rischi effettuata dal Gestore prevede una serie di eventi ritenuti più probabili in base ad esperienze del passato o guasti di elementi critici. La

volontarietà da parte di soggetti esterni potrebbe favorire eventi ritenuti improbabili e per i quali non sono state previste contromisure.
Gli eventi che possono preoccupare maggiormente sono quelli che rilasciano sostanze tossiche in aria e che quindi possono rapidamente coinvolgere la popolazione circostante e quelli meno evidenti, ma anch'essi molto pericolosi, di inquinamento delle falde. Gli incendi e le esplosioni sono paradossalmente quelli immediatamente percepiti ma che sono normalmente limitati al perimetro del sito RIR salvo che per gli eventuali rilasci di sostanze tossiche prodotte dalle combustioni.
La custodia di sostanze in grado di produrre dispersioni in aria e nel sottosuolo deve essere particolarmente accurata prevedendo sistemi di protezione come blocchi delle tubazioni o la segregazione in appositi edifici.
Non è da trascurare inoltre l'effetto domino, cioè il coinvolgimento di stabilimenti o di strutture vicine allo stabilimento che possono aumentare gli effetti dell'evento. In particolare, l'interruzione del traffico di importanti vie di comunicazione può pregiudicare l'intervento dei mezzi di soccorso.
Nella valutazione dei rischi il Gestore prevede anche l'effetto di eventi naturali (NATECH) quali terremoti, alluvioni ecc. e quindi gli impianti e le attrezzature sono normalmente verificate per resistere agli eventi prevedibili in quella zona. Il verificarsi di eventi naturali nelle ore di chiusura potrebbe allungare i tempi per attivare le misure necessarie per limitare gli effetti dei danni.

4. Conclusioni

Il Gestore che sceglie di lasciare non direttamente presenziato il sito RIR è sicuramente mosso da una esigenza di tipo economico, ma deve attentamente valutare la fattibilità di tale scelta che di fatto costituisce una ulteriore criticità. E opportuno anche considerare che alcuni siti sono stati assoggettati al D.lgs. 105/15 o sono stati classificati "stabilimenti di soglia superiore" a causa dell'aggiornamento delle categorie di pericolosità delle sostanze (allineate al regolamento CLP) e alle nuove regole di calcolo per la somma delle quantità di sostanze pericolose. Questi siti hanno dovuto quindi riorganizzare il sito e soprattutto hanno dovuto attivare un approccio documentale alle attività di sicurezza molto diverso da quello precedentemente utilizzato.
Gli impianti che osservano un orario di chiusura sono generalmente quelli in cui le sostanze pericolose sono immagazzinate ed eventuali cicli di produzione possono essere fermati.
I rischi sono quindi legati soprattutto manomissioni da parte di malintenzionati o ad eventi naturali.
I siti dotati di sistemi automatici possono prevedere un controllo da remoto e quindi possono garantire maggiore sicurezza a condizione che i referenti siano in grado di raggiungere in tempi rapidi il sito. Il controllo da remoto inoltre potrebbe permettere di attivare molte delle azioni previste dal Piano di Emergenza Interna, prima di

raggiungere direttamente il sito. Anche le informazioni per le popolazioni potrebbero essere attivate in via precauzionale non appena si verifica l'evento.
Il controllo da remoto introduce però un ulteriore rischio di hackeraggio del sistema informatico. A tal fine il Gestore dovrà dotarsi dei migliori sistemi di protezione dei sistemi informatici e dovrà curare particolarmente la formazione del personale sulla corretta gestione degli accessi al sistema informatico.
Per gli stabilimenti incustoditi nelle ore di chiusura è necessario che il piano di emergenza interna ed il piano di emergenza esterna prevedano anche gli interventi da effettuare in assenza dei lavoratori.
Come evidenziato dall'analisi riassunta in tabella 2 in tutti i casi viene attivato un servizio di vigilanza privato che sorveglia periodicamente il sito per tutelare prevalentemente il patrimonio dell'azienda, o che interviene in caso di allarme per intrusioni.
L'adozione di un sistema di sorveglianza da parte di società esterne dovrebbe però prevedere la formazione degli addetti alla vigilanza per renderli consapevoli delle caratteristiche del sito e renderli capaci di cogliere i segnali utili per quantificare l'evento e comunicarli al gestore ed ai comandi dei VV.F..
Una criticità spesso evidenziata durante le visite ispettive riguarda i sistemi di recinzione degli stabilimenti che in molti casi e facilmente eludibile. Una semplice rete metallica, se non è associata ad un allarme antiintrusione, viene facilmente aggirata come pure i cancelli ad apertura automatica o uscite di sicurezza che nelle ore di chiusura dovrebbero essere bloccate.
Le moderne tecnologie hanno sicuramente complicato le cose dato che l'utilizzo di droni può facilitare l'ingresso anche in presenza di recinzioni ritenute adeguate. In particolare, tali siti dovrebbero classificati quali "NO FLY ZONE" e segnalate con apposita segnaletica.
Il sito deve essere sempre chiaramente riconoscibile con idonea segnaletica per comunicare a chi si avvicina, in modo occasionale o anche in modo fraudolento, che si tratta di un sito produttivo speciale.
In conclusione, questo lavoro vuole richiamare l'attenzione dei gestori e dei loro consulenti sulla necessità di porre la massima attenzione nel valutare i rischi del sito RIR nelle ore di chiusura con la stessa precisione riservata alle attività svolte in presenza dei lavoratori.
L'installazione di sistemi automatici di rilevazione e di estinzione dei principi d'incendio, di chiusura dei flussi delle sostanze depositate può essere una scelta da adottare maggiormente quando nel sito non è sempre presente il personale. Anche in questo ultimo caso i sistemi debbono essere efficacemente manutenuti e verificati.

