

**INAIL**

Quaderni di ricerca

Tecnologie innovative  
per la valutazione e la gestione  
del rischio NaTech da sisma  
per gli stabilimenti con Pericolo  
di Incidente Rilevante

Alessio Bonelli, Gianluca Quinci, Fabrizio Paolacci,  
Alessandra Marino, Mariano Ciucci

**27**

febbraio 2026



**INAIL**  
Quaderni di ricerca

**Tecnologie innovative  
per la valutazione e la gestione  
del rischio NaTech da sisma  
per gli stabilimenti con Pericolo  
di Incidente Rilevante**

Alessio Bonelli, Gianluca Quinci, Fabrizio Paolacci,  
Alessandra Marino, Mariano Ciucci

I *Quaderni di ricerca* dell'Inail sono lo strumento a disposizione dei ricercatori e dei ruoli professionali dell'Istituto per rendere pubblici i risultati più rilevanti delle loro attività; accolgono anche contributi di ricercatori esterni, che partecipano ai progetti dell'Inail.

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nei *Quaderni*, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

I *Quaderni* sono disponibili online all'indirizzo [www.inail.it](http://www.inail.it).

Comitato di redazione: Fabrizio D'Ascenzo, Maria Paola Bogliolo, Benedetta Persechino, Patrizio Rossi

Segreteria di redazione: Cristina Francesca Giombini

Inail - Piazzale Giulio Pastore, 6 | 00144 Roma

ISBN 978-88-7484-984-0

Stampato presso la Tipografia Inail - Milano, febbraio 2026

# Tecnologie innovative per la valutazione e la gestione del rischio NaTech da sisma per gli stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante

Alessio Bonelli, Gianluca Quinci, Fabrizio Paolacci,  
Alessandra Marino, Mariano Ciucci

**Sommario** - Il presente lavoro è frutto dalla collaborazione tra INAIL e l'Università degli studi Roma Tre e affronta il tema del rischio NaTech da sisma negli stabilimenti industriali soggetti al Decreto Legislativo 105/2015 (recepimento in Italia della Direttiva Seveso III), con particolare riferimento agli impianti che gestiscono sostanze pericolose nei propri processi. In Italia, così come numerose altre aree in giro per il mondo, la presenza diffusa di zone soggette ad elevata pericolosità sismica rende indispensabile integrare il rischio sismico nella valutazione della sicurezza industriale, tenendo conto delle possibili conseguenze sull'ambiente, sulla popolazione e sui lavoratori.

Il documento esamina in primo luogo il quadro normativo vigente e le responsabilità del gestore nella prevenzione e gestione degli incidenti rilevanti, sottolineando la necessità di includere esplicitamente gli scenari NaTech all'interno del Sistema di Gestione della Sicurezza, nei Piani di Emergenza Interno ed Esterno e nel Rapporto di Sicurezza. A tale scopo viene proposta una metodologia operativa che consente di individuare le apparecchiature più vulnerabili al sisma e di stimare le potenziali conseguenze di un danneggiamento, ponendo particolare attenzione al rischio di perdite di contenimento di sostanze pericolose, principale precursore di effetti domino e di possibili catene incidentali. Risultano quindi essenziali strumenti di screening in grado di definire priorità di intervento e di identificare tempestivamente le situazioni in cui il rilascio delle stesse sostanze pericolose può risultare più probabile o più dannoso. Il lavoro approfondisce inoltre l'importanza delle misure di mitigazione e delle tecnologie innovative a supporto della sicurezza, tra le quali si distinguono i sistemi SMART e l'impiego di UAS per il monitoraggio in tempo reale delle condizioni degli impianti e per l'attivazione automatica dei sistemi di protezione e di allarme.

Nel complesso, il documento propone una visione completa del rischio NaTech da sisma, individuando strumenti e strategie utili ad incrementare la resilienza degli impianti industriali e quindi a garantire una maggiore tutela del territorio, della popolazione circostante e dei lavoratori.

*Parole chiave: Seveso III; Natech; Sisma; Pericolo; Mitigazione.*

- a. UNI 11808-3:2025 - Attrezzature provvisoriale - Reti di sicurezza - Parte 3: Reti contro la caduta di piccoli oggetti - Requisiti di sicurezza, metodi di prova e condizioni di utilizzo.

---

Gli autori sono: per Inail, Alessio Bonelli, Alessandra Marino e Mariano Ciucci del Dipartimento per le Innovazioni Tecnologiche e la Sicurezza degli Impianti, via del Torraccio di Torrenova 7, Roma 00133, Italia. Alessio Bonelli, Gianluca Quinci e Fabrizio Paolacci per Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica e Tecnologie Aeronautiche, Università degli Studi Roma Tre, Via Vito Volterra 62, 00146, Roma, Italia.



## Indice degli argomenti

Introduzione	7
1. Inquadramento tecnico normativo	8
1.1 Codici Nazionali	9
1.2 Codici internazionali	9
2. Analisi e valutazione del pericolo da sisma	10
2.1 Definizione dell'azione sismica	11
2.2 Valutazione della pericolosità sismica di sito	12
2.2.1 PSHA: Analisi probabilistica della domanda sismica	12
2.2.2 Disaggregazione: magnitudo e distanza epicentrale	15
2.2.3 Selezione degli accelerogrammi	16
2.2.4 Analisi della risposta sismica locale	17
3. Valutazione della sicurezza sismica per stabilimenti esistenti	19
3.1 Verifiche in ottemperanza al metodo semi-probabilistico degli stati limite	20
4. Valutazione dell'esposizione al pericolo da sisma	22
4.1 Computo dell'indice di esposizione	22
5. Valutazione della vulnerabilità sismica	23
5.1 Analisi preliminare del rischio Natech da Sisma	24
5.2 Comportamento sismico e modellazione delle apparecchiature principali	25
5.2.1 Apparecchiature snelle	26
5.2.1.1 Colonne di reazione/separazione	26
5.2.1.2 Serbatoi ad asse orizzontale	28
5.2.2 Apparecchiature tozze	30
5.2.3 Apparecchiature sostenute da colonne	33
5.2.4 Piperack e tubazioni	35
5.3 Valutazione delle curve di fragilità delle apparecchiature critiche	37
5.3.1 Approccio metodologico all'analisi di fragilità	37
5.3.1.1 Applicazione al caso dei serbatoi	38
6. Nuove tecnologie per la protezione degli impianti PIR in zona sismica	40
6.1 Sensori per la misura delle deformazioni	40
6.2 Sensori per la misura delle accelerazioni	41
6.3 Sensori per la misura della temperatura	42
6.4 Sensori per il rilevamento di rilascio di sostanze	42
6.5 Dispositivi UAS per la gestione delle emergenze	43
6.6 Analisi di applicabilità	44
7. Analisi quantitativa del rischio negli stabilimenti in presenza di sisma	47
7.1 Stato dell'arte	49
7.1.1 Individuazione delle apparecchiature critiche	49
7.1.2 Calcolo della vulnerabilità sismica delle apparecchiature	52
7.1.3 Determinazione della curva di pericolosità sismica del sito	52

7.1.4	Calcolo della frequenza annua di superamento	52
7.1.5	L'Albero dei Guasti e l'Albero delle conseguenze	55
7.2	Effetto domino	58
7.3	Individuazione delle condizioni che richiedono di sensori SMART	58
8	Gestione dell'emergenza in caso di evento sismico	59
8.1	Attività per la gestione dell'emergenza sismica	60
	Conclusioni	62
	Riferimenti bibliografici	63
	Legislazione e normative	69
	i Quaderni di Ricerca	71

## Introduzione

Il Decreto Legislativo 105 del 2015 (recepimento italiano della direttiva Seveso III) ha come principale obiettivo l’emanazione di tutte quelle disposizioni volte a prevenire il verificarsi di incidenti rilevanti connessi alla presenza di sostanze pericolose negli stabilimenti industriali, e a limitarne le conseguenze sulla salute umana e sull’ambiente. Lo stesso decreto impone, a tutti gli stabilimenti che rientrano nel suo campo di applicazione, la predisposizione di un Rapporto di Sicurezza, ovvero un documento che descrive nel dettaglio le misure di prevenzione e protezione da adottare sia per evitare eventi incidentali, sia per mitigarne gli effetti qualora si verificano.

In questo contesto, assume un ruolo di primaria importanza l’analisi dei pericoli e la valutazione dei rischi incidentali, che devono includere non solo le cause di origine tecnologica, ma anche quelle naturali. Infatti, l’interazione tra eventi naturali estremi e componenti industriali può dar luogo a catastrofi, note in letteratura come “eventi NaTech”; l’acronimo “NaTech” deriva dall’espressione inglese “Natural Hazards Triggering Technological Disasters” e identifica proprio quegli incidenti, quali incendi, esplosioni o rilasci di sostanze tossiche, che vengono innescati da eventi calamitosi di origine naturale, come terremoti, alluvioni, tempeste o frane. A tal proposito numerosi studi e banche dati internazionali (tra cui eMARS, ARIA, MHIDAS, e-NATECH, NRC, ZEMA, EPA ed EM-DAT) evidenziano come le conseguenze di tali eventi possano risultare particolarmente gravi e impattanti sia per gli stabilimenti industriali che per i territori circostanti. Recenti analisi (Figura 1) hanno messo in luce una crescente incidenza dei disastri naturali tra gli incidenti tecnologici registrati dal 1948 a oggi. Con riferimento a ciò, è emblematico, ad esempio, il picco che si manifesta nel 2011, in concomitanza con il devastante terremoto di Tohoku in Giappone.

Ponendo l’attenzione in Figura 2, è possibile osservare come nella distribuzione dei diversi fenomeni naturali, i terremoti rappresentano solo 6% del totale, contrariamente, ad esempio, alle alluvioni, che costituiscono invece oltre il 40%. Tuttavia, nonostante la bassa frequenza, gli eventi sismici sono spesso responsabili delle conseguenze più gravi, sia in termini di danni strutturali che di impatto ambientale e sulla salute umana.

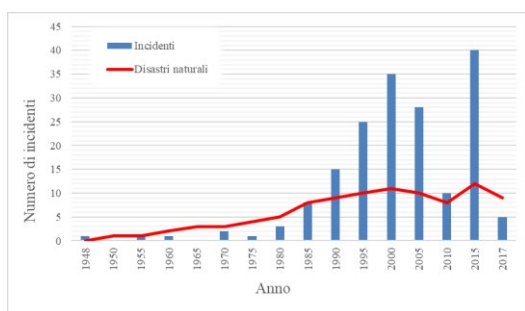


Figura 1 - Confronto storico tra il numero di incidenti tecnologici e quelli di matrice naturale [MRS MC-019]

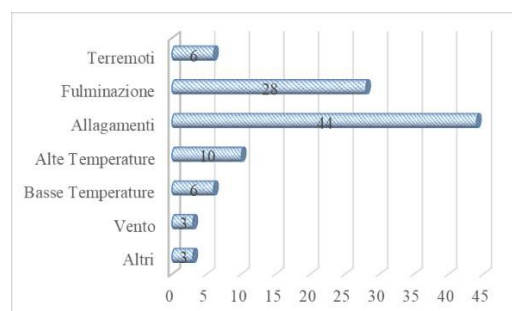


Figura 2 - Confronto storico tra il numero di incidenti tecnologici e quelli di matrice naturale [MRS MC-019]

Alla luce di queste evidenze, sia la comunità scientifica sia le autorità competenti hanno riconosciuto la necessità di approfondire l’interazione tra i fenomeni naturali e gli stabilimenti industriali, in particolare, di quelli potenzialmente in grado di innescare eventi NaTech, al fine di migliorare la gestione dell’emergenza in situazioni di crisi.

Come accennato, il rischio sismico rappresenta sicuramente una delle minacce più concrete, in particolare può essere definito come la misura dell'entità del danno che un evento tellurico può provocare su persone, ambiente e beni materiali, in un determinato luogo e intervallo temporale. Volendone associare una connotazione analitica, può essere definito come combinazione di tre fattori quali: pericolosità (la probabilità che si verifichi un sisma di una certa intensità in un dato periodo e luogo), vulnerabilità (la probabilità che, a seguito di un sisma, si producano danni di una certa entità sugli elementi esposti), esposizione (la misura delle conseguenze sociali ed economiche correlate ai danni, in funzione della presenza di persone, infrastrutture e beni).

Pertanto, nella valutazione del rischio NaTech da sisma e nell'individuazione delle sequenze incidentali che possono portare a un incidente rilevante, è indispensabile considerare in modo accurato gli effetti delle azioni sismiche sia sugli aspetti strutturali (stabilità delle opere), che su quelli non strutturali, come il possibile malfunzionamento dei dispositivi di sicurezza o delle componenti critiche, il contenimento delle sostanze pericolose... Entrambe le tipologie di effetti possono contribuire a innescare catene di eventi pericolosi, rendendo necessario lo sviluppo di adeguate misure di gestione dell'emergenza e di strategie di prevenzione integrate.

I principali passaggi logici e metodologici che permettono di condurre una valutazione completa del pericolo legato agli eventi NaTech di origine sismica saranno approfonditi nei capitoli successivi seguendo lo schema generale di analisi e gestione del rischio di seguito definito:

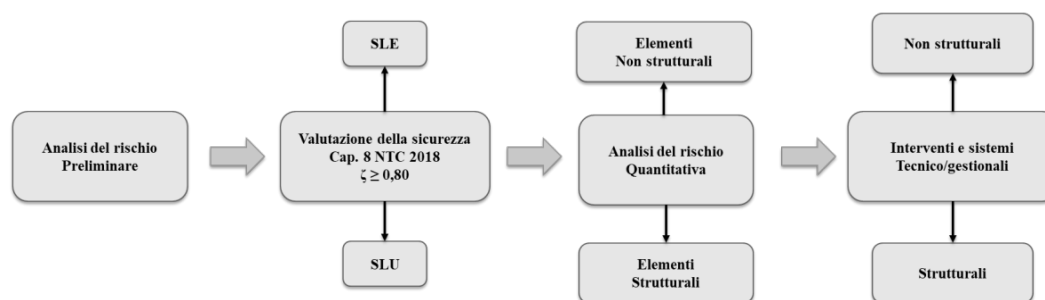


Figura 3 - Processo di analisi del rischio sismico

## 1. Inquadramento tecnico normativo

La gestione del pericolo di incidente rilevante di matrice sismica richiede un quadro di consultazione tecnico-normativa solida e coerente, capace di integrare le disposizioni in materia di sicurezza industriale con quelle relative alla progettazione strutturale.

Come anticipato, uno dei riferimenti principali in materia è costituito dal Decreto Legislativo 105/2015, che recepisce la Direttiva europea “Seveso III” e disciplina le misure di prevenzione e mitigazione degli effetti degli incidenti rilevanti. Tuttavia, trattandosi di una normativa di sicurezza industriale, non fornisce indicazioni dettagliate circa la valutazione delle azioni sismiche sugli impianti e sulle apparecchiature, demandando tale aspetto alle norme tecniche per le costruzioni (“NTC 2018”) e ai relativi codici ed Eurocodici strutturali. Ciò che emerge è quindi la necessità di far riferimento ad un contesto interdisciplinare, unendo sinergicamente quanto prescritto nei documenti di sicurezza industriale, con le norme tecniche di progettazione strutturale, e le linee

guida specifiche elaborate da enti nazionali e internazionali. Tale articolazione, seppur complessa, consente un approccio integrato alla valutazione del rischio, che comprende sia gli aspetti di resistenza e stabilità strutturale, sia quelli legati alla funzionalità e sicurezza impiantistica. Nei paragrafi che seguono si riporta una rassegna delle principali fonti normative, articolata per livello di applicazione (nazionale e internazionale), evidenziandone i contenuti più rilevanti ai fini della prevenzione e mitigazione degli incidenti NaTech.

## 1.1 Codici Nazionali

In ambito nazionale, il principale riferimento normativo che regola gli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante è il Decreto Legislativo n.105 del 26 giugno 2015, che recepisce la Direttiva Seveso III e definisce gli obblighi per i gestori degli stabilimenti che detengono sostanze pericolose. Il decreto impone la redazione del Rapporto di Sicurezza, documento nel quale devono essere considerate anche le cause di incidente di origine naturale, come quelle sismiche, in un'ottica di prevenzione integrata. Sul piano della sicurezza strutturale, le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 e la relativa Circolare applicativa del 2019 rappresentano il riferimento di base per la progettazione e la verifica degli elementi strutturali soggetti ad azione sismica, sebbene non sia contemplato alcun aspetto che regoli le caratteristiche strutturali delle apparecchiature presenti in un impianto di processo (il Capitolo 12 consente l'utilizzo di documenti e codici tecnici complementari, anche di origine internazionale, purché garantiscano livelli di sicurezza equivalenti o superiori).

Un ruolo significativo è svolto anche dal D.M. 9 maggio 2001, che stabilisce i requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione territoriale per le aree interessate da stabilimenti soggetti a pericolo di incidente rilevante (PIR), integrando la disciplina urbanistica con quella della sicurezza industriale. Infine, il CNR-DT 214/2018 fornisce le istruzioni per la valutazione della robustezza strutturale, introducendo criteri utili per la prevenzione del collasso progressivo e per la verifica della capacità in condizioni eccezionali, tra cui in presenza di azione sismica. Questi documenti, considerati nel loro insieme, costituiscono la base del quadro normativo nazionale per l'analisi e la mitigazione del rischio NaTech in ambito sismico.

## 1.2 Codici internazionali

A livello europeo, il quadro normativo di riferimento per la progettazione e la verifica strutturale è costituito dagli Eurocodici, una serie di norme armonizzate che definiscono i principi generali e i criteri di sicurezza per le costruzioni soggette a diverse tipologie di azioni. In particolare, l'Eurocodice 0 ("EN 1990") stabilisce i criteri generali di progettazione strutturale e le basi per la verifica della sicurezza e della funzionalità delle opere, mentre è invece l'Eurocodice 8 ("EN 1998") che tratta in modo specifico la progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Per quanto riguarda le infrastrutture industriali e gli impianti soggetti a pericolo di incidente rilevante, assumono particolare rilevanza le parti 4 e 6 dello stesso, rispettivamente dedicate alla progettazione sismica di serbatoi, silos e tubazioni ("EN 1998-4") e di torri, pali e camini ("EN 1998-6"). Tali norme forniscono i criteri per la valutazione della risposta dinamica delle apparecchiature contenenti fluidi e delle strutture a comportamento flessionale o a sbalzo, risultando quindi particolarmente applicabili agli stabilimenti che trattano sostanze pericolose.

Completano il quadro di riferimento tecnico: la UNI EN 14015 per i serbatoi costruiti in opera, la EN 13445 per i recipienti a pressione, la EN 13121 per i contenitori in materiale composito e la EN 13480 per le tubazioni metalliche industriali. In ultimo, la specifica tecnica UNI/TS 11816-1:2021 fornisce le linee guida proprio per la gestione del rischio NaTech negli stabilimenti soggetti al d.lgs.105/2015, con un focus dedicato al rischio sismico. Tale documento rappresenta un importante collegamento tra il contesto industriale e quello strutturale, promuovendo un approccio integrato alla valutazione e mitigazione del rischio.

Spostando il focus in ambito extraeuropeo, numerosi organismi tecnici e associazioni di settore hanno sviluppato standard e linee guida specificamente dedicati alla progettazione e alla verifica delle apparecchiature industriali soggette ad azioni sismiche, con particolare riferimento ai serbatoi, ai recipienti in pressione e alle tubazioni.

Tra i riferimenti più diffusi a livello mondiale figura la norma API 650, emanata dall' "American Petroleum Institute", che definisce i criteri per la progettazione sismica dei serbatoi cilindrici in acciaio destinati allo stoccaggio di prodotti petroliferi e liquidi industriali. Tale documento è spesso affiancato dall' API 620 per i serbatoi a bassa pressione e dall' API 653 per le ispezioni e la manutenzione in esercizio. A complemento, la norma AWWA D100-05, sviluppata dall' "American Water Works Association", fornisce analoghe indicazioni per i serbatoi di stoccaggio dell'acqua, con particolare attenzione agli effetti idrodinamici e agli spostamenti differenziali del fondo.

Nel contesto asiatico e oceanico, si segnalano le NZSEE Guidelines, elaborate dalla "New Zealand Society for Earthquake Engineering", e le IITK-GSDMA Guidelines, promosse dall' "Indian Institute of Technology Kanpur", che rappresentano due esempi di approcci moderni e coerenti con la filosofia prestazionale della progettazione sismica.

Le norme ASME - "Boiler and Pressure Vessel Code", e ASME B31.3 - "Process Piping Code", costituiscono i principali riferimenti adottati a livello internazionale per la progettazione, costruzione e verifica di apparecchiature a pressione e sistemi di tubazione in ambito industriale. Questi documenti, pur non essendo nati con specifico intento antisismico, includono criteri strutturali e requisiti di sicurezza che possono essere integrati efficacemente con le prescrizioni sismiche degli Eurocodici o delle normative locali.

## 2 Analisi e valutazione del pericolo da sisma

La valutazione della pericolosità sismica e la conseguente definizione dell'azione sismica di progetto costituiscono un passaggio essenziale per la sicurezza strutturale e funzionale degli stabilimenti industriali, in particolare di quelli che, per la natura dei processi svolti o dei materiali trattati, possono essere classificati come PIR - "Pericolo di Incidente Rilevante". In tali contesti, l'evento sismico rappresenta un potenziale fattore scatenante di scenari incidentali complessi, per cui la caratterizzazione della domanda sismica deve basarsi su criteri di rigore metodologico e di coerenza con il quadro normativo vigente.

Il seguente capitolo analizza il processo di definizione dell'azione sismica ai sensi delle NTC 2018 e delle relative disposizioni applicative, con riferimento agli strumenti di valutazione della pericolosità, alla definizione dei parametri di progetto e alla considerazione degli effetti di sito. L'obiettivo è quello di inquadrare in modo sistematico l'approccio alla determinazione della sollecitazione sismica da adottare per le opere e le unità di processo, garantendo un livello di affidabilità coerente con la classe d'uso ("C<sub>u</sub>") e con l'importanza strategica delle installazioni industriali.

## 2.1 Definizione dell'azione sismica

Ai fini della determinazione dell'azione sismica di progetto, si fa riferimento alla metodologia indicata dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, la quale si basa sulla stima della pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale definita dalle Ordinanze del Presidente del Consiglio dei Ministri "OPCM n. 3274/2003" e "OPCM n. 3519/2006", e dai successivi aggiornamenti. Tali disposizioni costituiscono il quadro normativo di riferimento per la caratterizzazione dell'azione sismica nelle analisi strutturali e per la definizione dei relativi parametri di progetto.

Nel caso specifico delle apparecchiature di processo, si assume una vita nominale (" $V_N$ ") non inferiore a 50 anni. Questa scelta deriva dal fatto che gli asset presenti in uno stabilimento sono soggetti a regolare manutenzione (in virtù del ruolo strategico che ricoprono all'interno del ciclo produttivo), consentendo di contrastare i fenomeni di usura e obsolescenza e garantire il mantenimento dei livelli di sicurezza strutturale e funzionale nel tempo.

Le attività in cui sussiste il "Pericolo di Incidente Rilevante" rientrano, ai sensi del §2.4.2 delle NTC 2018, nella classe d'uso IV, in quanto assimilabili a industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente e per la salute umana. Tale attribuzione è confermata anche dalla Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che specifica quanto segue:

"Per strutture il cui collasso può dar luogo ad incidente rilevante si adotteranno i seguenti valori di coefficienti d'uso:

- " $C_U > 2$ " per attività con pericolo di incidente rilevante, per le quali risultano essere presenti scenari incidentali con impatto all'esterno dell'attività stessa.
- Eventuali classi d'uso differenti dalla IV possono essere considerate solo per quelle strutture o parti di impianto che: non concorrano in alcun modo all'innescio, allo sviluppo o alla mancata mitigazione di un incidente e non siano soggette agli effetti diretti o indiretti di uno scenario incidentale primario, sia esso indotto o meno da evento sismico."

La classe d'uso e la vita nominale dell'opera concorrono alla definizione della vita di riferimento " $V_R$ ", parametro fondamentale per la determinazione del periodo di ritorno " $T_R$ " dell'azione sismica e, conseguentemente, per la scelta dello stato limite da verificare. Il legame tra questi parametri è espresso dall'equazione 3.2.0 delle NTC 2018, come di seguito mostrato:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \tag{1}$$

La probabilità di superamento " $P_{VR}$ " è definita in funzione dello stato limite considerato, come riportato dalla tabella 3.2.I delle NTC 2018, proposta in Figura 4:

Tab. 3.2.I – Probabilità di superamento  $P_{VR}$  in funzione dello stato limite considerato

Stati Limite	$P_{VR}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Figura 4 - Correlazione tra probabilità di superamento e stati limite

Tali parametri costituiscono la base per la successiva valutazione della pericolosità sismica di sito, dalla quale deriva la definizione dell'azione sismica da applicare alle strutture e alle apparecchiature presenti nello stabilimento.

## 2.2 Valutazione della pericolosità sismica di sito

Tale sezione ha il compito proprio di ripercorrere, per sommi capi, tutte le varie operazioni da intraprendere al fine di definire la domanda sismica. A tal proposito, la Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019, al §C.3.2.3.1, prescrive che vengano considerati i seguenti passaggi finalizzati alla determinazione degli scenari sismici di riferimento (espressi in termini di spettri di risposta elastici per analisi lineari, oppure di segnali accelerometrici time-history per analisi non lineari), associati ai diversi stati limite e ai corrispondenti periodi di ritorno dell'azione sismica.

### 2.2.1 PSHA: Analisi probabilistica della domanda sismica

Il primo step è lo studio della sismicità locale, con lo scopo di individuare le zone sismogenetiche (Figura 5) che contribuiscono maggiormente all'attività sismica del sito. A partire da queste si passa al reperimento dei dati storici relativi all'attività tellurica dell'area (consultando ad esempio il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani - "CPTI"), utilizzati, a loro volta, per definire la frequenza sismica dell'area di interesse mediante l'applicazione della legge di Gutenberg-Richter ("GR"):

$$\log_{10} N(M \geq m) = a - bm \quad (2)$$

Dove "N" indica il numero di terremoti annuali di magnitudo "M", mentre i parametri "a" e "b" sono associati rispettivamente a:

- Rapporto tra il numero di terremoti di piccola e grande entità nella zona;
- Livello di sismicità dell'area.

Questa stessa formulazione prevede che il numero totale di terremoti in un anno "N", con magnitudo "M"  $\geq 0$ , sia pari a:

$$N(M \geq 0) = 10 \cdot a \quad (3)$$

Quest'ultimo viene definito "tasso di attività".

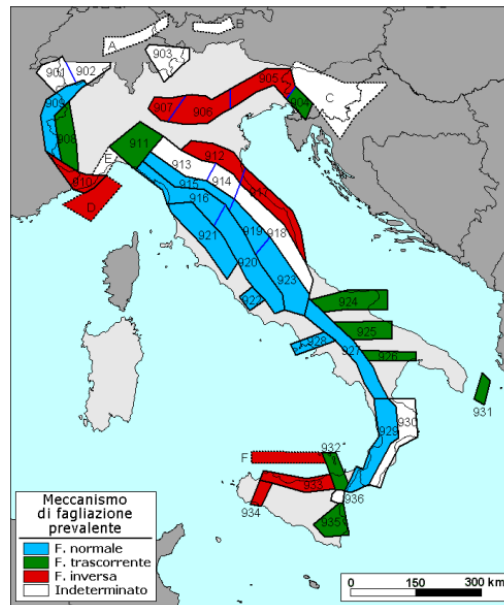


Figura 5 - Correlazione tra la suddivisione nazionale in zone sismogenetiche e i meccanismi di faglia associati a ciascuna unità

Determinata la frequenza annua dei terremoti per classe di magnitudo (e derivata anche la densità di probabilità della stessa magnitudo, “ $f_M(M)$ ”), si procede alla stima della misura di intensità sismica (“Intensity Measure” - “IM”) del sito mediante le relazioni di attenuazione.

Queste, nel corso degli anni, hanno subito numerose declinazioni in virtù dell’utilizzo di parametri calibrati empiricamente: l’utilizzo di questi ultimi è legato alla necessità di tradurre in forma analitica il comportamento reale del moto sismico rilevato mediante registrazioni strumentali. Il concetto generale di relazione di attenuazione (“Ground Motion Prediction Equation” - GMPE) rappresenta un punto di incontro proprio tra magnitudo, distanza e intensità sismica e fornisce la probabilità che un terremoto di magnitudo “M”, a distanza “R,” produca una certa misura di intensità sismica (“IM”) al sito:

$$\ln(IM) = c_1 + c_2 M + c_3 (R + c_4) + \sigma \varepsilon \tag{4}$$

I coefficienti “ $c_1$ ”, “ $c_2$ ”, “ $c_3$ ”, “ $c_4$ ” sono i parametri empirici ricavati tramite regressione statistica su migliaia di registrazioni reali di terremoti. Essi rappresentano l’influenza che ciascun fattore (magnitudo, distanza, tipo di suolo, meccanismo di faglia, ecc.) esercita sull’ampiezza del moto sismico. Mentre “ $\sigma$ ” ed “ $\varepsilon$ ” definiscono la deviazione standard e la variabilità aleatoria del moto. Così facendo è possibile far riferimento ad una distribuzione di probabilità lognormale (delle intensità ottenute), per poi definire la frequenza annua di occorrenza dell’intensità e completare l’analisi probabilistica della domanda sismica (“Probabilistic Seismic Hazard Analysis” - “PSHA”) mediante la costruzione della curva di pericolosità sismica:

$$P(IM > x | M, R) = 1 - \Phi \left( \frac{\ln(x) - \mu(M, R)}{\sigma} \right) \tag{5}$$

La relazione (5) non è altro che la distribuzione di probabilità cumulata (“Cumulative Distribution

Function” - “CDF”) dei valori di intensità sismica “x” (che può essere espressa equivalentemente come “1-F<sub>IM</sub>(x | M,R)”). In particolare, mentre quest’ultima fornisce una singola probabilità per “M” e “R” fissi, la “PSHA” estende questa stessa probabilità a tutti i valori di “M” e “R”, e quindi a tutti gli eventi. In questo modo si ha la costruzione della curva di pericolosità sismica (Figura 6), quindi un riscontro visivo della relazione tra valore di intensità sismica e la frequenza annua di superamento della stessa, “λ(IM>x)”:

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{N_s} \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} v_i f_{M,i}(M) f_{R,i}(R) [1 - F_{IM}(x | M, R)] dR dM \tag{6}$$

Un aspetto cruciale consiste nel chiarire che l’intensità sismica (“IM”) può essere espressa da sotto forma di molteplici categorie di grandezze sismiche, fra cui: l’accelerazione di picco al suolo - “PGA”, l’accelerazione spettrale - “Sa(T)”, la media geometrica delle accelerazioni spettrali - “SaAV” ... Allo stesso tempo sono numerosi i riferimenti in letteratura che ne descrivono le caratteristiche ed eventuali preferenze di adozione [PP-016].

Tornando alla (6), la magnitudo viene declinata dalla legge di Gutenberg Richter sotto forma di “f<sub>M</sub>(M)”, mentre la distanza (“f<sub>R</sub>(R)”) è associata alla distribuzione dei possibili epicentri, sulla base della geometria delle sorgenti sismogenetiche e la posizione del sito. Per quanto riguarda il parametro “v<sub>i</sub>”, questo indica tasso medio annuo di eventi con magnitudo superiore a “M<sub>min</sub>”, quindi il rapporto tra quanto ottenuto in output da GR ed il periodo di ritorno dell’azione sismica.

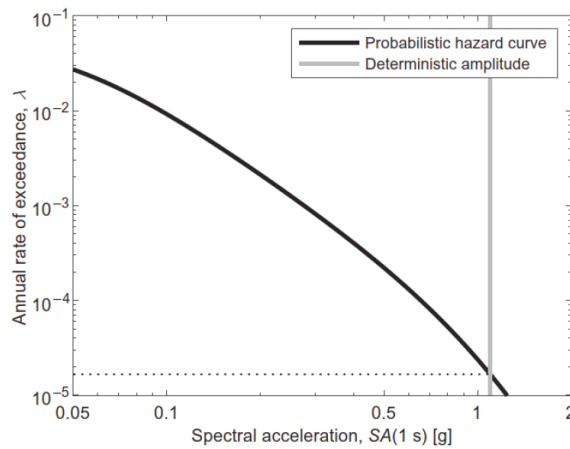


Figura 6 - Esempio di curva di pericolosità [BRAP-015]

(la “deterministic amplitude” - Figura 6 - rappresenta il valore di accelerazione spettrale associata al terremoto peggiore ragionevolmente possibile).

La linearizzazione della stessa curva ((7), Figura 7), per mezzo dell’applicazione della scala bilogaritmica, consente di risolvere l’integrale del rischio in forma chiusa (§7.2.4).

$$\lambda(PGA)=k_0 \text{ PGA}^{-k} \tag{7}$$

“k<sub>0</sub>” e “k” sono i parametri della retta nel piano bilogaritmico e rappresentano rispettivamente il coefficiente di scala (o intercetta log-log) e la pendenza locale.

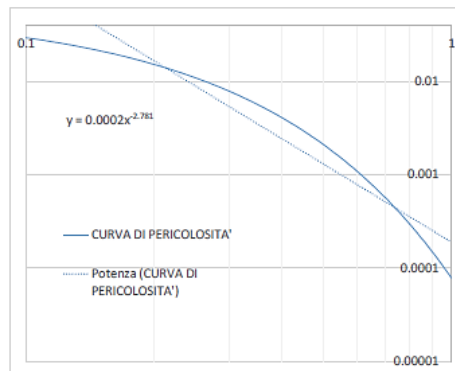


Figura 7 - Esempio di linearizzazione della curva di Hazard

L'intero processo della PSHA viene descritto in modo estremamente dettagliato da [BRAP-015].

### 2.2.2 Disaggregazione: magnitudo e distanza epicentrale

Nota la curva di pericolosità sismica, è nota la frequenza annua dell'intensità sismica (6). Restano tuttavia ignoti i valori di magnitudo e di distanza sorgente-sito che contribuiscono maggiormente a questa stessa intensità. È in tale contesto che entra in gioco la disaggregazione, il cui obiettivo è quello di fornire le caratteristiche del cosiddetto “terremoto di scenario” in termini proprio di “M” e di “R”. Operativamente, la disaggregazione, prevede che vengano normalizzati i contributi parziali della curva di pericolosità per una stessa frequenza annua di superamento (quella per cui si vogliono individuare le caratteristiche del terremoto di scenario):

$$P(M, R | IM > x) = \frac{\nu_i f_{M,i}(M) f_{R,i}(R) [1 - F_{IM}(x | M, R)] dR dM}{\lambda(IM > x)} \quad (8)$$

Si tratta quindi della probabilità condizionata che un certo livello di scuotimento “IM > x” sia correlato a un terremoto con magnitudo “M” e distanza “R”. Sviluppando quanto descritto per un certo range di valori di interesse, si ottiene una mappa bidimensionale, come quella suggerita in Figura 8, in cui è possibile osservare che valori tendenti al rosso sono correlati a probabilità maggiori di ottenere la coppia “M-R” che contribuisce allo stesso terremoto di scenario.

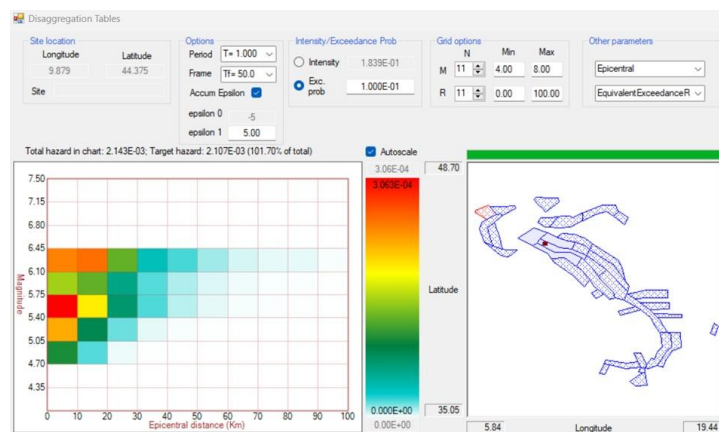


Figura 8 - Esempio di disaggregazione

### 2.2.3 Selezione degli accelerogrammi

A questo punto non resta che passare alla scelta delle registrazioni accelerometriche più rappresentative circa le condizioni dello scenario sismico che influenza il sito di riferimento, avendo accortezza che vengano rispettate le seguenti caratteristiche:

- magnitudo compresa entro  $\pm 0,3-0,5$  unità rispetto al valore di magnitudo rappresentativa (“ $M_{rep}$ ”);
- distanza entro  $\pm 20-30\%$  rispetto al valore di distanza rappresentativa (“ $D_{rep}$ ”);
- meccanismo focale e condizioni di sito comparabili, ove disponibili.

Gli accelerogrammi così individuati sono quindi scalati in ampiezza per garantire la compatibilità spettrale con l’azione sismica di progetto. In particolare, lo spettro medio dei segnali selezionati non deve discostarsi dallo spettro elastico di riferimento più del 10% per difetto e del 30% per eccesso.

Lo stesso spettro può essere costruito a valle della “PSHA”: per ciascun “IM”, viene derivato il valore di periodo spettrale come valore reciproco di “ $\lambda$ ”.

Le “NTC 2018” impongono l’utilizzo di almeno 3 o 7 accelerogrammi naturali, rispettivamente se si vuole determinare la risposta come il massimo o la media delle risposte massime ottenute (Figura 9). È inoltre ammesso l’uso di accelerogrammi artificiali o sintetici, sebbene quest’ultima casistica venga generalmente sconsigliata (il loro contenuto in frequenza tende a risultare più severo e meno rappresentativo rispetto ai segnali naturali).

Le principali banche dati di riferimento per la selezione dei segnali sono:

- ITACA - Italian ACcelerometric Archive, per eventi registrati sul territorio nazionale;
- PEER NGA - Pacific Earthquake Engineering Research Center, per eventi internazionali di magnitudo e distanza comparabili;
- ESM - European Strong Motion.