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] O. AZARENKO et. Al. ANALYSIS OF TERRORIST ATTACKS BY ATTACK DRONES IN MAY 2024. June 2025 . Emergency Situations Prevention and Liquidation 9(1):6-16 DOI: 10.52363/2524-2636.2025.9.1.
[3] M. del Gaudio et Al. Analisi di Text mining applicato alle attività a rischio di incidente rilevante. Atti Convegno SAFAP 2021 ISBN: 978-88-7484-709-9
[4] M. del Gaudio et. Al. La comunicazione in attività a rischio d'incidente rilevante. Atti del Convegno SAFAP 2021 ISBN: 978-88-7484-709-9

Sistemi innovativi per la sicurezza operazionale attiva di impianti di trasformazione e di processo: vantaggi, criticità e prospettive

M. Pirozzi[1], A. Ferraro[1], M. Spagnuolo[1], L. Ricciardi[1], R. Gabbrielli[2], L. Landi[3]

[1]Inail - Dit
[2]Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale
[3]Università degli Studi di Perugia - Dipartimento d'Ingegneria

Sommario
Gli impianti di trasformazione, produzione e processo, inclusi quelli caratterizzati dalla presenza di attrezzature a pressione, sono oggi costituiti da gruppi di macchine, quasi-macchine, attrezzature e altre unità funzionali, integrate tramite tecnologie avanzate di comando e controllo. Sistemi basati sull'interconnessione di tali tecnologie governano le diverse funzionalità operative e gestionali dell'impianto. Negli ultimi anni si sta assistendo allo sviluppo di soluzioni *smart* basate sull'impiego coordinato di strumenti hardware (ad esempio sensoristica avanzata, sistemi di computer vision, ecc.) e software (quali algoritmi di intelligenza artificiale), inizialmente orientate al controllo e all'ottimizzazione della produzione, ma potenzialmente in grado, se opportunamente progettate, di supportare anche la gestione automatizzata delle situazioni di pericolo e di rischio tipiche degli impianti di processo, comprese le condizioni di sovrapressione e di perdita di contenimento.
Il laboratorio "Sicurezza degli impianti di trasformazione e produzione" dell'Inail ha avviato, nell'ambito dei piani triennali di ricerca scientifica e istituzionale, specifici progetti finalizzati allo sviluppo e all'implementazione di sistemi di sicurezza innovativi per il monitoraggio e il controllo degli impianti, capaci di attivare anche funzioni di comando automatico finalizzate alla mitigazione o all'eliminazione dei pericoli al verificarsi di condizioni critiche.
In questo articolo, a partire dall'analisi di sistemi sviluppati in contesti applicativi specifici, ma esportabili ad altri impianti di processo e a sistemi in pressione, si evidenziano i principali vantaggi e le potenzialità applicative emerse, nonché le criticità connesse al quadro normativo vigente, recente e in evoluzione, con particolare riferimento alle norme di sicurezza funzionale e all'impiego di tecnologie innovative basate su AI.

1. Introduzione

Per la gestione degli impianti di trasformazione e di processo da anni si stanno sviluppando e sono stati implementati sistemi smart che utilizzano strumenti hardware e software volti, in generale, al controllo della produzione. Per quanto riguarda, ad esempio, il rapido sviluppo delle tecnologie di Intelligenza Artificiale (AI) e la loro crescente diffusione negli impianti di processo, è possibile affermare che la loro

adozione è oggi guidata principalmente da obiettivi di produttività, qualità e ottimizzazione dei processi, mentre gli impieghi orientati alla sicurezza e alla tutela della salute dei lavoratori sono ancora marginali. Gli investimenti sono soprattutto mirati a soluzioni capaci di ridurre i tempi ciclo, migliorare la precisione delle lavorazioni, ottimizzare la pianificazione e aumentare la flessibilità operativa, rispondendo così alle richieste dei mercati globali. Inail, con la collaborazione di partner istituzionali (Università ed Enti di ricerca) e anche di aziende inserite nel settore dell'innovazione tecnologica, sta utilizzando le suddette tecnologie innovative per "analizzare e gestire" le possibili situazioni di rischio che possono manifestarsi durante i cicli di lavoro di impianti di processo e macchine, con l'intento di eliminare e/o mitigare i problemi di sicurezza e ottenere quella che può essere definita la "*sicurezza operazionale attiva intelligente*". Come già rimarcato, tale processo di implementazione è favorito sia dalla presenza sempre più rilevante nei diversi cicli operativi (approvvigionamento, trasformazione, realizzazione, trasporto, stoccaggio, ecc.) di macchine e attrezzature autonome o semi autonome dotate o predisposte ad "ospitare" quella che possiamo denominare "elettronica di bordo", sia dallo sviluppo di sensoristica avanzata che permette il monitoraggio delle diverse condizioni al contorno, quali: stati operativi di macchine e impianti, possibili elusioni di dispositivi di protezione, tracking degli operatori presenti nell'ambiente di lavoro.
Si è osservato come l'integrazione di strumenti e tecnologie innovative, quali ad esempio algoritmi di intelligenza artificiale, sensori wireless (RFID), dispositivi indossabili intelligenti, modelli digitali, sistemi di visione e rilevamento, oggi può e deve mirare ad ottenere la suddetta sicurezza operazionale attiva realizzata direttamente dalle attrezzature (anche a pressione) e dai componenti presenti in un impianto. A tal riguardo, nel prossimo paragrafo sarà illustrato un prototipo sviluppato nell'ambito delle attività di uno specifico progetto di ricerca Inail e attuato mediante bandi di ricerche in collaborazione (Bric), strumenti ideati da Inail per finanziare progetti di ricerca biennali e multidisciplinari da realizzare insieme ad università ed enti di ricerca, al fine di sperimentare soluzioni innovative per migliorare la salute e sicurezza sul lavoro.

2. Sistemi innovativi per la sicurezza operazionale: descrizione e funzionalità del sistema prototipale Inail

Come detto, diversi sono stati i progetti di ricerca volti all'analisi e all'implementazione di tecnologie innovative per il miglioramento dei livelli di sicurezza che Inail, in particolare il laboratorio "Sicurezza degli impianti di trasformazione e produzione" del Dipartimento Innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, Prodotti e insediamenti antropici, ha realizzato negli ultimi anni. In particolare, di seguito si fa riferimento al progetto di ricerca più recente di cui al bric 2022 ID 40 "*Sistema smart integrato basato sull'intelligenza artificiale per la gestione della sicurezza degli operatori in processi di produzione (AISAFETY)*", giunto alla conclusione nel secondo semestre del 2025 e che per la sua realizzazione ha visto la partecipazione, oltre che dell'unità

operativa Inail, del Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale (DICI) dell'Università di Pisa, destinatario istituzionale capofila del progetto che si è occupato dello sviluppo concettuale del sistema smart, del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII) dell'Università di Pisa per lo sviluppo del sistema RFID e del modulo di intelligenza artificiale, del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia per lo sviluppo e la realizzazione del sistema prototipale, e dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo" (ISTI) di Pisa del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) per lo sviluppo del modulo di computer vision. L'obiettivo generale della ricerca è stato la realizzazione di un nuovo sistema prototipale di supervisione integrato smart per sistemi di produzione atto a ridurre i rischi connessi ad errori degli operatori e manomissioni. Sfruttando le potenzialità dell'utilizzo combinato dei sistemi di identificazione automatica a radiofrequenza quali l'RFID-UHF (Radio Frequency Identification – Ultra High Frequency) che consentono il rilevamento delle posizioni di operatori e oggetti presenti nell'area di lavoro, della tecnologia di visione artificiale (Computer Vision, CV) che consente di acquisire e analizzare il comportamento dell'operatore e gli stati di funzionamento di macchine, attrezzature (anche a pressione) e dispositivi di protezione, si rendono disponibili informazioni in tempo reale sullo stato del sistema produttivo. La conoscenza di tali informazioni permette ad un modulo di intelligenza artificiale basato su regole di riconoscere le condizioni di rischio per gli operatori e di procedere alla messa in sicurezza del sistema producendo in output segnali che arrivano ai sistemi di controllo delle unità della linea di produzione e agli operatori stessi. In pratica, in determinati casi il sistema può essere configurato in modo da procedere all'arresto dei movimenti pericolosi di macchine, attrezzature e/o parti di esse migliorando così la sicurezza del sistema di produzione.

In figura 1 è rappresentata la struttura complessiva del sistema ideato.

Il dataset completo raccolto dai sistemi RFID e CV, insieme alla conoscenza di alcuni stati operativi delle parti componenti il sistema di produzione, viene trasmesso al modulo AI, il quale identifica potenziali rischi per gli operatori correlati ad errori, manomissioni e stati operativi dell'impianto. Successivamente, il modulo AI genera in output l'attivazione di comandi di arresto sul sistema di produzione e/o l'invio di notifiche di avviso ai lavoratori su dispositivi mobili portatili. Il sistema di produzione è costituito da un cobot e da un tornio provvisto di una bombola per simulare la presenza o meno di aria compressa. Infatti, in un sistema di produzione di questo tipo, l'aria compressa è a servizio per funzioni pneumatiche (Torni CNC), cioè:

- per automatizzare i processi di serraggio del pezzo alimentando i mandrini pneumatici o i cilindri che bloccano il materiale in posizione;
- per il cambio utensile: l'aria compressa aziona i meccanismi di sblocco e blocco degli utensili nella torretta o nel magazzino;
- per la gestione dell'apertura automatica delle porte di protezione o l'azionamento di accessori come le lunette pneumatiche;
- per funzioni di raffreddamento e lubrificazione;

- per la pulizia dell'area di lavoro.

L'intero sistema integrato è completato da un software con interfaccia front-end per la gestione a distanza da parte di un supervisore.

La figura 2 evidenzia il flusso di informazioni dai moduli del dispositivo prototipale realizzato fino all'operatore correlato alla logica di funzionamento.