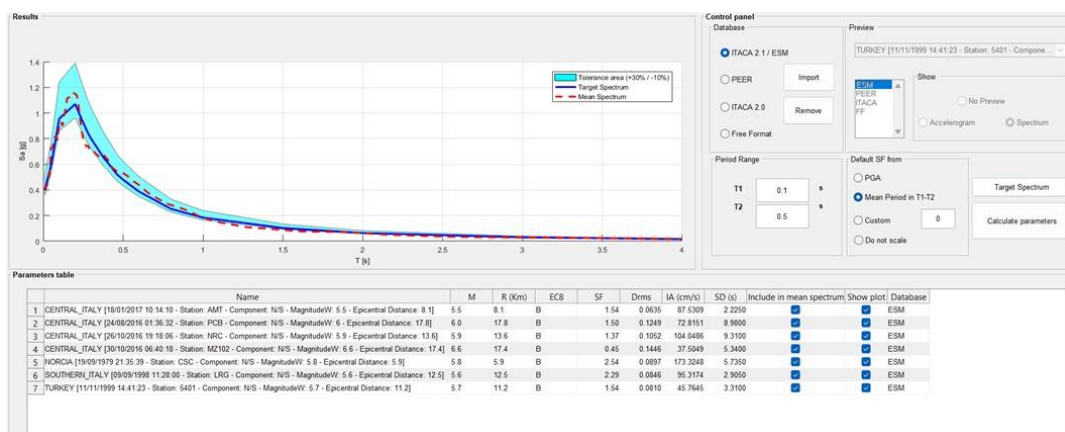


Figura 9 - Esempio di processo di selezione di accelerogrammi spettro-compatibili

## 2.2.4 Analisi della risposta sismica locale

La Risposta Sismica Locale (“RSL”) consiste nella valutazione della variazione che il segnale sismico ha subito una volta arrivato in superficie per effetto dell’alternarsi dei diversi strati di terreno che separano lo strato di roccia di base dal piano campagna. Si tratta quindi di definire l’amplificazione sismica (superficiale) che il sito subisce attraverso la caratterizzazione geo-stratigrafica: tale analisi consente di ottenere quindi segnali maggiormente indicativi delle condizioni locali da utilizzare per le analisi strutturali (sotto forma, ad esempio, di spettri di risposta (Figura 9)). Uno studio approfondito al riguardo è stato svolto da [BGMMMVM-024] e [BGS-022], la cui particolarità consiste proprio nell’applicazione al contesto geologico di uno stabilimento.

Come previsto ai §7.11.3.1 e §C.3.2.2, rispettivamente delle “NTC 2018” e della Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019, l’analisi di “RSL” deve essere accompagnata da uno studio geomorfologico, stratigrafico e tettonico del sito, assieme alla definizione della categoria di sottosuolo. Questo passaggio è essenziale poiché la risposta del terreno alla vibrazione sismica dipende fortemente dalla stratigrafia e dalle proprietà dinamiche dei materiali che lo compongono: strati soffici tendono ad amplificare le onde sismiche, mentre terreni rigidi o rocciosi tendono a smorzarle.

In alternativa all’analisi completa, la normativa consente l’uso di metodi semplificati, qualora l’obiettivo sia la definizione degli spettri di risposta per analisi lineari; gli spettri di progetto vengono modificati mediante coefficienti correttivi che tengono conto:

- della categoria di sottosuolo, classificata secondo la Tabella 3.2.II delle “NTC 2018” (Figura 10), dipendente dalla velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 metri ( $V_{S30}$ );
- della morfologia del terreno di superficie, attraverso il coefficiente stratigrafico “ $S_s$ ” (Figura 11) e il coefficiente topografico “ $S_T$ ” (associato a sua volta ad una categoria topografica correlata all’ubicazione della struttura - Figura 12).

Quest’ultimo approccio, pur essendo meno dettagliato, è spesso adeguato in contesti geologici ben noti o per opere di classe d’importanza ordinaria.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l’utilizzo dell’approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Figura 10 - *Categorie di sottosuolo che permettono l’utilizzo dell’approccio semplificato*

Tab. 3.2.IV – Espressioni di  $S_S$  e di  $C_C$ 

Categoria sottosuolo	$S_S$
A	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$

Figura 11 - Coefficiente stratigrafico “SS” al variare della categoria di sottosuolo

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$ 

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Figura 12 - Correlazione tra categoria topografica e coefficiente topografico

I valori dei parametri geotecnici e dinamici devono provenire da un'adeguata caratterizzazione geologica e geotecnica del sito, condotta secondo il §6.2.2 delle “NTC 2018”. Qualora disponibili, possono essere utilizzati dati derivanti da indagini pregresse, purché rappresentativi del volume significativo di terreno. Inoltre, gli studi di microzonazione sismica (livello 2 o 3), se approvati dal Comune, costituiscono una fonte preziosa per identificare le zone con effetti di amplificazione.

Le differenze tra l'azione sismica su roccia e quella in superficie (legata agli effetti di sito) possono essere notevoli. Per questo motivo, in fase di definizione dello spettro di progetto, è possibile impiegare, come alternativa a quello normativo, lo spettro a pericolosità uniforme (“UHS”), che rappresenta la media delle massime risposte sismiche per ciascun periodo, mantenendo costante la probabilità di superamento. A supporto di ciò, si evidenzia come lo studio sismico locale conduce spesso all'ottenimento di spettri di risposta più severi rispetto a quelli di normativa, il che significa che l'adozione di questi ultimi potrebbe portare ad una sottostima della domanda sismica, come mostrato in Figura 12.

Tra gli effetti di sito che le analisi di risposta sismica locale possono evidenziare, rientra anche la liquefazione dei terreni sabbiosi saturi, fenomeno in cui la perdita temporanea della resistenza a taglio provoca un comportamento del terreno assimilabile a quello di un fluido denso e viscoso. Questo effetto, osservato in occasione del terremoto dell'Emilia del 2012, può generare cedimenti o spostamenti laterali importanti e deve, pertanto, essere valutato nei siti caratterizzati da sabbie fini e falda superficiale.

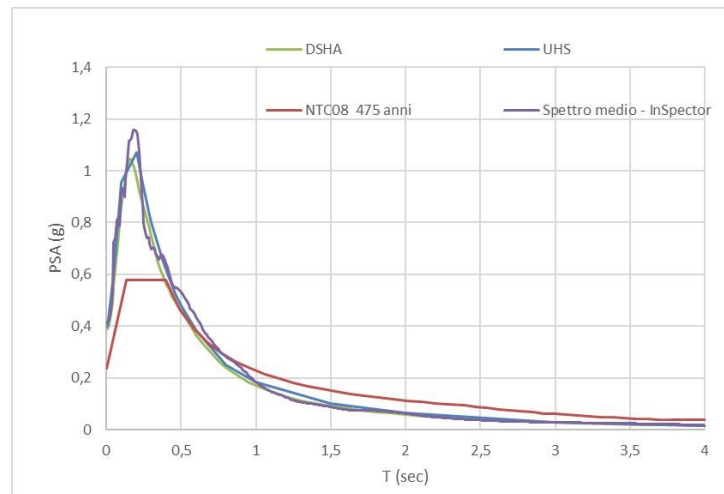


Figura 13 - Confronto tra gli spettri impiegabili ai fini della valutazione dell'azione sismica

### 3 Valutazione della sicurezza sismica per stabilimenti esistenti

L'obbligo di valutazione della sicurezza nel caso di stabilimenti industriali viene introdotto dall'“O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003” (art. 2, comma 3): “E' fatto obbligo di procedere a verifica, da effettuarsi a cura dei proprietari [...omissis...], sia degli edifici di interesse strategico e delle opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile, sia degli edifici e delle opere infrastrutturali che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso”.

La valutazione della sicurezza deve effettuarsi qualora ricorra anche una sola delle situazioni riportate al § 8.3 delle “NTC 2018”:

- “Riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti dovuta a: significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, deformazioni significative conseguenti anche a problemi in fondazione; danneggiamenti prodotti da azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), da azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni) o da situazioni di funzionamento ed uso anomali;
- Provati gravi errori di progetto o di costruzione;
- Cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili e/o passaggio ad una classe d'uso superiore;
- Esecuzione di interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale e, in modo consistente, ne riducano la capacità e/o ne modifichino la rigidità;
- Ogni qualvolta si eseguano gli interventi strutturali di cui al § 8.4;
- Opere realizzate in assenza o difformità dal titolo abitativo, ove necessario al momento della costruzione, o in difformità alle norme tecniche per le costruzioni vigenti al momento della costruzione.”

Per gli stabilimenti esistenti, valgono le prescrizioni del capitolo 8 delle “NTC 2018”. In particolare, nelle verifiche rispetto alle azioni sismiche il livello di sicurezza è quantificato attraverso il rapporto di sicurezza ( $\zeta_E$ ), tra l'azione sismica massima sopportabile dall'opera (apparecchiatura)

esistente e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto ex novo (sul medesimo sito e con le medesime caratteristiche):

$$\zeta_E = \frac{\text{azione sismica massima sopportabile dall'opera esistente}}{\text{azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto ex novo}} \quad (9)$$

Qualora  $\zeta_E$  risulti inferiore all'unità, la verifica non è soddisfatta; in questo caso, le "NTC 2018" considerano la possibilità di valutare eventuali progetti degli interventi al fine di migliorare la condizione dello stato di fatto. L'obiettivo è quello di incrementare il livello di sicurezza dell'opera in funzione delle indicazioni previste dai § 8.4.1, § 8.4.2, § 8.4.3 delle stesse norme tecniche. A tal proposito vengono definiti interventi di adeguamento sismico quelli volti ad incrementare tale livello affinché risulti " $\zeta_E \geq 0,80$ ". Nel caso in cui non sia oggettivamente possibile da un punto di vista tecnico/economico raggiungere questa soglia, sono ammessi interventi di miglioramento sismico che consentono di raggiungere il livello di sicurezza " $\zeta_E \geq 0,60$ ", a condizione che il gestore preveda e dimostri l'utilizzo di sistemi tecnici e gestionali per la mitigazione delle conseguenze legate ad un evento sismico.

Per le strutture, impianti e componenti d'impianto le cui verifiche abbiamo condotto alla definizione di un livello di sicurezza " $\zeta_E < 0,80$ ", salvo ulteriori e più cautelative valutazioni del professionista incaricato e del gestore, nelle more della conclusione degli interventi o dell'adozione di misure, anche temporanee, volte al soddisfacimento di tale parametro, si valuterà nell'analisi istruttoria del Rapporto di Sicurezza lo scenario incidentale associato.

Anche nel caso in cui la verifica sismica sia soddisfatta, comunque il gestore può predisporre adeguate misure di mitigazione del rischio per contenere i danni derivanti dall'evento sismico sull'uomo e sull'ambiente, adottando sistemi tecnici/gestionali mediante il posizionamento e l'installazione di sensori e dispositivi di allerta precoce, come i sistemi di Early Warning Sismico (regionali e di sito) e i sistemi di Early Warning Impiantistico/Strutturale (sensori per il rilevamento di deformazioni, spostamenti e fuoriuscita di sostanze pericolose) per l'attivazione di dispositivi di protezione attiva.

### 3.1 Verifiche in ottemperanza al metodo semi-probabilistico degli stati limite

Per le strutture civili le verifiche di sicurezza vengono eseguite in funzione della tipologia strutturale, della classe d'uso e quindi degli stati limite previsti per l'opera (Figura 14).

Tab. 7.3.III – Stati limite di elementi strutturali primari, elementi non strutturali e impianti

STATI LIMITE		CU I	CU II			CU III e IV		
		ST	ST	NS	IM	ST	NS	IM <sup>(*)</sup>
SLE	SLO					RIG		FUN
	SLD	RIG	RIG			RES		
SLU	SLV	RES	RES	STA	STA	RES	STA	STA
	SLC		DUT <sup>(**)</sup>			DUT <sup>(**)</sup>		

Figura 14 - Verifiche da effettuare in funzione della classe d'uso (NTC 2018)

Tuttavia, si tratta di un approccio che, seppur strutturato per la considerazione dell'azione sismica, presenta un numero ridotto di punti di incontro con il contesto impiantistico/strutturale. È proprio per

questo motivo che, per il contesto oggetto di studio, le definizioni di stati limite perdono parzialmente di validità. Risulta così necessario, sempre nel rispetto delle indicazioni proposte nello stesso “D.M. 17.01.2018”, aggiungere qualche dettaglio che possa chiarire la direzione da prendere. A tal proposito, per un impianto con pericolo di incidente rilevante è possibile definire due distinti stati limite [BRAP-015]:

- Operating Basis Earthquake (OBE);
- Safe Shutdown Earthquake (SSE).

Volendo proporre un parallelismo, il primo (“OBE”) equivale allo stato limite di salvaguardia della vita (“SLV”) per il contesto delle opere civili e si riferisce alle condizioni per le quali l’impianto continua ad essere pienamente operativo anche dopo il sisma. Mentre il secondo (“SSE”) si riferisce alla condizione nella quale siano presenti danni nelle apparecchiature ma tali da permettere comunque lo spegnimento sicuro dell’impianto (può quindi essere legato alle condizioni di incipiente collasso - “SLC”). Con riferimento a ciò, viene proposta una raffigurazione indicativa proprio di quanto appena espresso:



Figura 15 - Correlazione tra stati limite e probabilità di occorrenza dei fenomeni sismici per le varie categorie di asset.

In generale, una "Basic Facility" può essere interpretata come un elemento (che non necessariamente prende parte al ciclo produttivo dello stabilimento) le cui conseguenze a seguito di un danno (sismico) sono limitate alla struttura stessa. A tal proposito è possibile notare come le performance richieste, a seconda della probabilità di accadimento del sisma, rispecchino qualitativamente quanto proposto nelle “NTC 2018”. Al contrario le "Hazardous Facilities" e le "Safety Critical Facilities" presentano le caratteristiche, in termini di performance sismiche, che gli asset di uno stabilimento PIR devono garantire (a seconda della loro vulnerabilità/esposizione sismica).

Quindi, tornando a quanto espresso nel “D.M. 17.01.2018” e annessa circolare, nel caso di inadeguatezza nei confronti delle azioni sismiche e non sismiche, occorre fare riferimento a quanto riportato nel §C.8.3 della Circolare 21.01.2019: “Attesa l’aleatorietà dell’azione, nel caso in cui l’inadeguatezza di un’opera si manifesti nei confronti delle azioni sismiche, le condizioni d’uso, la necessità e la conseguente programmazione dell’intervento sono stabiliti sulla base di una pluralità di fattori, quali: la gravità dell’inadeguatezza (e le conseguenze che questa comporterebbe anche in termini di pubblica incolumità), le disponibilità economiche, etc. Nel caso in cui l’inadeguatezza di un’opera si manifesti nei confronti delle azioni non sismiche è necessario adottare gli opportuni provvedimenti,

quali ad esempio limitazioni ai carichi consentiti, restrizioni all'uso e/o esecuzione di interventi volti ad aumentare la sicurezza, che ne consentano l'uso con i livelli di sicurezza richiesti dalle NTC". A seguito delle verifiche di sicurezza e di un'attenta valutazione degli esiti, il gestore ed il tecnico incaricato alle verifiche dovranno proporre un programma di adeguamento/miglioramento, avendo individuato specifiche priorità di intervento. La tempistica e l'ordine delle stesse è funzione sia del livello di inadeguatezza delle verifiche, che del livello di pericolo intrinseco dell'elemento oggetto di verifica. Maggiore è il livello di inadeguatezza (quindi per valori di  $\zeta_E$  progressivamente più vicini allo zero), maggiore dovrà essere la tempestività entro cui realizzare l'intervento. Al contempo, nel caso in cui la valutazione della sicurezza evidenzi "particolari elementi di rischio", ovvero conseguenze di particolare severità in relazione allo scenario incidentale associato e anche ai danni causati dall'azione sismica, i provvedimenti necessari alla riduzione del livello di inadeguatezza (quindi un aumento dello  $\zeta_E$ ) a valori accettabili devono essere adottati nel minor tempo possibile.

#### 4 Valutazione dell'esposizione al pericolo da sisma

Nel contesto degli stabilimenti industriali e, in particolare, di quelli soggetti alla Direttiva Seveso III (stabilimenti "PIR"), il concetto di esposizione assume una valenza duplice: da un lato riguarda le strutture fisiche e le apparecchiature di processo, dall'altro include gli aspetti legati alla sicurezza (delle persone, dei lavoratori e dell'ambiente circostante) e alla continuità operativa dell'impianto. A differenza delle costruzioni civili, infatti, negli impianti industriali un danno strutturale può generare conseguenze di tipo tecnologico come incendi, esplosioni o rilasci di sostanze pericolose, amplificando notevolmente l'impatto complessivo dell'evento tellurico in sé. La determinazione dell'esposizione implica quindi da un lato la stima dell'effetto che avrebbe un evento NaTech sulla salute umana (personale dell'impianto e zone residenziali limitrofe) mentre dall'altro interessa la caratterizzazione del valore, della tipologia e della distribuzione spaziale degli asset presenti nello stabilimento, nonché l'analisi della loro importanza strategica o della loro potenziale pericolosità. In tale ottica, la stessa esposizione non si limita a una mera stima economica, ma comprende una componente funzionale e gestionale, legata alla criticità operativa e alla possibilità di escalation del danno.

##### 4.1 Computo dell'indice di esposizione

In linea generale è possibile associare un valore numerico correlato al grado esposizione (che poi si concretizzerà nell'indice di esposizione nel §7.2.1 del presente documento) per tutte le apparecchiature [CPC-021]. Tanto più è alto questo valore quanto maggiore è l'estensione dell'impatto prodotto a seguito di un incidente:

- Esposizione elevata = 4 (coinvolgimento di aree esterne all'impianto);
- Esposizione media = 3 (impatti estesi su vaste aree dell'impianto con  $D > 50$  m);
- Esposizione bassa = 2 (impatti confinati nell'area dell'unità di riferimento, con distanza di impatto  $D < 50$  m);
- Esposizione minima = 1 (impatti non rilevanti);

In relazione a ciò, è il gestore dello stabilimento che può classificare il livello di esposizione (per scenari con effetti all'esterno dello stabilimento è necessario fare riferimento al "D.M. 9 maggio

2001”), così da individuare un ordine di priorità di intervento: lo stesso valore di esposizione dovrà essere correlato all’inadeguatezza risultante dalle verifiche ottenendo così un vero e proprio indicatore di priorità (“IPI”):

$$I_{PI} = \frac{E}{\zeta_E}$$

Si tratta di un parametro dato dal rapporto tra l’indice di esposizione “E” e il rapporto di sicurezza sismica precedentemente definito. In funzione dei diversi livelli assunti dall’indice di priorità è possibile redigere una matrice di priorità di intervento (Tabella 1):

Tabella 1 - Matrice di priorità di intervento

		Livello di esposizione			
		1	2	3	4
$\zeta_E$	0.8	1,25	2,50	3,75	5,00
	0.7	1,43	2,86	4,29	5,71
	0.6	1,67	3,33	5,00	6,67
	0.5	2,00	4,00	6,00	8,00
	0.4	2,50	5,00	7,50	10,00
	0.3	3,33	6,67	10,00	13,33
	0.2	5,00	10,00	15,00	20,00
	0.1	10,00	20,00	30,00	40,00

Tale metodologia può supportare anche i gruppi di lavoro delle attività istruttorie ed ispettive nelle valutazioni relative alle priorità degli interventi sia nella fase di programmazione che in quella di realizzazione.