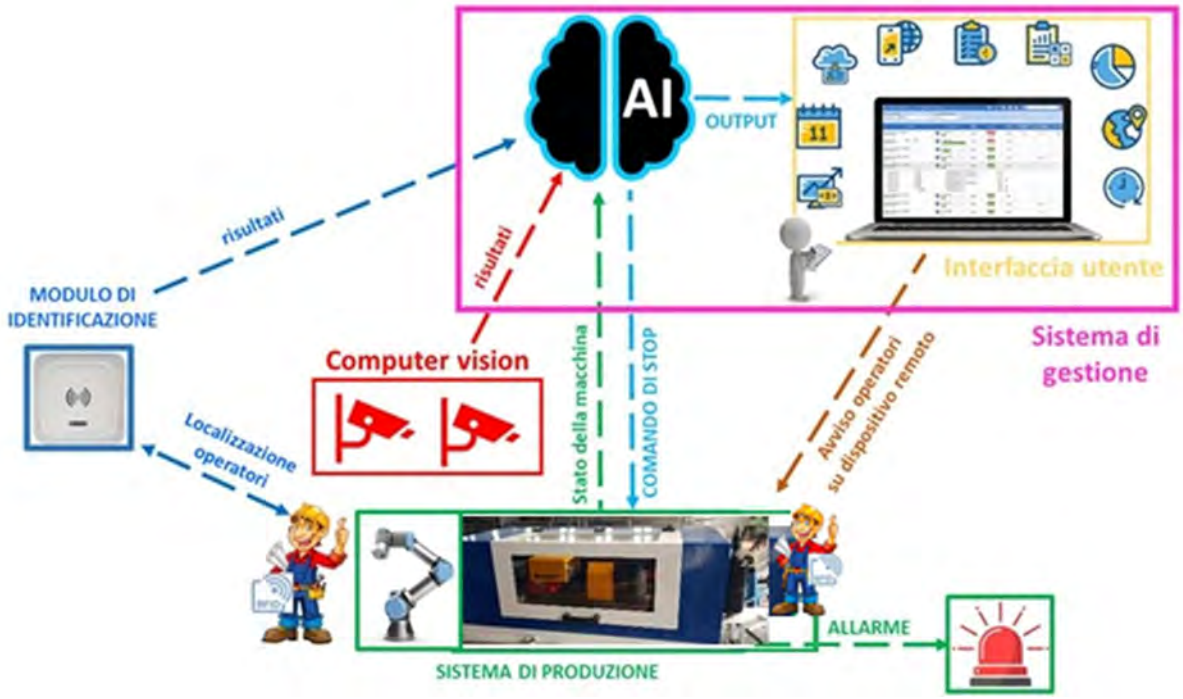


Figura 1. Struttura complessiva del sistema AISAFETY



Figura 2. Flusso di informazioni dai moduli del dispositivo prototipale fino all'operatore

Nella parte sinistra dello schema di figura 2 sono rappresentati i sistemi di input, ovvero i dispositivi che forniscono al sistema le informazioni utili per il monitoraggio:

- il sistema di computer vision (CV), tramite le telecamere;
- il sistema RFID, per il tracciamento degli operatori, dei DPI e degli oggetti;

- il robot (cobot) opportunamente “sensorizzato”;
- la macchina operatrice (tornio) opportunamente “predisposta con gli attrezzaggi necessari”, ivi compreso l’asservimento pneumatico (bombola con aria compressa per la simulazione del sistema ad aria compressa del tornio).

Questi dispositivi inviano in tempo reale i dati raccolti al modulo centrale di Intelligenza Artificiale (AI) che li elabora verificando al contempo il rispetto delle regole di sicurezza preconfigurate. In caso di violazione di una regola che potrebbe comportare una situazione di pericolo (es. rimozione di un riparo, oscuramento telecamera, conteggio operatori non conforme, valvola adduzione aria aperta o chiusa), l’AI genera un primo output verso una centralina di sicurezza che ha il compito, attraverso specifici contatti normalmente chiusi (NC), di generare l’arresto dei movimenti pericolosi del sistema di produzione (arresto di una o di tutte le unità presenti) se ciò è reputato necessario, altrimenti è generato semplicemente un avviso di violazione della regola.

Gli output sono visualizzati, attraverso l’interfaccia desktop del software, dagli utenti profilati sia come operatori sia come amministratori e supervisori. Questi ultimi sono abilitati a gestire le notifiche, visualizzare lo storico delle anomalie e a supervisionare il sistema. Un segnale di avviso è inviato anche all’interfaccia mobile dell’operatore, ovvero all’app installata sul dispositivo portatile personale. Tale funzionalità garantisce che l’operatore venga immediatamente informato, anche se non si trova davanti a una postazione fissa. Il sistema AISAFETY prevede una procedura strutturata per la gestione dell’arresto di emergenza attivabile da remoto, attraverso la pressione di un pulsante fisico, solo dall’amministratore del sistema. Ciò garantisce l’intervento tempestivo in presenza di condizioni ritenute potenzialmente pericolose o anomale.

La figura 3 mostra il sistema prototipale così come realizzato in uno degli ambienti di laboratorio nel quale è stato testato. Il sistema si compone dei seguenti elementi:

- le unità del sistema di produzione (tornio e cobot) per replicare un possibile scenario industriale all’interno del quale, uno o più operatori, svolgono lavorazioni coadiuvati dal cobot che esegue task predefiniti in funzione del ciclo di lavoro per cui è stato programmato;
- il sistema RFID-UHF con tag indossati dagli operatori, integrati ad esempio all’interno dei dispositivi di protezione individuale (DPI) e tag disposti in corrispondenza di determinate parti delle unità caratterizzanti il sistema; alcuni di questi tag sono dotati di accelerometri in modo da individuare le diverse posizioni assunte da operatori e/o da parti delle macchine sulla base dei valori di accelerazioni che si modificano con il movimento;
- il sistema di computer vision (CV) che gestisce le telecamere è in grado di inquadrare le zone di lavoro e, grazie a specifici algoritmi di riconoscimento delle immagini, valutare la presenza o meno di operatori e rilevare possibili condizioni di rischio quali la rimozione o il non corretto posizionamento di un riparo grazie al monitoraggio di marker ArUco opportunamente disposti;

- il modulo basato sull'Intelligenza Artificiale che, sulla base delle informazioni prodotte dai sistemi RFID e dalle videocamere e in considerazione della fase operativa in corso, valuta la presenza di possibili situazioni di rischio e produce, in output, un avviso all'operatore e, se necessario, un segnale al sistema di comando per eseguire un arresto operativo;
- il quadro di comando del sistema di produzione che si interfaccia con l'operatore e con il modulo basato sull'AI;
- un software di gestione che, tramite un'interfaccia (front-end), consente ad un operatore supervisore e/o al responsabile dell'impianto di monitorare il corretto funzionamento del sistema e delle azioni eseguite sulla base delle decisioni prese dal modulo AI ed eventualmente intervenire per azioni correttive, con particolare riferimento alle situazioni di emergenza che dovessero sorgere.

La necessità di controllare il sistema delle azioni compite dall'AI, durante l'esecuzione delle attività, è specificata ai punti 1 e 1.2.1 dell'Allegato III dei requisiti essenziali di salute e sicurezza del nuovo Regolamento (UE) 2023/1230 sulle macchine.

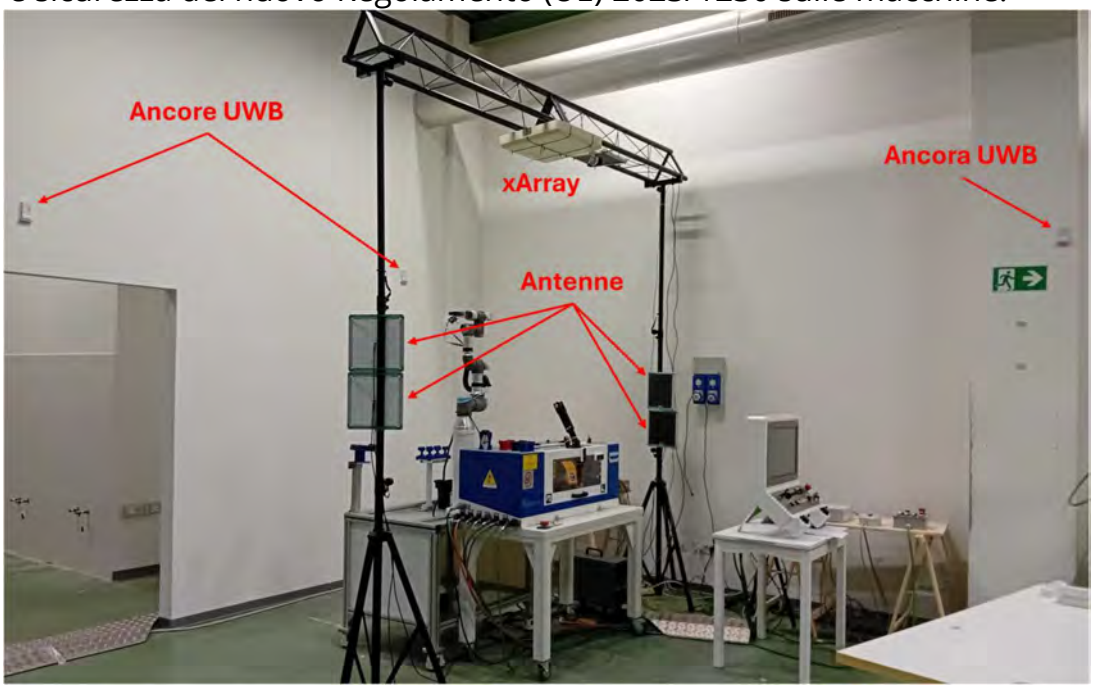


Figura 3. Sistema prototipale nell'ambiente di prova

Occorre poi sottolineare che tale Regolamento include "i componenti di sicurezza con comportamento auto-evolutivo totale o parziale che utilizzano approcci di apprendimento automatico per garantire funzioni di sicurezza" tra i componenti di sicurezza presenti nell'Allegato II e quindi, se necessario, deve essere data la possibilità di comprendere le ragioni di determinate decisioni prese dal sistema e deve essere sempre presente un supervisore che possa svolgere una sorveglianza da remoto e quindi ricevere informazioni e/o avvisi e trasmettere ordini alle macchine bloccando azioni attuate per mezzo dell'AI.

Per il funzionamento del sistema, nel prototipo realizzato sono stati quindi implementati diversi tipi di segnali di uscita:

- ✓ segnali di avviso ai dispositivi degli operatori (ad esempio, smartphone);

- ✓ segnali di avviso al responsabile e raccomandazione di non continuare la produzione fino a quando il problema non è risolto;
- ✓ segnale di arresto d'emergenza;
- ✓ segnale di allarme: un segnale acustico e visivo generale di pericolo applicato nell'area interessata (tramite una sirena e un dispositivo lampeggiante);
- ✓ comando di arresto sulle macchine (arresto delle operazioni del sistema di produzione per rimuovere i pericoli rilevati).

Sul sistema di produzione sono posizionati marker ArUco (tipologia di marcatori Qr-code codificati in bianco e nero) e tag RFID con accelerometro; in figura 4 sono evidenziati quelli sulla macchina tornio.