## 5 Valutazione della vulnerabilità sismica

In letteratura è presente una vasta gamma di metodologie di analisi, ciascuna basata su livelli di complessità di modellazione differenti (quindi di accuratezza dei risultati), a partire da semplici considerazioni di carattere visivo da cui discendono risultati qualitativi (adatti a rappresentazioni della vulnerabilità su larga scala), fino a modellazioni numeriche lineari o non lineari (adatte allo studio di singoli casi). Una metodologia estremamente diffusa consiste nella definizione delle curve di fragilità (Figura 16): si tratta di un approccio di tipo quantitativo che permette di ottenere

il risultato in forma probabilistica. Il metodo è volto a definire l'andamento della probabilità di danno (o superamento di uno stato limite) in funzione del valore corrispondente intensità sismica. Gli elementi che entrano in gioco sono quindi la stessa misura di intensità sismica ("IM", coerentemente con quanto definito nel §2.2.1), la soglia di danneggiamento ("Limit State" - "LS") e il valore di risposta strutturale ad essa associato ("Engineering Demand Parameter" - "EDP").

Quest'ultima può essere ottenuta dall'analisi statistica dei danni provocati dai terremoti (per le diverse classi di strutture e/o apparecchiature), oppure analizzando caso per caso la tolleranza allo stress prodotto dalla forzante sismica delle varie componenti (ad esempio mediante modellazione sofisticata).

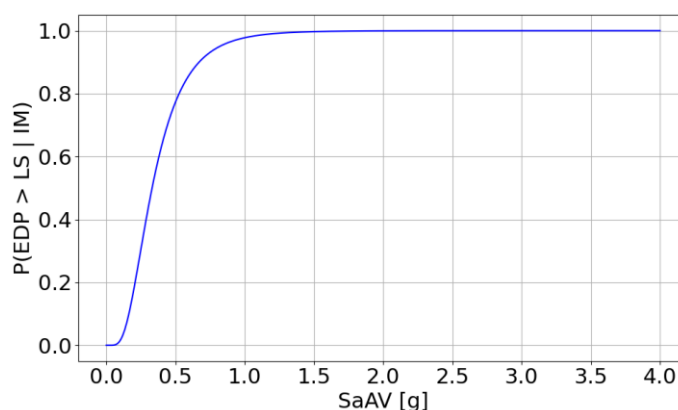


Figura 16 - Esempio di curva di fragilità

Tale analisi risulterà tanto più accurata quanto maggiore è il grado di raffinatezza del modello adottato (per descrivere il comportamento dell'apparecchiatura) e delle soglie di danno utilizzate (maggiori dettagli in merito verranno forniti nel seguito della trattazione).

Un livello di analisi di questo tipo costituisce un giusto compromesso per analisi di vulnerabilità nell'ambito di stabilimenti con pericolo di incidente rilevante, in quanto permette di ottenere dei risultati probabilistici sufficientemente affidabili per l'utilizzo nell'ambito di analisi di rischio, consentendo allo stesso tempo la verifica di condizioni di estrema complessità, altrimenti difficilmente indagabili con metodi puramente analitici (a causa della vastità degli elementi e dell'estrema multidisciplinarietà richiesta).

## 5.1 Analisi preliminare del rischio NaTech da Sisma

Gli obiettivi dell'analisi preliminare del rischio NaTech da Sisma sono quelli di identificare tra le unità presenti all'interno dello stabilimento quelle vulnerabili all'azione sismica e, attraverso una metodologia speditiva, creare una gerarchia delle vulnerabilità (di tipo strutturale e non strutturale) al fine di definire un ordine di priorità per ulteriori analisi ed interventi.

L'analisi preliminare del rischio Natech da Sisma si articola nelle fasi di seguito riportate:

- Indentificare le unità che manifestano criticità in termini di comportamento sismico e che sono interessate dalla presenza di sostanze pericolose (ai sensi del "D.lgs 105/15"), a partire dalle apparecchiature che possono essere precursori di effetti domino o la cui trasmissione delle conseguenze interessa anche le aree esterne allo stabilimento.

- Identificare le unità, presenti all'interno dello stabilimento, che non sono interessate dalla presenza di sostanze pericolose ai sensi del "D.lgs 105/15", il cui danneggiamento o collasso totale legato al sisma, può innescare o favorire uno scenario incidentale.
- Creare una gerarchia delle vulnerabilità sismiche di tipo strutturale e non strutturale delle unità considerate per procedere alla valutazione della sicurezza sismica e alla successiva analisi del rischio quantitativa. L'eventuale esclusione da tale analisi non può riguardare unità critiche con presenza di sostanze pericolose ai sensi del "D.lgs 105/15" o sistemi di sicurezza. Si precisa che la valutazione della sicurezza sismica eseguita su un'unità critica può essere considerata estensibile a strutture identiche o rappresentative dal punto di vista della risposta avendo considerato l'elemento più sfavorevole ai fini della sicurezza sismica. Si sottolinea l'importanza di verificare che il degrado non abbia ridotto le prestazioni al di sotto del livello previsto e che sia stata eseguita una specifica manutenzione.

Affinché possa essere eseguita l'analisi preliminare, il gestore potrà avvalersi di metodi speditivi di comprovata validità, come l'utilizzo delle curve di fragilità empiriche, semi-empiriche e sperimentali (la costruzione di curve analitiche viene riservata all'analisi di rischio §7.1.2 poiché molto onerosa in termini di mole di dati e tempistiche).

## 5.2 Comportamento sismico e modellazione delle apparecchiature principali

Da un punto di vista strutturale e funzionale, le principali tipologie di apparecchiature di un impianto di processo si possono raggruppare in base a criteri di similitudine geometrica e meccanica:

- Apparecchiature snelle poggiate sulla fondazione;
- Apparecchiature tozze poggiate a terra;
- Apparecchiature tozze o snelle poste su strutture di supporto;
- Tubazioni e strutture di sostegno.

A loro volta, queste stesse unità sono generalmente associate a specifiche modalità di danneggiamento di matrice sismica: la loro configurazione strutturale è infatti determinata principalmente dalle esigenze di funzionamento dell'impianto, con il risultato di ottenere distribuzioni di masse e rigidità spesso irregolari. Tuttavia, l'analisi dei danni osservati a seguito di eventi sismici passati ha permesso di individuare gli elementi maggiormente vulnerabili, le categorie funzionali più esposte e al contempo di descrivere adeguatamente la risposta sismica delle apparecchiature. Resta però una sostanziale difficoltà nell'individuazione dei parametri meccanici associati alla perdita di contenimento. Per superare questa criticità, risulta utile ricorrere alle cosiddette matrici danno-rilascio ("DS/LOC"), strumenti deterministici che mettono in relazione lo stato di danno di un'apparecchiatura con i potenziali rilasci di sostanze pericolose.

Nell'ambito del presente lavoro si è scelto di adottare l'approccio deterministico proposto da [ACCGP-016], secondo cui gli stessi stati di rilascio vengono classificati in tre livelli:

- Lievi ("LOC1"): rilascio continuo da un foro di 10 mm;
- Sostenuti ("LOC2"): rilascio continuo dalla sezione del tubo connesso al mantello;
- Catastrofici ("LOC3"): rilascio istantaneo dell'intero contenuto dell'apparecchiatura.

Tale approccio consente di correlare in modo chiaro lo stato di danneggiamento indotto dal sisma con le potenziali conseguenze sul rilascio di sostanze pericolose, fornendo un importante supporto alla valutazione del rischio sismico negli impianti industriali.

### 5.2.1 Apparecchiature snelle

Alla categoria delle apparecchiature snelle appartengono quelle unità di forma cilindrica (orientate sia verticalmente che orizzontalmente) con un rapporto altezza/raggio piuttosto elevato, tra cui colonne, reattori, scambiatori, camini e torce.

L'interazione sismica solitamente produce condizioni di criticità localizzate nelle zone di transizione tra il mantello ed il supporto e nell'attacco in fondazione. I danni riguardano prettamente l'instabilità della gonna, lo snervamento delle barre di ancoraggio alla fondazione e la perdita di fluidi per incremento dello stress al collegamento dei tubi (causata dagli spostamenti relativi eccessivi). A loro volta le apparecchiature snelle sono suddivisibili in:

- Colonne di reazione/separazione (ad asse verticale)
- Serbatoi ad asse orizzontale

#### 5.2.1.1 Colonne di reazione/separazione

Di fatto rappresentano una sottocategoria delle apparecchiature snelle; sono vincolate a terra mediante una gonna in acciaio recante alla base un giunto flangiato collegato a sua volta ad un plinto di fondazione (superficiale) in calcestruzzo armato (attraverso dei tirafondi in acciaio).

La distribuzione della massa è di solito piuttosto uniforme e può essere considerata in prima approssimazione continua anche se presenti irrilevanti discontinuità interne (correlate al percorso dei fluidi trattati).



Figura 17 - Esempio di colonna industriale

Solitamente la struttura viene modellata con elementi shell (Figura 18) e vincolata a terra mediante una molla in grado di simulare il comportamento della flangia che collega la gonna con la fondazione [CB-001]: è possibile definire una rigidità rotazionale equivalente alla base, alla quale contribuiscono sia le caratteristiche della flangia che dei tirafondi.

La massa strutturale è costituita principalmente dal peso proprio e del liquido, il cui ricircolo con-

tinuo consente di trascurare l'eventuale contributo idrostatico sul mantello.

La modellazione delle tubazioni collegate alla struttura (Figura 18) può eventualmente essere trascurata pur mantenendo un buon livello di sicurezza, poiché la loro deformabilità incide in modo praticamente irrilevante sulla dinamica strutturale complessiva. Attraverso analogie di natura geometrica è comunque possibile risalire alla rotazione che i collegamenti dei tubi subiscono per effetto dell'eccitazione sismica, così da poter valutare l'occorrenza di eventuali rilasci.

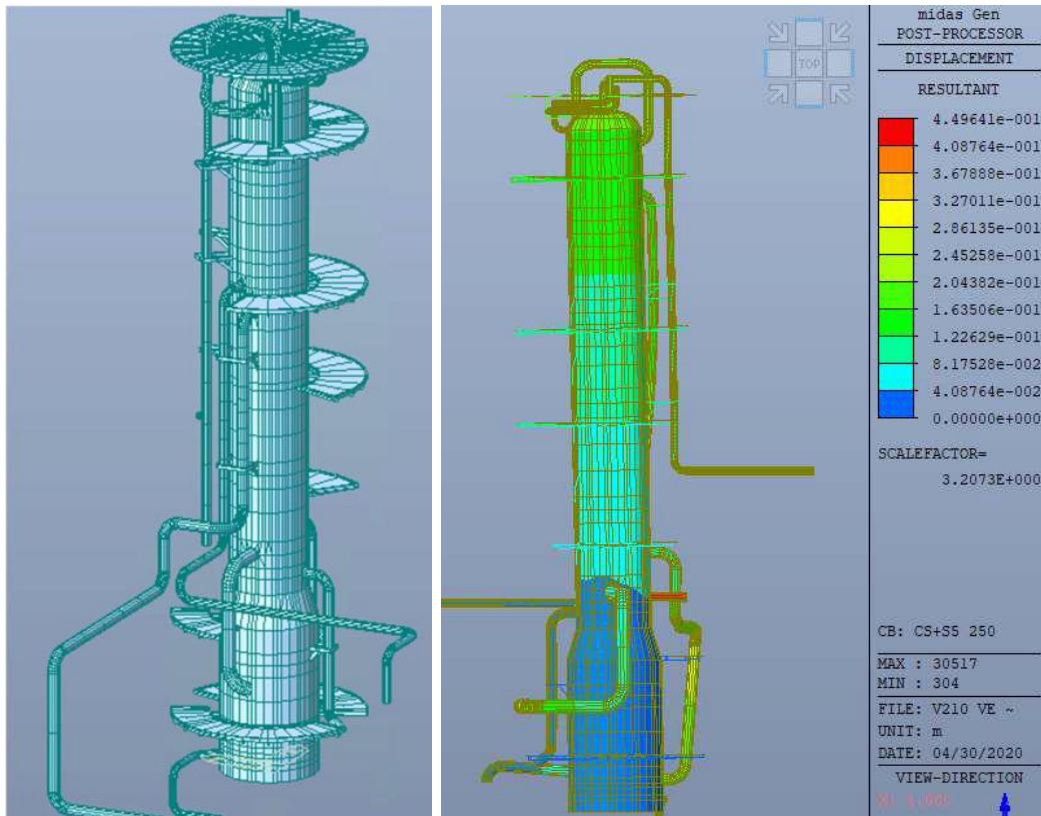


Figura 18 - Modellazione di una colonna mediante elementi shell

Tra le conseguenze principali generate dall'interazione tra l'azione sismica e l'apparecchiatura, vi è la considerazione del "buckling" all'altezza della gonna e la plasticizzazione dei tirafondi in acciaio, a cui è associabile il collasso strutturale nonché il rilascio istantaneo (LOC3) di tutto il contenuto (oltre alle possibili interazioni meccaniche con le apparecchiature adiacenti). Rilasci di minore entità (LOC1 e LOC2) sono invece legati a condizioni di eccessive deformazioni al collegamento tra la singola tubazione e la colonna.

La Tabella 2 fornisce un quadro generale della relazione "DS/LOC" per questa tipologia di apparecchiature:

Tabella 2 - Correlazione danno - rilascio per colonne

Stati di danno (DS)	Parametro di domanda ingegneristico (EDP)	Stato limite (LS)	LOC1 Rilascio continuo da un foro di 10 mm	LOC2 Rilascio continuo dalla sezione del tubo connesso al mantello	LOC3 Rilascio istantaneo di tutto il contenuto
Rottura alla base della colonna	Rotazione alla base della colonna	Rotazione di completa plasticizzazione (collasso strutturale)	No	No	Sì
Eccessiva rotazione della flangia delle tubazioni	Rotazione della colonna nel punto di attacco del tubo	Rotazione di primo rilascio	Sì	No	No
Eccessiva rotazione della flangia delle tubazioni	Rotazione della colonna nel punto di attacco del tubo	Rotazione di rottura	No	Sì	Sì

Per quanto riguarda invece le rotazioni che possono manifestarsi nelle flange di collegamento delle tubazioni [KB-011] particolarmente indicativa a tal proposito è la Tabella 3:

Tabella 3 - Valori limite delle rotazioni per rilasci da flange di tubazioni

Stato di Danno	Valore limite della rotazione di primo rilascio dalle tubazioni	Valore limite della rotazione di rottura delle flange
Rilascio dalle flange di attacco delle tubazioni	10 mrad	30 mrad

### 5.2.1.2 Serbatoi ad asse orizzontale

I serbatoi orizzontali sono costituiti in genere da un corpo cilindrico ad asse orizzontale poggiato su selle metalliche, a loro volta vincolate alla fondazione in c.a. mediante tirafondi (Figura 19).

Secondo l'Eurocodice 8 parte 4, i serbatoi cilindrici orizzontali devono essere analizzati considerando l'azione sismica agente lungo la direzione longitudinale e trasversale dell'elemento.

Valori approssimati della pressione idrodinamica indotta dal sisma, in entrambe le direzioni, possono essere ottenuti facendo riferimento ad un serbatoio rettangolare avente la stessa profondità all'altezza del liquido, la dimensione effettiva nella direzione dell'azione sismica e la terza dimensione calcolata in modo tale da garantire un volume di liquido pari a quello effettivo. Questa approssimazione è sufficientemente accurata per colonne aventi un rapporto tra altezza del liquido contenuto e raggio del serbatoio compresa tra 0.5 ed 1.6. Se tale rapporto supera quest'ultimo valore il serbatoio deve essere considerato pieno, cioè la massa totale del liquido agente in modo solidale con l'apparecchiatura.

Dal punto di vista del comportamento dinamico, il moto del fluido (e quindi in generale la massa dello stesso) può essere suddiviso in un contributo impulsivo (il liquido si muove rigidamente con le pareti del serbatoio) e uno convettivo (responsabile della formazione del moto ondoso superficiale).

Contrariamente al moto impulsivo (la cui massa associata è stimabile come percentuale della massa totale del liquido in funzione del livello di riempimento - [KPL-006]), la massa di quest'ultimo è solitamente piuttosto modesta.



Figura 19 - Esempio di serbatoio orizzontale

In termini di modellazione è possibile ricorrere ad una struttura semplificata a masse concentrate per stimare le sollecitazioni globali [KPL-006], mentre, per la caratterizzazione locale (spostamenti delle tubazioni o tensioni nel mantello), è necessario ricorrere ad un modello FEM costituito da elementi shell.

Come per le colonne, la considerazione della deformabilità associata alla presenza o meno delle tubazioni non incide sulla dinamica strutturale. Fondamentale è invece tenere conto del livello di rotazione nelle flange di collegamento delle tubazioni stesse con il serbatoio, al fine di indagare o meno la possibilità di instaurazione di fenomeni di rilascio del materiale stoccato.

La fondazione della struttura può essere modellata mediante elementi solidi, attraverso i quali sarà possibile valutare il livello di stress nei tirafondi e nelle selle (Figura 20).

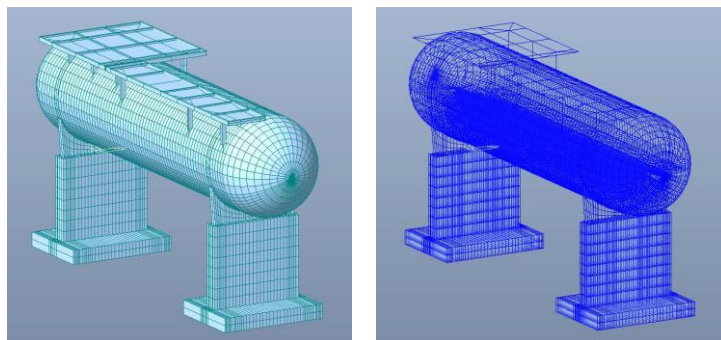


Figura 20 - Modellazione agli elementi finiti di un serbatoio orizzontale

Dal punto di vista del comportamento sismico, la principale vulnerabilità strutturale risiede nel collegamento delle selle con il corpo orizzontale e con la fondazione. Eventuali criticità che coinvolgono entrambi gli aspetti possono facilmente generare circostanze di collasso strutturale (a

causa del possibile ribaltamento dell'apparecchiatura - Figura 21), condizione associabile quindi ad un rilascio istantaneo di tutto il contenuto (LOC3).

Gli altri due possibili stati di rilascio (LOC1 e LOC2), generabili per eccessiva rotazione delle flange di collegamento di tubazioni con il mantello, sono invece più rari.