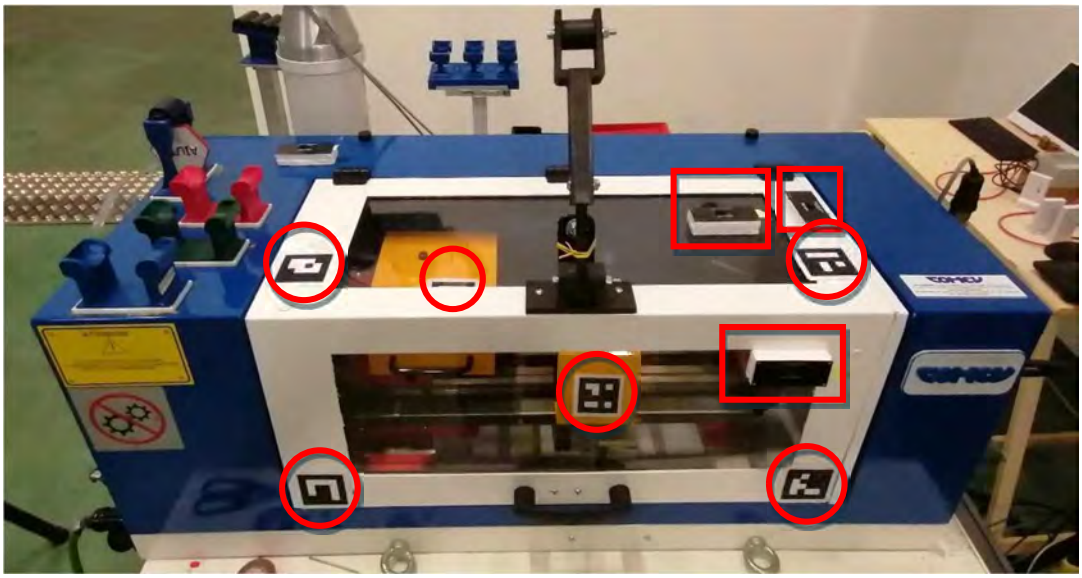


Figura 4. Marker ArUco (evidenziati dalle forme circolari in rosso) e tag RFID (evidenziati dalle forme rettangolari in rosso) installati sullo sportello esterno interbloccato e sul riparo interbloccato del mandrino.

La figura 5 mostra il campo visivo delle due telecamere installate per la visualizzazione dei marker ArUco.

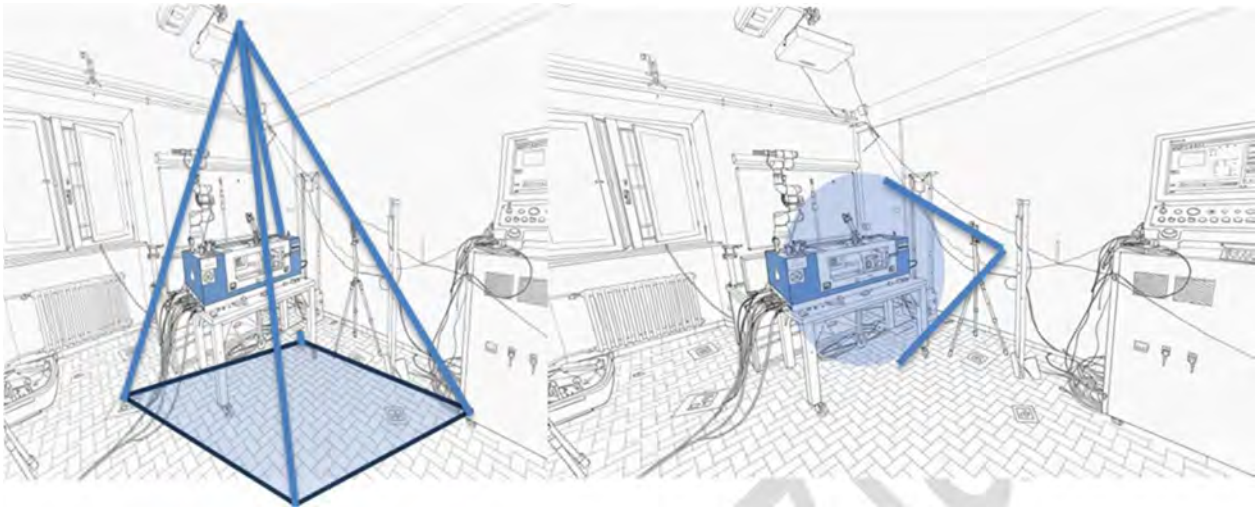


Figura 5. Campo di visione delle due telecamere di cui è composto il sistema di CV

Per aderire alle condizioni di sicurezza desiderate, il sistema di gestione è stato sottoposto ad "addestramento" per identificare efficacemente le anomalie che rappresentano potenziali situazioni di rischio per gli operatori.
Sono stati quindi individuati gli scenari operativi, progettati anche per testare le funzionalità del sistema prototipale in diverse condizioni, consentendo un'analisi approfondita delle sue capacità di rilevare potenziali pericoli e prevenire incidenti. Simulare situazioni pericolose è essenziale per valutare l'efficacia del sistema nella sicurezza operativa e garantire che possa prevenire incidenti attraverso una risposta tempestiva e accurata.
Nella tabella 1 sono riportati i casi applicativi in cui il sistema AISAFETY può essere utilizzato per la gestione della sicurezza del dispositivo sperimentale in situazioni operative relative a guasti, malfunzionamenti e comportamenti errati. Ogni volta che viene riscontrata un'anomalia è previsto che il sistema "AI" invii un segnale al software di supervisione il quale a sua volta invia un avviso all'operatore sul dispositivo mobile.

ELUSIONE	**COMPORTAMENTO SCORRETTO**
Elusione ripari mobili	Monitoraggio condizioni operatore
Elusione ripari fissi	Monitoraggio posizione oggetti
Conteggio numero di persone	**MANUTENZIONE**
Oscuramento telecamere sistema CV	Monitoraggio presenza sistemi ausiliari
Manomissione tag rfid	**CONTROLLO DELL'ALTERAZIONE**
STATI OPERATIVI	Manomissione informatica cobot
Apertura/chiusura valvola di adduzione aria compressore	Movimento non previsto del cobot

Tabella 1. Casi applicativi d'intervento del sistema AISAFETY nel sistema produttivo prototipale

Queste sono le casistiche che sono state contemplate e sono da considerarsi integrabili e sostituibili a seconda dello scenario considerato.

3. Vantaggi e criticità dei sistemi innovativi per la sicurezza operazionale

I vantaggi di un sistema di sicurezza del tipo di quello realizzato sono diversi. Un primo valore aggiunto inconfutabile è che nella sua logica di funzionamento tiene conto anche della possibilità di poter essere esso stesso eluso o bypassato. Un ulteriore vantaggio è che il sistema, per come è stato ideato, può essere "scalabile", per la sua struttura e per la gran parte della componentistica utilizzata, in contesti differenti e scenari lavorativi diversi.
I risultati ottenuti indicano che l'approccio proposto non è limitato alla tipologia impiantistica considerata, ma risulta ampiamente trasferibile a diversi impianti di processo, caratterizzati da differenti sostanze pericolose, configurazioni operative e livelli di complessità. La natura sistemica del metodo consente infatti di integrare in modo coerente aspetti tecnici, organizzativi e umani, rendendolo applicabile lungo l'intero ciclo di vita dell'impianto. In contesti quali impianti chimici, petrolchimici e oil

& gas, l'approccio supporta l'analisi di scenari di perdita di contenimento e di escalation incidentale, risultando particolarmente efficace nella gestione delle attività non routinarie e delle interferenze operative. Analogamente, negli impianti emergenti per la produzione e lo stoccaggio di idrogeno, il framework consente di affrontare scenari caratterizzati da elevata incertezza e dinamiche rapide di rilascio e accensione, favorendo l'integrazione di sistemi di monitoraggio avanzati. Applicazioni rilevanti emergono anche nei settori del trattamento rifiuti, delle utilities industriali e dei processi alimentari e farmaceutici".

Ovviamente per l'applicazione di un sistema "AISAFETY" devono essere eseguite le opportune analisi, modifiche e integrazioni, soprattutto al sistema a regole dell'AI da customizzare secondo le specificità del sistema produttivo, dell'ambiente che lo ospita e delle attività da realizzare e monitorare.

Ad esempio, volendo applicare il sistema in un impianto di processo dove è presente un'attrezzatura a pressione per lo stoccaggio di gas tecnici, quali i serbatoi per il contenimento di azoto, ossigeno, idrogeno, propilene e metano, occorre andare a controllare i valori della pressione di esercizio che deve rimanere sempre entro i limiti della pressione massima ammissibile indicata dal fabbricante, la temperatura del fluido e quella ambientale, poiché variazioni termiche influenzano direttamente la pressione interna. Come pure occorre verificare il corretto funzionamento di valvole di sicurezza, dischi di rottura e manometri e la tenuta delle connessioni e cioè l'assenza di perdite su valvole, flange, raccordi e guarnizioni.

Si osserva che l'integrazione di cobot (robot collaborativi) e attrezzature a pressione avviene principalmente in impianti di processo caratterizzati da standard igienici elevati, manipolazione di sostanze pericolose o necessità di automazione flessibile in spazi ristretti.

Applicazioni in tal senso ci sono in impianti chimici e farmaceutici dove i cobot operano spesso in prossimità di reattori o autoclavi per gestire processi critici in sicurezza quali:

- il carico e lo scarico liofilizzatori dove i cobot vengono utilizzati per la manipolazione di flaconi e siringhe in ambienti sterili, riducendo il rischio di contaminazione umana;
- la gestione sostanze tossiche con i cobot che automatizzano il campionamento e il dosaggio di reagenti all'interno di isolatori o sistemi a barriera (RABS), dove la pressione interna è controllata per evitare fuoriuscite;
- le attività in laboratori di R&S nei quali i cobot sono utilizzati per lo screening di composti chimici e la preparazione di campioni per spettrometria, spesso interfacciandosi con piccoli recipienti a pressione.

Infine, occorre evidenziare che l'applicazione di un sistema del genere può essere realizzata su impianti già in uso configurandosi come sistemi di tipo "retrofit". Tale aspetto però, se da un lato costituisce un elemento di positività perché permette di ottenere quella che abbiamo definito la "sicurezza operazionale attiva smart" anche in sistemi di produzione non eccessivamente evoluti dal punto di vista tecnologico e con