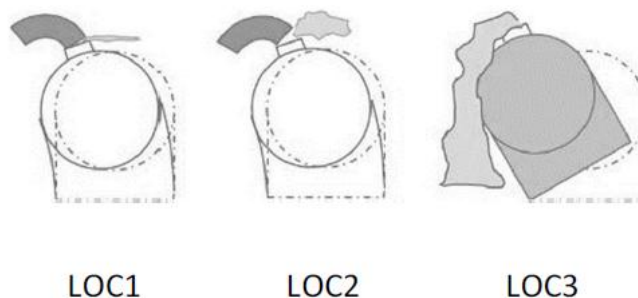


Figura 21 - Schematizzazione delle condizioni di rilascio nei serbatoi orizzontali

### 5.2.2 Apparecchiature tozze

I grandi serbatoi per il contenimento dei liquidi in condizioni di pressione atmosferica sono di forma cilindrica con un rapporto altezza-diametro che va da 2 a 0.2 (Figura 22).

Il fondo è circolare e poggia direttamente sulla fondazione, che di solito è realizzata in modo semplice, similmente a una massiciata stradale composta, a partire dalla base, da vespaio, granigliato di selce e graniglia fine bitumata superficiale.

Queste apparecchiature possono essere soggette a significative criticità strutturali associate a due fenomeni principali: il ribaltamento, che contribuisce a deformare la piastra di base, e lo scorrimento, che può portare alla rottura delle tubazioni a causa degli spostamenti differenziali.

Il tetto dei serbatoi può essere fisso (quindi solidale al mantello cilindrico) o galleggiante e adeso alla superficie del liquido contenuto (al fine di ridurre la possibilità di formazione di gas altamente infiammabili). Il volume utile contenuto varia da poche decine fino a centinaia di migliaia di metri cubi; si tratta quindi di masse considerevoli, che per effetto dell'azione sismica vengono poste in oscillazione producendo zone di stress elevato sulle pareti del serbatoio o provocando il danneggiamento del tetto e la fuoriuscita di materiale.



Figura 22 - Esempio di serbatoio atmosferico presente in uno stabilimento

Un valido approccio di modellazione per le analisi sui serbatoi è quello a masse concentrate, proposta dall'Eurocodice 8 parte 4, secondo il quale il sistema fluido-serbatoio viene rappresentato proprio da due masse caratterizzate da un unico grado di libertà ("SDOF") e opportune caratteristiche, che tengono conto della componente impulsiva e convettiva del moto (Figura 23 - [PP-018]). La valutazione del comportamento dinamico può avvenire anche attraverso modelli più complessi, agli elementi finiti (Figura 24), in cui le pareti del serbatoio vengono modellate mediante elementi shell e il liquido contenuto attraverso elementi solidi. Tuttavia, dato che la valutazione della vulnerabilità sismica richiede l'esecuzione di numerose analisi dinamiche per poter definire il comportamento strutturale in termini probabilistici, i modelli semplificati risultano più adatti in quanto richiedono oneri computazionali ridotti e quindi analisi maggiormente ottimizzate.

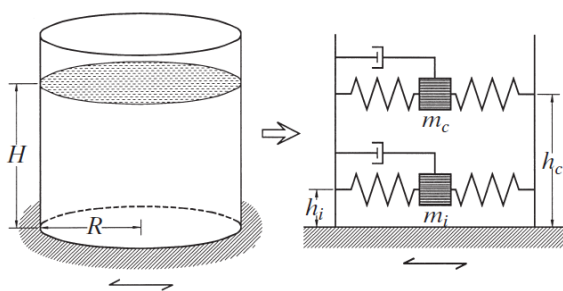


Figura 23 – Modellazione semplificata di un serbatoio mediante masse concentrate a un grado di libertà

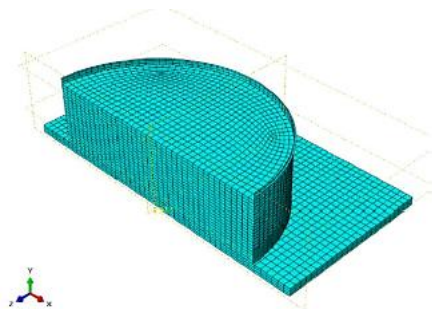


Figura 24 – Esempio di modellazione FEM 3D di un serbatoio attraverso elementi shell

La vulnerabilità sismica dei serbatoi è stata più volte evidenziata attraverso l'analisi dei danni che si sono verificati durante gli eventi sismici passati; ne sono un esempio i terremoti di Tokachi-Oki (2003, Giappone) e di Kocaeli (1999, Turchia).

Il primo, di magnitudo 8, provocò il danneggiamento del tetto di un serbatoio contenente greggio nella raffineria di Hokkaido. Si innescò quindi un incendio dovuto all'esposizione diretta del liquido all'atmosfera che fu estinto dopo molte ore. Gli abitanti accusarono problemi alle vie respiratorie legati alle elevate concentrazioni di formaldeide, xilene, toluene e benzene.

Anche il terremoto di Kocaeli provocò gravi danni nel parco serbatoi della raffineria di Tupras; si verificarono notevoli problematiche strutturali per quelle apparecchiature caratterizzate da tetto galleggiante, ma anche fenomeni di instabilità e fessurazione delle pareti. Immediatamente dopo il terremoto si svilupparono diversi incendi nei serbatoi contenenti nafta che si propagarono facilmente raggiungendo le apparecchiature limitrofe a causa di un guasto ai sistemi di emergenza. Furono direttamente esposti all'atmosfera 250.000 m<sup>3</sup> di greggio e 100.000 m<sup>3</sup> di prodotti raffinati, con un considerevole inquinamento del suolo e dell'aria.

Circostanze di questo tipo hanno messo in risalto le principali criticità di questa categoria di apparecchiature, che possono essere riassunte in:

- Instabilità elasto-plastica ("elephant foot" buckling);
- Instabilità elastica ("diamond shape" buckling);
- Distacco delle tubazioni;

- Danni al tetto fisso;
- Instabilità secondaria;
- Condizioni di innesco di incendi generate dagli urti del tetto mobile;

Volendone citare gli aspetti più importanti si ha che l'instabilità elasto-plastica del mantello è prodotta dalla combinazione della massima tensione di compressione verticale con valori di tensione di trazione circonferenziale. Si tratta di una condizione che si verifica prevalentemente nei serbatoi tozzi, e va ad interessare la porzione di mantello circonferenziale in prossimità della base, determinando il distacco delle tubazioni laddove presenti. L'instabilità elastica, invece, si verifica nei serbatoi con mantello molto sottile e rapporto tra altezza e raggio compresi tra 2 e 4. Viene innescata dalla combinazione di una elevata tensione verticale e una ridotta tensione di trazione circonferenziale. Il distacco delle tubazioni collegate al mantello si manifesta solitamente per effetto degli scorrimenti, del sollevamento, dell'instabilità e dei cedimenti in fondazione, mentre l'instabilità secondaria è associata alla depressione prodotta dal moto convettivo nella zona tra mantello e tetto fisso.



Figura 25 - Tipici danni prodotti dal sisma sui serbatoi

Viene di seguito riportata la matrice di correlazione deterministica danno-rilascio sia per i serbatoi ancorati che non:

Tabella 4 - Correlazione danno - rilascio per serbatoi non ancorati

Damage State (DS)	Engineering Demand Parameter (EDP)	Limit State (LS)	LOC1 Rilascio continuo da un foro di 10 mm	LOC2 Rilascio continuo dal diametro della tubazione	LOC3 Rilascio istantaneo di tutto il contenuto
Elephant foot buckling	Meridional Stress	Buckling limit	No	Si	No
Diamond shape buckling	Hoop Stress	Buckling limit	Si	No	No
Sliding	Total Base Shear	Sliding Force	No	No	No
Overturning	Overturning Moment	Overturning Moment limit	No	No	Si
Base plate fracture	Max local strain	Strain limit	No	Si	No
Roof damage	Max vertical displacement of liquid	Free-board height	No	No	No

Tabella 5 - Correlazione danno - rilascio per serbatoi ancorati

Damage State (DS)	Engineering Demand Parameter (EDP)	Limit State (LS)	LOC1 Rilascio continuo da un foro di 10 mm	LOC2 Rilascio continuo dal diametro della tubazione	LOC3 Rilascio istantaneo di tutto il contenuto
Elephant foot buckling	Meridional Stress	Buckling Limit	No	Yes	No
Diamond shape buckling	Hoop Stress	Buckling limit	Si	No	No
Anchor bolt failure	Bolt Force	Yielding Force of the bolt	No	No	No
Roof damage	Max vertical displacement of liquid	Free-board height	No	No	No

### 5.2.3 Apparecchiature sostenute da colonne

Nella categoria di apparecchiature tozze o snelle sostenute da pilastri in acciaio o cemento armato possono essere annoverate molteplici tipologie di unità industriali (serbatoi sopraelevati, termodistruttori, forni, compressori, ecc.). Le sfere di Horton rappresentano uno degli esempi tipici: contengono gas in pressione liquefatto e sono sostenute da colonne in acciaio saldate al mantello (normalmente collegate tra loro mediante controventi in acciaio, Figura 26).

A queste strutture sono generalmente associati danni sismici che coinvolgono la rottura della struttura di supporto oppure il distacco delle tubazioni (a causa degli elevati spostamenti relativi).



Figura 26 - Esempio di sfera di Horton

Tali apparecchiature sono in genere modellabili come serbatoi su strutture di supporto; per questo motivo sarà necessario modellare opportunamente proprio queste ultime. Per il serbatoio si ricorre al modello a masse concentrate §5.2.2, come mostrato in Figura 27.

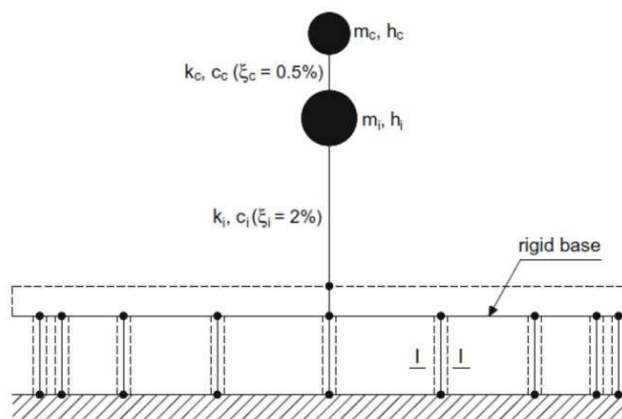


Figura 27 - Modellazione semplificata di serbatoio su struttura di supporto

Tuttavia, a tale famiglia appartengono anche sistemi più complessi, composti da telai multipiano recanti diverse categorie di asset impiantistici al di sopra. Ad esempio, in Figura 28 è rappresentato il modello di una struttura di supporto di uno scambiatore di calore presente in un impianto upstream:

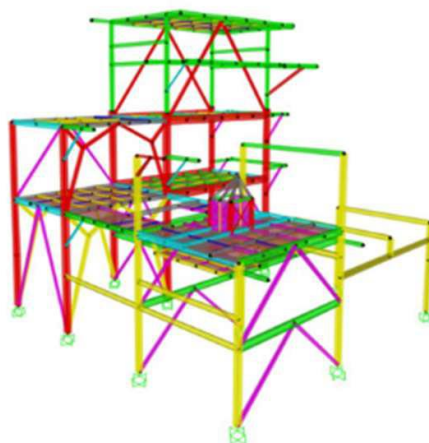


Figura 28 - Scambiatore di calore posto su struttura di supporto intelaiata in acciaio

Come accennato all'inizio, il principale punto debole di questa categoria è rappresentato dai supporti. Durante un evento sismico, tali elementi possono andare in crisi oppure alterare in modo sfavorevole il segnale trasmesso alla struttura. Entrambe le condizioni rischiano di comportare il collasso strutturale, con conseguente rilascio istantaneo del contenuto (LOC3). Inoltre, poiché i supporti risultano spesso deformabili, l'azione sismica può generare elevati spostamenti relativi e quindi rotazioni eccessive nei punti di connessione tra tubazioni e apparecchiature. In tali circostanze, si possono verificare rilasci di sostanze pericolose (come gas), sotto forma di entità lieve (LOC1) o più significativa (LOC2), a seconda della severità della deformazione. Sulla base di tali considerazioni deriva la tabella DS/LOC seguente:

Tabella 6 - Correlazione danno - rilascio per apparecchiature su strutture di supporto

Damage State (DS)	Engineering Demand Parameter (EDP)	Limit State (LS)	LOC1 Rilascio continuo da un foro di 10 mm	LOC2 Rilascio continuo dal diametro della tubazione	LOC3 Rilascio istantaneo di tutto il contenuto
Collasso Strutturale	Drift	Completa Plasticizzazione	No	No	Yes
Eccessiva rotazione della flangia delle tubazioni	Rotazione della colonna nel punto di attacco del tubo	Rotazione di primo rilascio	Sì	No	No

### 5.2.4 Piperack e tubazioni

A tale categoria appartengono tutte le tipologie di tubazioni: interrato, superficiali, su strutture di sostegno... Il loro impiego è incentrato soprattutto nel trasporto di e sostanze gassose e liquide; per questo motivo un aspetto intrinseco di tale apparato consiste nel collegamento tra tutte le varie apparecchiature coinvolte nei processi produttivi.

Particolare rilevanza viene rivestita dal comportamento delle strutture di supporto, la cui configurazione geometrica dipende prettamente da fattori di natura impiantistica. Per questo motivo la distribuzione delle rigidità del sistema non sempre risulta ottimale dal punto di vista del comportamento sismico.

A differenza delle tubazioni singole, l'intero apparato è estremamente vulnerabile agli spostamenti differenziali causati dal sisma: i punti più critici sono gli elementi di raccordo, come gomiti, giunzioni a T e bocchelli. I gomiti, in particolare, subiscono cicli di carico (dovuti al sisma) che ne provocano il superamento del limite elastico, con conseguenti deformazioni per ovalizzazione della sezione o instabilità locali (le quali evolvono in cricche fino alla rottura e alla fuoriuscita del liquido).



Figura 29 - Esempio di tubazione su struttura di supporto

La modellazione di questi componenti si basa generalmente sull'uso di elementi “beam” a sezione circolare cava, applicabili sia ai tratti rettilinei che alle giunzioni (Figura 29). Per rappresentare correttamente il comportamento di queste ultime, si introduce una variazione di rigidezza che tiene conto degli effetti geometrici, coerentemente con quanto indicato nella “EN 13480-3” e nella “ASME B31.3”. In aggiunta, per valutare le sollecitazioni locali, viene impiegato un Fattore di Intensificazione delle Tensioni, “SIF”, mentre per la modellazione di dettaglio spesso si ricorre all'utilizzo di elementi shell. Di fondamentale importanza è l'applicazione di condizioni al contorno adeguate: trattandosi di sistemi recanti estensioni nell'ordine dei chilometri, una modellazione completa renderebbe l'onere di calcolo e la costruzione digitalizzata aspetti estremamente vincolanti. Allo stesso modo, la scelta di vincoli adeguati alla connessione del sistema di tubazioni e delle strutture di supporto risulta un aspetto cruciale al fine di rendere l'analisi veritiera ed efficace (gli spostamenti delle tubazioni in direzione assiale dovranno risultare liberi, contrariamente a quelli in direzione trasversale).



Figura 30 - Modello agli elementi finiti di un piperak con annesse tubazioni

Con riferimento al caso dei gomiti possono essere individuati tre diversi livelli di danno (il livello di danno III è quello che potrebbe produrre rilascio) come mostrato in Tabella 7:

Tabella 7 - Correlazione tra tipologia di rottura, parametri di domanda e livello di danno

Tipologia di rottura	EDP	Livello di danno e intervallo corrispondente
<b>Frattura a trazione</b>	Deformazione di trazione ( $\epsilon_t$ )	$\epsilon_t \leq \epsilon_y \rightarrow 0$
		$\epsilon_y < \epsilon_t \leq 0.5\% \rightarrow I$
		$0.5\% < \epsilon_t < \epsilon_{tu} \rightarrow II$
		$\epsilon_t \geq \epsilon_{tu} \rightarrow III$
<b>Buckling locale</b>	Deformazione di compressione ( $\epsilon_c$ )	$\epsilon_c \leq \epsilon_y \rightarrow 0$
		$\epsilon_y < \epsilon_c \leq \epsilon_{cl} \rightarrow I$
		$\epsilon_{cl} < \epsilon_c \leq 5\epsilon_{cl} \rightarrow II$
		$\epsilon_c > 5\epsilon_{cl} \rightarrow III$
<b>Rottura a fatica con basso numero di cicli</b>	Fattore di danno $D = \sum (n_i / N_i)$	$D < 0.5 \rightarrow 0$
		$0.5 \leq D < 0.8 \rightarrow I$
		$0.8 \leq D < 1 \rightarrow II$
		$D \geq 1 \rightarrow III$

### 5.3 Valutazione delle curve di fragilità delle apparecchiature critiche

L'obiettivo di questa sezione è quello di individuare metodologie e modelli per la costruzione di curve di fragilità utili all'analisi quantitativa del rischio sismico delle apparecchiature e di conseguenza dell'intero impianto.

#### 5.3.1 Approccio metodologico all'analisi di fragilità

L'impiego di database dedicati rappresenta una delle principali strategie per la definizione delle curve di fragilità negli impianti industriali. Tali database raccolgono osservazioni sperimentali e informazioni sugli stati di danno rilevati a seguito di eventi sismici reali, consentendo di costruire modelli statistici in grado di descrivere la probabilità di danneggiamento delle apparecchiature in funzione dell'intensità sismica. Questo approccio empirico permette di superare, almeno in parte, le difficoltà connesse alla modellazione numerica di componenti industriali particolarmente complessi, per i quali la valutazione diretta del comportamento strutturale può risultare onerosa o affetta da incertezze. Sebbene spesso incompleti o eterogenei, tali database forniscono comunque una base di dati realistica e affidabile, soprattutto per analisi su ampia scala o finalizzate alla pianificazione del rischio sismico. Un esempio riconosciuto a livello internazionale è il database "HA-ZUS", che include curve di fragilità per diverse tipologie di strutture e apparecchiature industriali, sviluppate attraverso una combinazione di dati empirici e modelli numerici.

In alternativa, esiste un ulteriore approccio di carattere maggiormente qualitativo incentrato sul giudizio esperto; tuttavia, l'evidente dipendenza del risultato da un parere soggettivo (e non oggettivo) comporta un'ampia variabilità dei risultati e dunque una difficile applicabilità in casi specifici, se non in larga scala.

Il tipo di analisi che coniuga vantaggi computazionali e affidabilità va sotto il nome di analisi probabilistica della vulnerabilità sismica, meglio nota come "Probabilistic Seismic Demand Analysis" ("PSDA"). Nello studio di [BdLPR-018], è stata applicata una tipologia di "PSDA" detta "Cloud Analysis" ([CJ-002]) ritenuta particolarmente adeguata a trattare modelli agli elementi finiti molto onerosi dal punto di vista computazionale. Si tratta di un metodo basato sull'utilizzo di accelerogrammi naturali non scalati e su due ipotesi fondamentali:

- Si assume che la risposta del sistema (espressa in termini di spostamenti, sollecitazioni, deformazioni - "d<sub>i</sub>") abbia una distribuzione lognormale;
- La risposta attesa è linearmente proporzionale ad IM in uno spazio logaritmico:

$$D_m = a(IM)^b \tag{11}$$

dove "a" e "b" sono i coefficienti della regressione lineare stimati tramite il metodo dei minimi quadrati. Questi stessi consentono poi di definire i parametri del modello probabilistico che descrive la risposta sismica del sistema oggetto di studio; la formulazione analitica viene di seguito proposta:

$$\beta_{(d|IM)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{[\ln(d_i) - \ln(a(IM)^b_i)]^2}{n - 2}} \tag{12}$$

dove “ $d_i$ ” è la risposta massima all’accelerogramma “ $i$ ”. A questo punto è possibile definire la probabilità che la risposta (“EDP”) superi lo stato limite (“LS”), dove “ $LS_m$ ” è il valore medio dello stesso stato limite di riferimento e “ $\beta_{LS}$ ” è la sua dispersione ():

$$P[D_{EDP} > LS|IM] = 1 - \Phi \left( \frac{\ln(LS_m) - \ln(D_m)}{\sqrt{\beta^2(d|IM) + \beta^2_{LS}}} \right) \quad (13)$$

### 5.3.1.1 Applicazione al caso dei serbatoi

Il coinvolgimento degli impianti da parte degli eventi tellurici ha dimostrato come i serbatoi di stoccaggio, oltre ad essere una delle classi di apparecchiature più vulnerabili, rappresentino in molti casi anche il punto di partenza di escalation ed effetti domino (per via della natura delle conseguenze cui questi vanno incontro) quali perdita di contenimento, incendi ed esplosioni. Per questo motivo, viene illustrata, a titolo di esempio, l’applicazione della Cloud Analysis per il calcolo della vulnerabilità sismica di questa categoria di apparecchiature [PPA-016].

Il caso studio consiste in un serbatoio cilindrico non ancorato a terra e utilizzato per lo stoccaggio di petrolio con diametro di 54,8 m, un’altezza di 15,6 m e uno spessore variabile tra 8 mm (in sommità) e 33 mm (in prossimità del fondo). Il modello utilizzato per le simulazioni (Figura 29) è composto da due oscillatori responsabili di simulare il moto convettivo e impulsivo del liquido e una molla rotazionale posta alla base (il cui comportamento viene prima calibrato mediante modellazione a elementi shell - Figura 31, [VK-015]), attraverso la quale è possibile simulare il fenomeno dell’“uplifting” (sollevamento da terra).

Gli stati limite di riferimento, utilizzati nell’analisi di fragilità, sono entrambi legati al sollevamento dell’apparecchiatura: instabilità laterale del mantello per eccessive tensioni meridionali e rottura (per plasticizzazione) della piastra di base. Si tratta di fenomeni valutati analiticamente attraverso quanto esplicitato nella normativa Europea “EN 1998-4”.

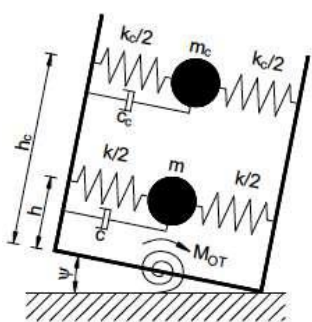


Figura 31 - Modello analitico adottato

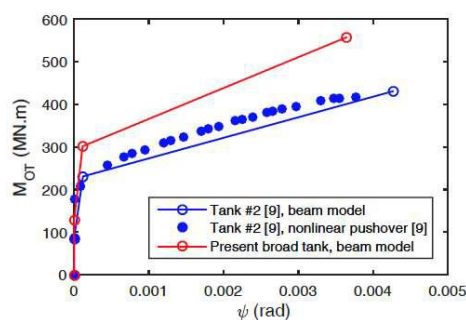


Figura 32 –Legame costitutivo per la molla di fondazione

Ponendo il focus sulle caratteristiche del caso studio, il terreno è di tipo rigido e caratterizzato da una velocità  $V_{s,30}$  compresa tra 360 e 760 m/s, dunque classificato, secondo l’Eurocodice 8, come suolo di Tipo B. Per le analisi sono stati selezionati 20 accelerogrammi dal “Pacific Earthquake Engineering Research Centre” (PEER), osservabili in Figura 32 sotto forma dei corrispondenti spettri di risposta. Questi definiscono la forzante agente sul modello a masse concentrate e, come step successivo, consentiranno

di derivare un valore di intensità (“IM”, §2.2.1) necessario all’analisi di fragilità. Più in particolare, sono stati selezionati come “IM” le accelerazioni spettrali corrispondenti al periodo impulsivo del serbatoio (“ $S_a(T_i)$ ”), mentre, come parametro di risposta strutturale (“EDP”), la tensione meridionale nella parete del serbatoio (associata al bucklig - Figura 33 (b)) e la rotazione della piastra di base (Figura 33 (a)).

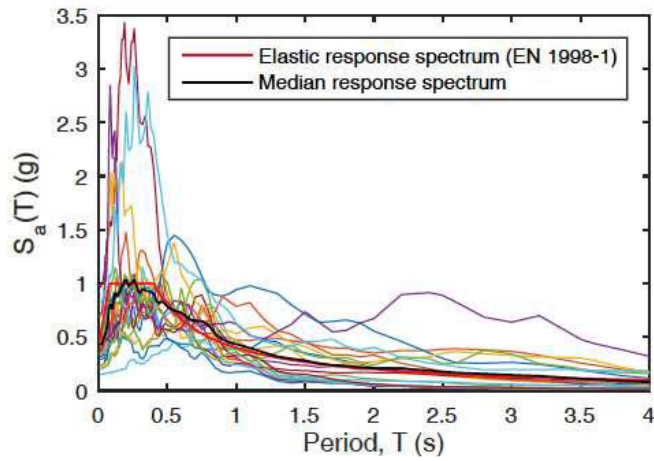


Figura 33 - Spettri di risposta adottati per l’analisi

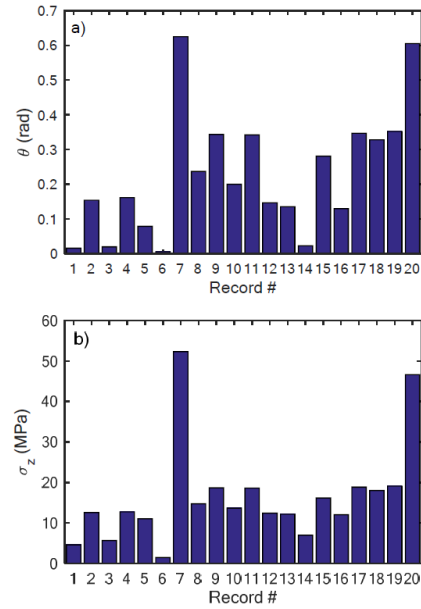


Figura 34 – Risposta del serbatoio in termini di rotazione della base (a) e tensioni meridionali (b)

Derivati quindi dall’analisi dinamica “IM” ed “EDP”, sono stati selezionati come soglie di danno (“LS”), un angolo di rotazione pari a 0,2 e una tensione meridionale di 89,5 Mpa (entrambi ottenuti facendo riferimento a quanto contenuto nell’Eurocodice 8 parte 4), così da poter poi applicare l’iter descritto nel §5.3.1 volto alla costruzione delle curve di fragilità mediante Cloud Analysis (Figura 34). I risultati di quest’ultima (Figura 35) mostrano come, per un’intensità sismica di 0,6 g la probabilità di danno della piastra di base risulti pari al 20%, mentre supera l’80% per accelerazioni spettrali di 1 g. Nel caso dell’instabilità, è possibile osservare che un elevato carico sismico si ha per valori di IM superiori a 2,5 g.

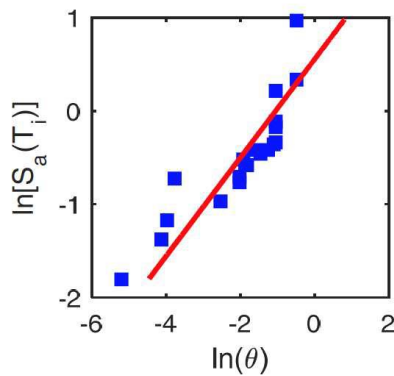


Figura 35 - Regressione lineare associata alla Cloud Analysis

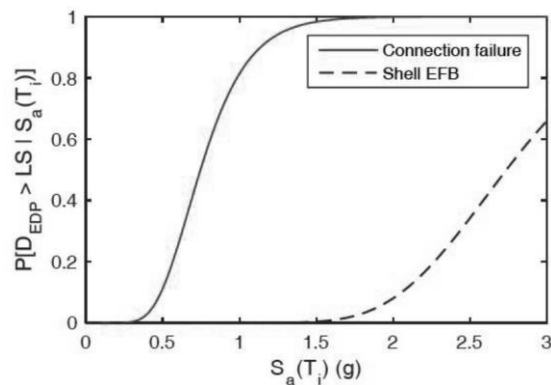


Figura 36 - Curve di fragilità ottenute a valle dell’analisi del caso studio

## 6 Nuove tecnologie per la protezione degli impianti PIR in zona sismica

L'iter metodologico per la valutazione del rischio sismico negli stabilimenti industriali soggetti al "D.lgs.105/2015" non si limita alla mera identificazione delle criticità strutturali e non strutturali, ma è finalizzato anche alla definizione delle misure di prevenzione e mitigazione più adeguate.

Tra le soluzioni maggiormente avanzate rientrano le tecnologie "SMART" (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology, [MBC-024], [MC-022]), ovvero sistemi innovativi basati su sensori, attuatori e dispositivi di protezione antisismica, sviluppati con l'obiettivo primario di ridurre il rischio di incidente rilevante e le conseguenze associate agli eventi NaTech. Tali sistemi prevedono l'impiego di tecnologie di monitoraggio e controllo dedicate, in grado, tra i vari impieghi, di individuare tempestivamente eventuali rilasci di sostanze pericolose e di attivare misure atte a contenerne gli effetti. In tale contesto, i sensori attualmente disponibili sul mercato e impiegabili efficacemente negli impianti industriali possono essere classificati nelle seguenti categorie:

- Sensori per la misura delle deformazioni;
- Sensori per la misura delle accelerazioni;
- Sensori per la misura della temperatura;
- Sensori per il rilevamento di rilascio di sostanze;
- Dispositivi "UAS" per la gestione delle emergenze.

### 6.1 Sensori per la misura delle deformazioni

Il primo gruppo comprende sensori tradizionali, progettati per misurare (anche in tempo reale) la deformazione locale in punti specifici della struttura. Si tratta principalmente di dispositivi di tipo resistivo, caratterizzati da un'elevata sensibilità di misura, ma che richiedono un posizionamento mirato nelle zone dove si prevede lo sviluppo delle massime deformazioni: ciò implica la necessità di una preventiva analisi della risposta sismica dell'impianto.

A questa categoria appartengono gli strain gauges, i potenziometri lineari classici o a filo (trasduttori di estensione), nonché gli inclinometri lineari. Si tratta di strumenti che richiedono in genere un sistema di acquisizione dati permanente in situ, in grado di registrare continuamente le variazioni misurate.

- Gli strain gauges (Figura 37) vengono comunemente installati in corrispondenza di punti critici dell'impianto, come gomiti di tubazioni o pareti di serbatoi, dove è plausibile la presenza di elevate concentrazioni di tensione. I valori di deformazione riportati in letteratura (ad esempio [VKKS-015]) possono essere utilizzati come soglia di attivazione di sistemi automatici di mitigazione, quali la chiusura di una valvola di sicurezza (shutdown valve, Figura 37).



Figura 37 – Strain gauges installati su tubazioni



Figura 38 – Shutdown Valve

- I potenziometri lineari (Figura 38), inclusi quelli a filo, permettono invece il monitoraggio a distanza della posizione relativa tra due punti distanti, soprattutto se integrati con sistemi di trasmissione wireless.
- Gli inclinometri lineari (Figura 39) restituiscono un valore di angolo di inclinazione e possono essere impiegati per rilevare rotazioni e spostamenti differenziali. Nel caso di giunti flangiati, ad esempio, l'utilizzo combinato di sensori consente di misurare sia l'estensione assiale sia la rotazione relativa tra le flange.



Figura 39 – Potenziometro lineare wireless



Figura 40 – Inclinometro lineare wireless

## 6.2 Sensori per la misura delle accelerazioni

Un'ulteriore categoria di sensori comprende quelli destinati alla misura delle accelerazioni, oggi sempre più utilizzati nei sistemi di protezione automatica contro i rilasci di sostanze pericolose, tramite l'attivazione di valvole automatiche di sicurezza (Figura 37). In commercio sono disponibili accelerometri in grado di rilevare le onde P dei terremoti, così da permettere l'attivazione dei sistemi di sicurezza prima dell'arrivo delle onde S [LL-008]. Si tratta di dispositivi che possono essere integrati in sistemi di early warning sismico, anche se presentano alcune criticità (ancora oggetto di studio) quali la gestione del tempo di allerta e la riduzione dei falsi allarmi (il cui impatto può comportare notevoli perdite economiche nei settori produttivi [SBS-015]). Per tali motivi, la diffusione del loro impiego nell'industria di processo risulta ad oggi ancora limitato.

Lo sviluppo della tecnologia "MEMS" ("Micro-Electro-Mechanical Systems") ha determinato una significativa riduzione dei costi e delle dimensioni di questi sensori, consentendo la produzione di accelerometri miniaturizzati integrati in un unico chip (Figura 40). Tale evoluzione ha inoltre favorito la diffusione di dispositivi wireless, impiegabili all'interno di reti "RFID" ("Radio Frequency Identification Tag") per il monitoraggio distribuito in impianti industriali [PZTABSU-011].

In Figura 41 e Figura 42 è riportato un esempio di sensore "MEMS" wireless per la misura delle deformazioni, caratterizzato da consumi estremamente ridotti e una durata operativa delle batterie superiore ai 10 anni, senza necessità di manutenzione.



Figura 41 – Accelerometro MEMS [MCP-017]



Figura 42 - MEMS strain gauge (nodo ricevitore)

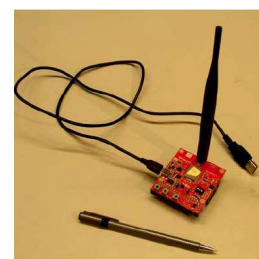


Figura 43 - MEMS stazione ricevente

### 6.3 Sensori per la misura della temperatura

Una tipologia alternativa e ampiamente utilizzata nell'industria chimica per l'individuazione dei rilasci di sostanze pericolose è quella che permette la misura di variazioni di temperatura, associate ai rilasci di sostanze. A tale famiglia di sensori appartengono le fibre ottiche, che sono state spesso utilizzate per l'identificazione dei rilasci di sostanze pericolose nelle tubazioni di raffinerie o in pipelines per il trasporto del gas e dell'olio (Figura 43 [IW-013]). Trattandosi di sistemi di natura continua non è necessario determinare in anticipo una specifica posizione, ma è sufficiente installarli lungo l'intera linea da monitorare.

Il costo delle fibre ottiche è piuttosto limitato, contrariamente invece a quello dell'acquisitore.



Figura 44 - Fibre ottiche applicate su di un gomito per l'identificazione di possibili rilasci di sostanze

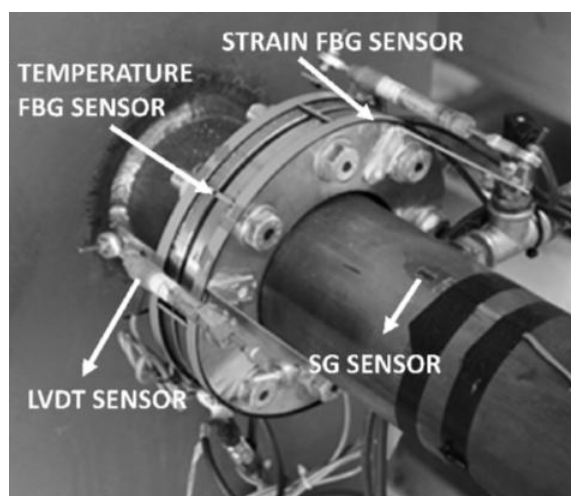


Figura 45 - Fibre ottiche per il leakage detection in un'unione [PQNVMC-021]

### 6.4 Sensori per il rilevamento di rilascio di sostanze

Un'ulteriore categoria di dispositivi impiegati per la sicurezza degli impianti è rappresentata dai sensori per il rilevamento del rilascio di sostanze pericolose, comunemente definiti "nasi elettronici". A differenza dei sistemi basati sul monitoraggio della deformazione o della temperatura, questi sensori misurano direttamente la concentrazione di specifiche sostanze presenti nell'aria, rilevando il superamento di soglie predefinite. Un esempio è costituito dalla linea di sensori "Gas Discharge Analyzer" ("GDA", Figura 45, <https://airsense.com/en/products/gda-explosives>), in grado di individuare in tempo reale e direttamente in sito la presenza e la concentrazione di composti volatili tossici e agenti chimici non convenzionali, supportando una rapida valutazione del rischio associato all'evento [RBW-008].

Accanto a tali tecnologie, si stanno diffondendo sul mercato sensori basati sulla tecnica di emissione acustica ("AET"), metodologia riconosciuta nell'ambito dei controlli non distruttivi. La stessa "AET" è in grado di identificare e localizzare rotture o microfessurazioni in componenti soggetti a sollecitazioni meccaniche, consentendo un'efficace attività di diagnosi preventiva.

Questa tecnologia può essere inoltre integrata con sistemi di remote sensing mediante trasmissione

wireless, rendendo possibile l'installazione anche in aree di difficile accesso. In ambito industriale, tali sensori trovano applicazione nel monitoraggio dei giunti e, in particolare, nei gomiti delle tubazioni, dove è maggiore la probabilità di innesco di fenomeni di danneggiamento strutturale.



Figura 46 - Sensore “GDA F” per il rilevamento del rilascio di sostanze

## 6.5 Dispositivi UAS per la gestione delle emergenze

L'impiego di sistemi aerei senza pilota (“UAS” - “Unmanned Aerial Systems”) rappresenta una soluzione altamente promettente per il monitoraggio e la gestione degli incidenti rilevanti in presenza di rilasci di sostanze pericolose. La possibilità di effettuare analisi multispettrali da remoto consente infatti di raccogliere informazioni accurate e georeferenziate sullo stato dell'impianto e sull'evoluzione dell'evento in corso. In particolare, l'utilizzo di termocamere permette, ad esempio, di seguire in continuo la propagazione di un incendio, analizzandone il moto nel tempo e consentendo quindi di prevedere l'evoluzione e di definire rapidamente interventi di contenimento. Analogamente, durante incidenti che coinvolgono apparecchiature industriali, il monitoraggio aereo può supportare l'analisi degli effetti domino tra attrezzature vicine, individuando le parti potenzialmente soggette a surriscaldamento e permettendo l'attivazione preventiva di misure di protezione (es. sistemi di raffreddamento localizzati).

La dotazione sensoriale dei droni può essere ampliata includendo rilevatori di gas, utili a identificare la concentrazione puntuale di una data sostanza pericolosa e, attraverso la georeferenziazione GPS dei dispositivi, la ricostruzione dello sviluppo della stessa nel tempo e nello spazio:

- nel caso di rilasci continui, è possibile generare mappe di dispersione e individuare l'area sorgente, anche mediante algoritmi dedicati;
- nel caso di rilasci istantanei, si può invece stimare la direzione di propagazione del picco di concentrazione e la sua evoluzione temporale.