un basso grado di autonomia, dall'altro pone criticità a livello normativo di certificazione sviscerate nel paragrafo successivo.
La parziale scalabilità del sistema prototipale realizzato, che in determinati contesti può richiedere un lavoro non semplice di analisi e successive implementazioni hardware e software, costituisce una prima criticità affinché sistemi del genere si possano diffondere nei settori produttivi caratterizzati da impianti di processo che vedono la presenza di attrezzature a pressione ed in quelle realtà produttive di piccole e medie dimensioni nelle quali gli investimenti nell'ottica dell'innovazione tecnologica sono di più difficile attuazione.
Altre considerazioni da fare sono collegate al fatto che sistemi innovativi di gestione della sicurezza attiva operazionale come quello descritto hanno la necessità di interfacciarsi direttamente con i comandi delle macchine presenti nell'impianto per poter far eseguire a quest'ultime le azioni richieste in risposta al verificarsi di una o più condizioni di pericolo. Ciò pone sostanzialmente due ulteriori condizioni di criticità esse stesse correlate tra loro.
La prima condizione è legata alla possibilità che l'implementazione di un sistema innovativo tipo AISAFETY possa essere realizzata su linee e impianti già messi in servizio che presentano una dichiarazione di attestazione di conformità ai pertinenti requisiti essenziali di sicurezza indicati dalle direttive di prodotto di riferimento (direttiva macchine e/o direttiva Ped) e dal Regolamento macchine (UE) 2023/1230, quest'ultimo troverà piena applicazione dal 20 gennaio 2027. Tale dichiarazione può riferirsi all'intero impianto, gruppo di macchine (unità della linea) o a gruppi parziali o a singole macchine appartenenti al sistema di produzione. La necessità di interfacciarsi con la logica di comando delle macchine o della intera linea pone perciò la criticità di una ricertificazione dell'impianto/gruppo di macchine (se queste costituiscono un insieme ai sensi della direttiva macchine) con l'emissione di una nuova dichiarazione di conformità. In pratica ciò significa realizzare un nuovo processo di immissione sul mercato e il soggetto che ha realizzato l'implementazione del sistema innovativo di sicurezza attivo (system integrator) si configura come il nuovo fabbricante. Questo aspetto non è però di facile gestione, poiché sistemi di monitoraggio e controllo che attivano sistemi di comando aventi funzioni di sicurezza per poter essere considerati validi, e magari sostituire i dispositivi di sicurezza oggi riconosciuti tali dal punto di vista tecnico e normativo, devono avere caratteristiche di elevata affidabilità e raggiungere quei livelli di performance level (PL) richiesti dalle norme tecniche di riferimento sulla sicurezza funzionale, quali, ad esempio, le parti 1 e 2 della EN ISO 13849. Allo stato attuale rimane però molto difficile definire i livelli di affidabilità e i corrispondenti livelli di performance level raggiunti con soluzioni che utilizzano la sensoristica e le tecnologie come quelle del sistema AISAFETY, non essendoci specifici riferimenti tecnici e non essendo noti studi e ricerche che descrivono le caratteristiche di tali sistemi in termini di affidabilità e PL.

4. Conclusioni e prospettive

Abbiamo osservato che l'integrazione di strumenti e tecnologie innovative quali: algoritmi di intelligenza artificiale, sensori wireless, dispositivi indossabili intelligenti, modelli digitali, sistemi di visione e di rilevamento, deve e può mirare a quella sicurezza operazionale realizzata direttamente dalle unità presenti in un impianto di processo, anche se rimane sempre necessaria la presenza di un operatore supervisore del sistema. L'implementazione di tali sistemi innovativi presenta le criticità riportate al paragrafo 3, criticità che limitano una diffusione a pieno titolo di tali sistemi. Inail a tal scopo ha attivato uno specifico obiettivo di ricerca scientifica nell'ambito del corrente piano triennale di attività 2025-2027 con l'intento proprio di investigare e risolvere le suddette criticità. In particolare, è stato previsto ed è in corso di attivazione mediante i bandi bric 2025, un ulteriore progetto di ricerca per analizzare nel dettaglio la componentistica hardware e software utilizzata nei sistemi di monitoraggio e controllo che attivano funzioni di comando di macchine e impianti, in modo da caratterizzarli dal punto di vista dei livelli di performance level (PL) raggiunti e individuare le possibilità d'intervento per migliorare, se necessario, tali PL.

La definizione dei livelli di sicurezza funzionale e dei possibili interventi migliorativi permetterà una più facile applicazione dei suddetti sistemi nei diversi contesti produttivi industriali e consentirà al fabbricante e al "system integrator" di individuare le misure necessarie a renderli conformi alle disposizioni legislative e normative. Tra gli obiettivi anche l'individuazione di quelle casistiche che possono prevedere la necessità di una ricertificazione. Infine, una potenziale ricaduta potrebbe essere quella di realizzare una proposta di elaborazione di uno standard o di un documento tecnico di riferimento per i sistemi oggetto di studio.

Bibliografia e sitografia

[1] Motroni, A.; Rosati, F.; Nepa, P.; Buffi, A.; Pirozzi, M.; Di Donato, L.; Tomassini, L.; Ferraro, A. "An RFID-based Ranging System for Worker Safety in Agricultural Working Areas," Atti della 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), 2021, pp. 1-6.

[2] F. Di Paco et al., "AI-Driven Safety Systems: Reducing Risk in Complex Workplaces and High-Stakes Task," 35th European Safety and Reliability Conference (ESREL2025) and the 33rd Society for Risk Analysis Europe Conference (SRA-E 2025) 15 – 19 June 2025, Stavanger, Norway.

[3] Pirozzi M., Di Donato L., Tomassini L., Ferraro A., "Possible innovative technical measures for risk prevention during the use of mobile machines with remote guide/control'', "Procedia Manufacturing", 2020, Volume 42, Pagine 457-461, IF 1,9. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.049.

[4] Segor, F., Kollmann, M. (2011). "Towards autonomous micro uav swarms". Journal of intelligent & robotic systems, 61(1-4), pp. 339-353.

[5] Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H.-A. "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems". Manuf. Lett. 2015, 3, 18-23.

[6] ISO 18435-3:2015, Industrial automation systems and integration - Diagnostics, capability assessment and maintenance applications integration - Applications integration description method.
[7] EN ISO 13849-1: 2023 Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza - Parte 1: Principi generali per la progettazione.
[8] EN ISO 13849-2: 2012 Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza - Parte 2: Validazione.

Inail - Direzione centrale pianificazione e comunicazione
piazzale Giulio Pastore, 6 - 00144 Roma
dcpianificazione-comunicazione@inail.it
www.inail.it

ISBN 978-88-7484-994-9