L'integrazione dei dati in tempo reale con la stazione di controllo a terra permette l'avvio immediato di azioni mirate a mitigare gli effetti dell'evento, riducendo drasticamente l'esposizione degli

operatori a rischi diretti. L'utilizzo dei droni elimina infatti la necessità di inviare personale in aree potenzialmente contaminate o difficilmente accessibili, dove l'errata interpretazione delle soglie di pericolo potrebbe comportare gravi danni agli addetti.

La gestione strutturata di un incidente NaTech può prevedere l'utilizzo coordinato di diversi droni in sequenza al fine di gestire una fase di primo screening con l'obiettivo di fornire una valutazione visiva preliminare in tempo reale (Figura 46). Oppure una fase di analisi di dettaglio attraverso sia droni per spazi confinati (dotati di struttura antiurto e resistenza a collisioni, stabilizzazione senza GPS, streaming video visibile e termico, illuminazione integrata, possibilità di montare sensori di rilevamento perdite - Figura 47), che droni per aree aperte ma complesse (i cui punti di forza sono invece autonomia di volo prolungata, rilevamento ostacoli, monitoraggio multispettrale ad alta risoluzione della totalità del sito).



Figura 47 – Mini drone impiegato per la fase di screening



Figura 48 - Drone resistente alle collisioni

In virtù di quanto appena riportato, l'approccio "UAS" risulta quindi particolarmente vantaggioso grazie ai numerosi punti di forza: elimina il rischio diretto per gli operatori, garantisce una maggiore tempestività nel riconoscimento del rilascio, consente il monitoraggio continuo anche in condizioni critiche, permette di individuare rapidamente le aree maggiormente compromesse e assicura un supporto immediato alle misure di mitigazione e contenimento.

## 6.6 Analisi di applicabilità

Al fine di identificare le possibili applicazioni di sensori, sono stati determinati gli stati di danno sismico più frequenti e in grado di generare il rilascio di materiali pericolosi.

Nel caso dei serbatoi non ancorati, ad esempio, un potenziale meccanismo di rilascio si manifesta in corrispondenza della connessione tra serbatoio e tubazione (§5.2.2). L'utilizzo di sensori di spostamento, come trasduttori di estensione, posizionati tra la connessione tubo-serbatoio e il terreno (punti A e B Figura 48), consentirebbe l'individuazione di eventuali rotazioni o spostamenti oltre soglia e, qualora necessario, l'attivazione di eventuali valvole di sicurezza. Inoltre, l'impiego di inclinometri lineari installati in prossimità del giunto (punto C, Figura 48) permetterebbe di controllare la rotazione relativa del sistema serbatoio-tubazione, identificando condizioni critiche che potrebbero condurre alla rottura della giunzione.

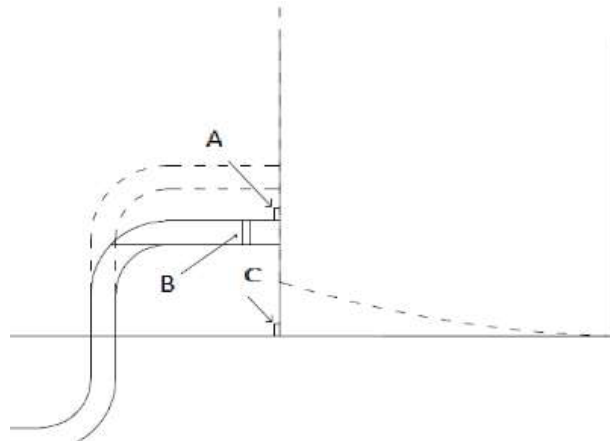


Figura 49 - Posizionamento sensori per il monitoraggio dei serbatoi non ancorati

Un'altra apparecchiatura ampiamente diffusa negli impianti di processo è la colonna di distillazione/separazione. Le osservazioni sui danni riscontrati a seguito di terremoti hanno evidenziato una particolare vulnerabilità delle connessioni tra la colonna e le tubazioni poste lungo il mantello, nonché di quella sommitale. Quindi l'installazione di inclinometri lineari wireless (punti A, B e C Figura 49) permetterebbe il monitoraggio della rotazione all'altezza delle stesse connessioni anche in zone difficilmente accessibili, attivando la chiusura delle valvole qualora necessario. Logiche analoghe si applicano ai serbatoi verticali o separatori (Figura 50) e ai serbatoi orizzontali (Figura 51).

In generale, il controllo degli spostamenti e delle rotazioni consentirebbe l'attivazione di interventi di shutdown prima del collasso strutturale, limitando la fuoriuscita di sostanze pericolose.

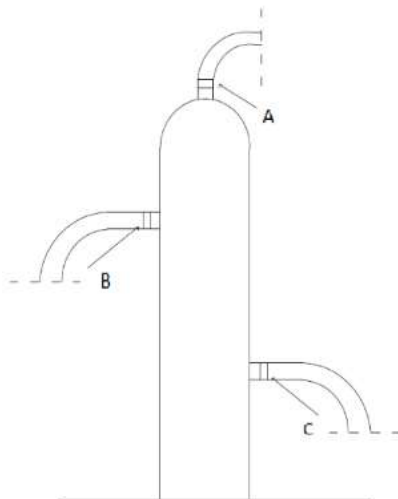


Figura 50 - Posizionamento dei sensori per il monitoraggio delle colonne

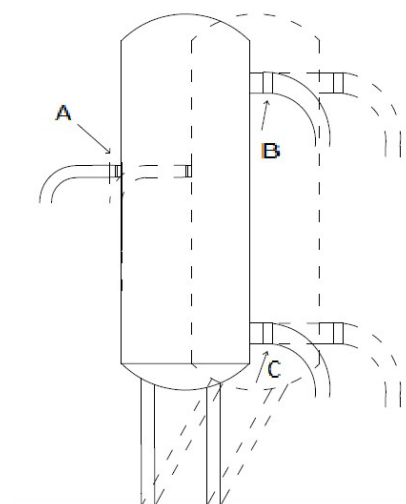


Figura 51 - Posizione dei sensori di monitoraggio per serbatoi verticali

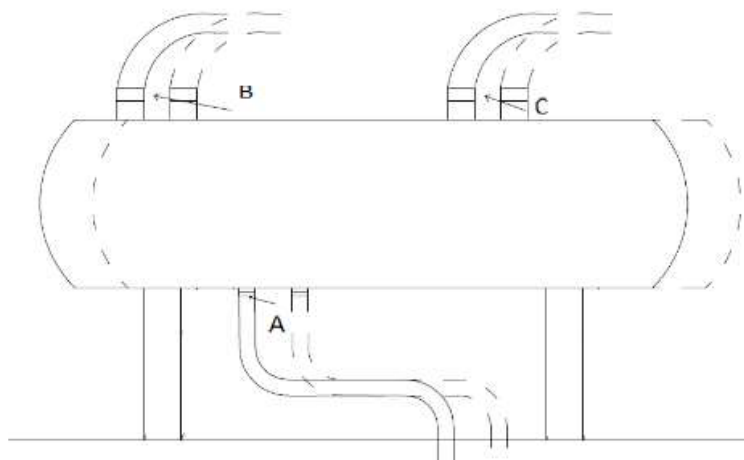


Figura 52 - Posizione dei sensori di monitoraggio per serbatoi orizzontali

Quanto esposto evidenzia come l'impiego di sensori "SMART" possa rappresentare una risorsa preziosa per ridurre le conseguenze del rilascio di materiali pericolosi. Il monitoraggio locale dei punti più sensibili consente infatti l'attivazione automatizzata di misure di sicurezza, limitando gli effetti domino e la propagazione del danno. L'integrazione con interventi di riduzione della vulnerabilità rende questa soluzione semplice ma efficace nella prevenzione di incidenti rilevanti in caso di sisma.

Una sintesi delle applicazioni possibili è riportata nella Tabella 8.

Per quanto riguarda i sistemi aerei a pilotaggio remoto ("UAS"), vengono di seguito proposte le principali applicazioni alla gestione dell'emergenza in caso di Incidenti NaTech:

- La ricerca di persone e animali tra le macerie può essere effettuata tramite telecamere nello spettro visibile e termico. Le immagini acquisite vengono trasmesse in tempo reale all'operatore e analizzate tramite algoritmi di georeferenziazione, che assegnano coordinate GPS ai potenziali obiettivi. La termografia consente di identificare anomalie termiche riconducibili a esseri viventi e di mappare in sicurezza le aree danneggiate.
- Per il monitoraggio di esplosioni e incendi, il payload è caratterizzato dalla combinazione di telecamera termica e visibile. I dati registrati e trasmessi all'operatore permettono di valutare l'evoluzione dell'evento, stimare i tempi di collasso delle apparecchiature coinvolte in base alla temperatura rilevata e identificare possibili effetti domino attraverso sovrapposizione georeferenzata con la mappa impiantistica.
- Infine, per il rilascio di sostanze tossiche/infiammabili, il sistema "UAS" può avvicinarsi ai punti critici in quanto dotato di telecamera, termocamera e rilevatori di gas/nasi elettronici, fornendo informazioni tempestive sulla natura e concentrazione delle sostanze disperse, anche in caso di scarsa visibilità della nube. I dati vengono trasmessi alla stazione di controllo per consentire una risposta rapida e mirata.

Tabella 8 - Correlazione tra tipologia di sensore e apparecchiature in funzione della grandezza da monitorare

Categoria strutturale	Apparecchiatura	Sensori	Posizionamento	Grandezza monitorata	Azione conseguente
Recipienti snelli poggiati sulla fondazione	Colonne	Trasduttori di spostamento e/o inclinometri wireless	Giunti flangiati colonna-tubazioni; tirafondi/fondazione	Rotazione e spostamento assiale/relativo tra flange; rotazione della base	Chiusura automatica delle valvole a monte/valle del giunto
		Strain gauges o fibre ottiche	Gomiti delle tubazioni	Deformazione locale	Chiusura automatica valvole
Recipienti snelli poggiati sulla fondazione	Serbatoi orizzontali e separatori	Trasduttori di spostamento e inclinometri wireless	Giunti flangiati serbatoio-tubazioni; piastre di base	Spostamento e rotazione relativi serbatoio-tubazioni; rotazione della sella	Attivazione valvole di chiusura
		Strain gauges o fibre ottiche	Gomiti delle tubazioni	Deformazione locale	Attivazione valvole
Apparecchiature tozze poggiate sulla fondazione	Grandi serbatoi atmosferici non ancorati	Trasduttori di spostamento e inclinometri wireless	Giunti flangiati serbatoio-tubazioni; piastra di base	Scorrimenti orizzontali e verticali; rotazioni della base	Chiusura valvole e sistemi di sicurezza
		Strain gauges wireless o fibre ottiche	Gomiti delle tubazioni	Deformazione locale	Attivazione valvole
Apparecchiature su struttura di supporto	Serbatoi sopraelevati/separatori verticali	Trasduttori di spostamento wireless	Base del serbatoio	Spostamento relativo serbatoio-supporto	Attivazione valvole
	Scambiatori	Trasduttori di spostamento e inclinometri wireless	Giunti flangiati scambiatore-tubazioni	Rotazione e spostamento assiale relativi	Attivazione valvole
Tubazioni e strutture di sostegno	Tubazioni	Strain gauges o fibre ottiche; trasduttori di spostamento e inclinometri wireless	Gomiti e giunti flangiati	Deformazione; rotazione; scorrimento assiale	Chiusura valvole e limitazione rilascio
	Rack in acciaio	Trasduttori di spostamento wireless	Piani di appoggio dei tubi	Spostamento relativo di piano	Isolamento area e chiusura valvole

## 7 Analisi quantitativa del rischio negli stabilimenti in presenza di sisma

Il ruolo di questo capitolo è quello di mettere insieme tutte le nozioni trattate e conferire anche una connotazione operativa al presente lavoro, raccogliendo l'eredità di decenni di ricerca in un formato che seppur collaudato risulta ancora oggi oggetto di sperimentazioni e analisi.

Negli ultimi tempi l'attenzione verso il tema del rischio sismico negli impianti è cresciuta notevolmente rispetto al passato, come testimoniato dal finanziamento di progetti di ricerca internazionale dedicati, come [LE-004], [TPGM-016], [KBRPVH-013], [BR-018a], [BR-018b], oltre agli innumerevoli tentativi di approcci ideati nel tempo volti alla valutazione quantitativa del rischio sismico ("Quantitative seismic Risk analysis" - "QsRA") negli impianti PIR presenti nella letteratura accademica.

I primi contributi metodologici alla valutazione del rischio sismico negli impianti di processo si devono a [KONS-985], che hanno sviluppato un modello completo di analisi del rischio basato su un approccio di affidabilità strutturale, focalizzato sulla perdita di funzionalità degli impianti a seguito di un terremoto. Tale approccio, tuttavia, trascurava gli effetti di propagazione del danno e la molteplicità degli scenari possibili (aspetti di fondamentale importanza per una valutazio-

ne sismica). Successivamente, [SETR-996] si sono concentrati sulle conseguenze del rilascio di sostanze chimiche tossiche indotto da eventi sismici su un'ampia area territoriale in California, considerando più impianti (il limite principale del loro lavoro risiede nell'adozione di modelli di processo fortemente semplificati).

[GK-013] hanno sviluppato il software "RAPID-N", che consente uno screening rapido e unificato dei pericoli Natech, inclusi i terremoti. Lo strumento permette di rappresentare l'area di impatto del rilascio di sostanze pericolose, ma non considera gli effetti di propagazione del danno. Nello stesso ambito, [BMCR-011] hanno proposto una procedura semplificata basata sul calcolo di indicatori di rischio NaTech, utile per classificare rapidamente le apparecchiature critiche prima di un'analisi "QsRA" ("Quantitative seismic Risk Assessment") più dettagliata. Tale metodologia è stata successivamente estesa da [MBR-015] anche alla valutazione della vulnerabilità territoriale.

I primi approcci di QsRA sono stati sviluppati per specifiche tipologie di apparecchiature, in particolare serbatoi di stoccaggio: [SACF-009] hanno determinato curve di fragilità per serbatoi atmosferici, estendendo poi la metodologia alla stima delle conseguenze e alla propagazione del danno [FIOS-005]. L'integrazione di sistemi di allerta precoce è stata successivamente proposta in [SACF-009].

Un primo tentativo di formalizzare una procedura generalizzabile, in grado di includere sistematicamente categorie di apparecchiature distinte e scenari incidentali, secondo tutti i passaggi della QsRA, si trova in [ASC-007] e [CCGS-008], con ulteriori perfezionamenti in [CALTBS-014]. In tali studi gli scenari incidentali considerano combinazioni di apparecchiature danneggiate in modo indipendente dall'evento sismico, includendo la propagazione del danno, sebbene limitata ai soli scenari di secondo livello.

Inoltre, è grazie al contributo di [SACF-009] e [FIOS-005] che la stima "Loss of Containment" è stata definita attraverso una correlazione deterministica tra stati di danno e condizioni di rilascio. Più recentemente, [SH-014] hanno proposto un metodo di analisi sismica probabilistica basato su curve di fragilità combinate con campionamento ottenuto mediante simulazione Monte Carlo, focalizzandosi tuttavia esclusivamente sulla risposta strutturale delle apparecchiature, senza considerare i fenomeni di escalation.

Tentativi di integrare in modo più completo propagazione e incertezza si ritrovano in [Ca-016] e [CV-017], dove vengono analizzati tutti gli scenari di danno iniziale e le relative catene incidentali, fino al loro esaurimento (le catene stesse non sono trattate singolarmente, ma viene stimata la distribuzione complessiva delle perdite attese).

L'utilizzo della simulazione Monte Carlo, in tale contesto specifico, ha permesso di generare campioni di possibili catene incidentali a partire da specifici danni sismici, con formulazione casuale di LOC e propagazione degli effetti [ACCGPP-018]. In parallelo, l'impiego di tecniche di machine learning ha aperto nuove prospettive nella modellazione del rischio sismico, consentendo di gestire in modo efficiente grandi quantità di dati e di individuare correlazioni non lineari tra parametri di vulnerabilità, intensità sismica e probabilità di guasto. Questi approcci data-driven, sviluppati in anni recenti [QPFB-025], rappresentano un'evoluzione significativa rispetto ai metodi tradizionali, poiché permettono di aggiornare dinamicamente le curve di fragilità e di adattare i modelli previsionali alle caratteristiche specifiche dei siti e delle apparecchiature.

Di rilevante importanza, negli ultimi anni, sono anche i contributi di [SDC-022], [AMSC-022] e [KCCP-024], che hanno ulteriormente consolidato l'approccio probabilistico alla valutazione del rischio sismico negli impianti di processo. In [SDC-022] è stato analizzato un serbatoio cilindrico con tetto galleggiante, installato in un impianto con pericolo di incidente rilevante, con l'obiettivo

di valutare la risposta dinamica e la probabilità di perdita di contenimento al variare dell'intensità sismica. Lo studio, basato su un modello FEM non lineare, ha evidenziato come la combinazione tra oscillazione del fluido e deformabilità del tetto possa amplificare significativamente gli effetti dinamici, introducendo nuovi indicatori di vulnerabilità specifici per tale tipologia di apparecchiatura. Il lavoro di [AMSC-022] ha invece esteso la prospettiva della QsRA alle reti di condotte e tubazioni, sviluppando una metodologia per la stima delle frequenze di guasto dovute a eventi sismici. Attraverso un'analisi integrata di dati storici, parametri geotecnici e simulazioni numeriche, gli autori hanno quantificato la probabilità di rottura in funzione della magnitudo e della distanza epicentrale, fornendo relazioni empiriche utili alla costruzione di curve di fragilità specifiche per le pipelines. Tale approccio rappresenta un importante passo avanti verso la valutazione sistemica del rischio NaTech, poiché consente di includere le interconnessioni tra componenti distribuiti e scenari di rilascio multiplo. Infine, [KCCP-024] ha introdotto un framework probabilistico per la stima della resilienza sismica degli impianti di processo, combinando le curve di fragilità con funzioni di ripristino e indicatori di prestazione temporale. La metodologia proposta, che integra la propagazione del danno e il tempo di recupero operativo, fornisce un criterio quantitativo per la valutazione complessiva della capacità dell'impianto di resistere e recuperare dopo un evento sismico. Questo approccio, orientato alla resilienza piuttosto che alla sola vulnerabilità, riflette la più recente tendenza della ricerca verso un'analisi olistica del rischio, capace di considerare non solo la probabilità di danno, ma anche la continuità funzionale e la rapidità di ripristino.

## 7.1 Valutazione del rischio sismico: approccio probabilistico

Quanto di seguito proposto si fonda sulla possibilità di effettuare una selezione preliminare delle apparecchiature sulla base di un indice di rischio sintetico in grado di integrare sia la loro vulnerabilità sismica sia la gravità delle potenziali conseguenze.

Individuate quindi le apparecchiature più critiche, si procede al calcolo della frequenza media annua dei relativi stati di danno; in questo modo, risulta possibile classificare gli scenari incidentali prioritari, sui quali concentrare le strategie di mitigazione (da attuarsi sia mediante interventi di adeguamento sismico sia mediante l'implementazione di opportuna sensoristica).

### 7.1.1 Individuazione delle apparecchiature critiche

La selezione delle apparecchiature di un impianto con pericolo di incidente rilevante ("PIR") in zona sismica dipende da molti fattori, fra cui il livello di pericolosità sismica attesa, la vulnerabilità strutturale delle apparecchiature e il livello di progettazione sismica delle stesse, gli effetti fisici riconducibili alle sostanze stoccate o trattate, il livello di esposizione e la possibilità di incombenza di effetti domino e di escalation.

Un criterio di selezione ragionevole deve necessariamente integrare tutti questi aspetti in maniera razionale, a tale scopo la letteratura internazionale fornisce almeno tre strade [CPBG-019]:

- Calcolo (preliminare) della probabilità di danno di ogni apparecchiatura e valutazione delle relative conseguenze e ricomposizione del rischio;
- Uso di schede di vulnerabilità;
- Utilizzo di metodi ad Indici.

I primi due metodi richiedono un elevato livello di informazioni che renderebbero lo screening di un gran numero di apparecchiature un processo molto oneroso, soprattutto in relazione alla reperibilità di informazioni. Per tale ragione, in questa fase, la strada più agevole è quella degli indici di rischio, i quali, coerentemente con la connotazione scientifica del termine, ripercorrono il processo di combinazione delle componenti principali del rischio: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. L'indice sintetico “ $I_R$ ”, può quindi essere espresso convenzionalmente come segue (a ciascuna apparecchiatura ne verrà assegnato uno):

$$I_R = I_V \cdot I_P \cdot I_E \quad (14)$$

L'indice di vulnerabilità sismica ( $I_V$ ), a sua volta, è funzione di molteplici fattori, quali la tipologia dell'apparecchiatura, le condizioni di manutenzione, l'eventuale presenza di fenomeni di degrado e gli stati di danno maggiormente ricorrenti in caso di sisma. L'approccio più diretto per la sua quantificazione consiste nella suddivisione delle apparecchiature in categorie strutturali e nell'associazione di ciascuna a una specifica classe di vulnerabilità, definita mediante l'impiego di curve di fragilità (§5.3.1) eventualmente presenti in letteratura (Figura 52). Poiché, ai fini dell'analisi di rischio di un impianto di processo, assumono rilevanza gli stati di danno che possono determinare una perdita di contenimento, le curve di fragilità adottate sono quelle relative allo stato di danno “extensive damage”.

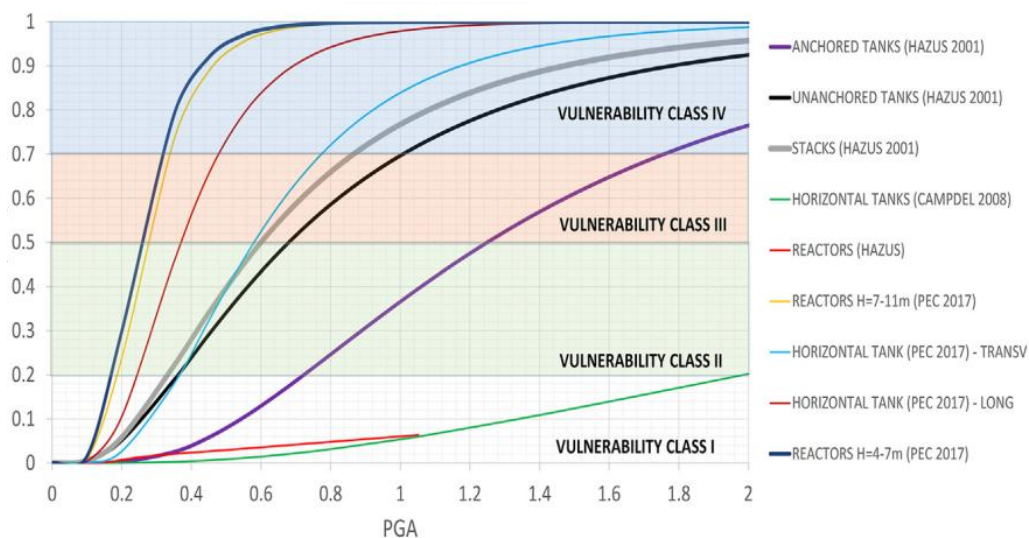


Figura 53 - Correlazione tra curve di fragilità degli asset e classi di vulnerabilità

Quindi, mediante la suddivisione del range di probabilità di danno in quattro differenti classi di vulnerabilità, è possibile associare a ogni categoria strutturale una classe di riferimento come mostrato in Tabella 10: la prima classe di vulnerabilità può essere definita da una probabilità di danno compresa tra lo 0 e il 20%, la seconda tra il 20 e il 50%, la terza tra il 50 e il 70% e la quarta tra il 70 e il 100%.

Tabella 10 - Classi di vulnerabilità delle apparecchiature

CATEGORIA STRUTTURALE	TIPOLOGIA	Classe 4	Classe 3	Classe 2	Classe 1
Apparecchiature Snelle	Colonne (Reattori)				
	Pile				
Apparecchiature Tozze Poste a Terra	Serbatoi orizzontali (Separatori, ecc.)				
	Serbatoi non ancorati				
	Serbatoi ancorati				
	Serbatoi non ancorati con tetto galleggiante				
Apparecchiature Sopraelevate	Compressori				
	Scambiatori (serv. orizzontali)				
Tubazioni e Strutture di Sostegno	Strutture di supporto				
	Tubazioni				

Poiché l'indice di pericolosità ( $I_p$ ) è una caratteristica intrinseca del sito in cui l'impianto è ubicato, il suo utilizzo risulta significativo qualora sia necessario confrontare gli effetti della pericolosità sismica (§2.2) tra differenti localizzazioni (ad esempio, nel caso di apparecchiature destinate ad essere installate in siti diversi). Proprio per questo motivo può assumere un valore compreso tra uno e il numero di zone caratterizzate da differente pericolosità in cui sorge lo stabilimento. In tutti gli altri casi, esso costituirebbe esclusivamente un fattore di scala, di cui si può ragionevolmente fare a meno.

Si rimanda al §4 del presente documento la trattazione volta alla quantificazione dell'indice di esposizione.

Sulla base di quanto espresso, la matrice di rischio (Tabella 11) può essere rappresentata come un diagramma tridimensionale (normalizzato rispetto all'indice di esposizione), in cui l'indice di rischio assume i seguenti intervalli di classificazione:

- 12  $I_p \leq I_R \leq 16 I_p$  - Rischio alto
- 9  $I_p \leq I_R \leq 12 I_p$  - Rischio medio
- 6  $I_p \leq I_R \leq 9 I_p$  - Rischio basso
- 3  $I_p \leq I_R \leq 6 I_p$  - Rischio limitato
- 3  $I_p \leq I_R \leq 1 I_p$  - Rischio assente

(il valore numerico è associato all'indice di vulnerabilità della singola apparecchiatura).

Tabella 11 - Matrice di rischio (normalizzata per l'esposizione) di apparecchiature in un impianto di processo

Indice di Rischio normalizzato I <sub>R</sub>		Indice di Vulnerabilità I <sub>V</sub>			
		1	2	3	4
1	Nessun effetto sulle altre apparecchiature	1	2	3	4
2	Effetti limitati nell'intorno dell'apparecchiatura	2	4	6	8
3	Effetti in vaste aree dell'impianto	3	6	9	12
4	Effetti fuori dall'impianto	4	8	12	16

Si tratta di una formulazione che consente di effettuare uno screening preliminare delle apparecchiature, individuando quelle a rischio medio o alto, che dovranno essere oggetto di analisi più approfondite nelle fasi successive della valutazione al fine di individuare le carenze strutturali e non strutturali che quindi potrebbero generare gravi conseguenze.

### 7.1.2 Calcolo della vulnerabilità sismica delle apparecchiature

Una volta identificate le apparecchiature con rischio medio o alto, è necessario procedere con una quantificazione più accurata della loro vulnerabilità sismica. Tale valutazione può essere condotta applicando la metodologia illustrata nelle sezioni precedenti, mediante l'impiego dei modelli proposti, tipicamente a pochi gradi di libertà con masse concentrate, oppure mediante modelli FEM in campo elastico e sviluppando le curve di fragilità relative ai diversi stati di danno potenzialmente in grado di generare ad esempio una perdita di contenimento ("LOC").

### 7.1.3 Determinazione della curva di pericolosità sismica del sito

La curva di pericolosità sismica rappresenta la relazione tra un certo valore di misura di intensità ("IM") e la corrispondente frequenza media annua di superamento ( $\lambda$ ). Si rimanda al §2.2.2 per eventuali approfondimenti circa i passaggi necessari per calcolo della stessa, nonché le caratteristiche principali.

### 7.1.4 Calcolo della frequenza annua di superamento

Il calcolo delle frequenze di superamento del danno può essere effettuato mediante l'applicazione del teorema della probabilità totale, combinando la curva di pericolosità con la curva di fragilità:

$$\lambda_{DS}(D) = P[DS > d] = \int P[D > d | IM = x] d\lambda(IM) \quad (15)$$

dove " $\lambda_{DS}$ " è la frequenza annua di superamento del danno "d", " $P[D > d | IM = x]$ " rappresenta la curva di fragilità e " $d\lambda$ " è il differenziale della curva di pericolosità sismica linearizzata. L'integrale precedente può essere ridefinito in forma chiusa come suggerito da [JC-003]:

$$\lambda_{DS}(d) = \lambda(IM_{50\%})e^{\frac{1}{2}(k\beta_{E|d})^2} \tag{16}$$

“ $\lambda(IM_{50\%})$ ” rappresenta la frequenza corrispondente al 50% di occorrenza del danno, (ricavabile dalle curve di fragilità), “k” la pendenza della curva di hazard linearizzata, “ $\beta_{E|d}$ ” la deviazione standard logaritmica della risposta (legata alla variabilità della stessa risposta strutturale dovuta all’azione sismica). Quest’ultima può essere arricchita tenendo conto anche del contributo di natura epistemica, “ $\beta_E$ ”, (legato quindi all’imprecisione del modello), così da ottenere:

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{E|d}^2 + \beta_E^2} \tag{17}$$

Dunque, la formula per il calcolo del rischio totale diventa la seguente (frequenza annua di occorrenza del danno):

$$\lambda_{DS}(d) = \lambda(IM_{50\%})e^{\frac{1}{2}(k\beta_{TOT})^2} \tag{18}$$

Di seguito viene proposto un approccio grafico esemplificativo circa l’ottenimento di “ $\lambda(IM_{50\%})$ ” a partire dalla considerazione di curva di fragilità e di pericolosità: dalla curva di fragilità (Figura 54) si seleziona il valore di intensità corrispondente ad una probabilità del 50%; la medesima misura di intensità (“IM”) verrà utilizzata per identificare sulla curva di pericolosità sismica linearizzata (Figura 55) il tasso annuo di danno (che sarà proprio “ $\lambda(IM_{50\%})$ ”).

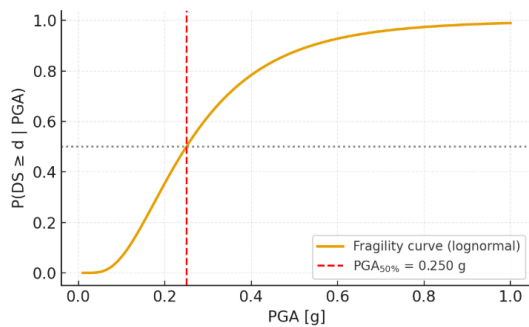


Figura 54 – Curva di fragilità recante l’identificazione della PGA

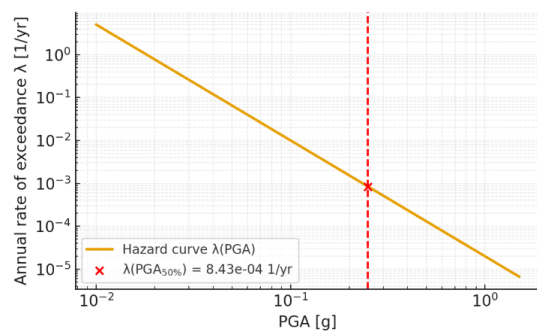


Figura 55 – Curva di pericolosità sismica recante l’identificazione del tasso di danno per la  $PGA_{50\%}$

Quindi una volta nota la frequenza dei diversi scenari (dettati dalla costruzione delle curve di fragilità e di pericolosità), è possibile valutare il livello di rischio facendo riferimento sia a delle classi di probabilità (per mezzo dell’Indice di Classe di Probabilità - “PI”, correlato proprio alla frequenza annua di occorrenza del danno), e sia ad un Indice di Conseguenza (“CI”):

Tabella 12 - Classi di Probabilità

Range di probabilità	Descrizione	PI
$p < 10^{-6}$	Raro	1
$10^{-6} \leq p < 10^{-4}$	Piuttosto improbabile	2
$10^{-4} \leq p < 10^{-3}$	Improbabile	3
$10^{-3} \leq p < 10^{-1}$	Abbastanza improbabile	4
$p \geq 10^{-1}$	Possibile	5

Tabella 13 - Correlazione tra soglie di danno e indice di conseguenza

Categoria di danno	Radiazione termica stazionaria	Incendio	Esplosione (UCVE)	Rilascio tossico	CI
Elevata letalità e danni strutturali	12.5 kW/m <sup>2</sup>	LFL	0.3 bar	L50	5
Incipiente letalità	7.0 kW/m <sup>2</sup>	1/2 LFL	0.14 bar	—	4
Danno irreversibile	5.0 kW/m <sup>2</sup>	—	0.07 bar	IDLH	3
Danno reversibile	3.0 kW/m <sup>2</sup>	—	0.03 bar	—	2

Come è possibile osservare da quanto mostrato in Tabella 13, l'indice di conseguenza è indicativo circa l'intensità con la quale il danno prodotto a seguito dell'evento sismico si manifesta. A tal fine sono state selezionate le quattro categorie di danno più ricorrenti responsabili di eventi NaTech, quindi la radiazione termica, l'incendio, l'esplosione ed il rilascio tossico di sostanze.

A questo punto, attraverso la combinazione tra i due indici appena descritti, è possibile derivare a sua volta l'Indice di Rischio Globale (GRI, Tabella 14).

Poiché a ogni danno possono essere associate diverse conseguenze, qualora queste risultino mutualmente esclusive, è possibile definire un GRI totale (del singolo danno) definito come somma degli indici di rischio di ciascuno degli scenari. In questo modo è possibile stilare un elenco delle priorità in termini di interventi, il quale può essere a sua volta correlato da parametri aggiuntivi relativi ad esempio all'impatto dell'intervento stesso, quindi i tempi di attuazione e l'eventuale possibilità di arresto dell'impianto.

Tabella 14 - Matrice di rischio per analisi decisionale

		Indice di conseguenza				
		1	2	3	4	5
Indice di classe di Probabilità	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15
	2	2	4	6	8	10
	1	1	2	3	4	5

### 7.1.5 L'Albero dei Guasti e l'Albero delle conseguenze

Dal punto di vista impiantistico, la valutazione del rischio industriale si sviluppa attraverso due strumenti fondamentali: l'Albero dei Guasti (Fault Tree Analysis, FTA) e l'Albero degli Eventi o delle Conseguenze (Event Tree Analysis, ETA). Si tratta di metodologie di analisi sistematica che consentono di rappresentare in modo logico e quantitativo le relazioni causa-effetto associate al manifestarsi di eventi dannosi, siano essi riferiti a un'apparecchiatura specifica o a un intero sistema impiantistico.

L'obiettivo comune delle due tecniche è la definizione di una relazione funzionale tra il guasto principale (evento indesiderato o "top event") e i danneggiamenti elementari sui singoli componenti (eventi base). Ciascuna relazione viene quantificata in termini di Tasso di guasto ("λ") e Probabilità di guasto in 50 anni ("P", vita utile dell'apparecchiatura) facendo riferimento a valori tabellati (nei vari codici di QRA come il "Purple book") associati alla prestazione che deve garantire la componente in oggetto e al contesto operativo in cui è inserita.

La FTA (Figura 55) rappresenta un metodo di analisi deduttivo, che parte dal guasto di sistema (ad esempio, rilascio di sostanza da un serbatoio) per risalire alle possibili cause elementari che ne determinano l'insorgenza. Il funzionamento si basa su porte logiche di tipo AND e OR, associate rispettivamente alla necessità che tutti gli eventi sottostanti si verifichino simultaneamente e alla sufficienza che almeno uno tra gli eventi intermedi si manifesti.

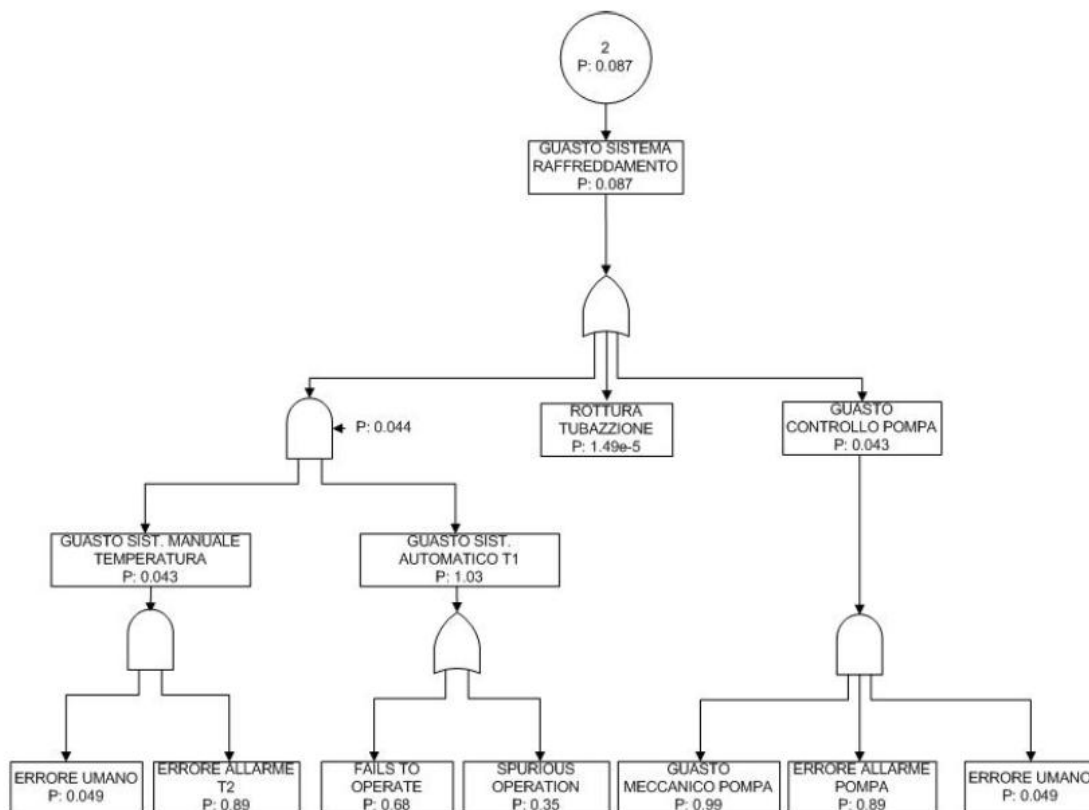


Tabella 6.2.2.2-1 Caratteristiche del telino

L'evento indesiderato, o Top Event, rappresenta il guasto del sistema funzionale in esame e non è seguito da ulteriori eventi, trovandosi all'apice dell'albero logico. Le cause che possono concorrere alla sua manifestazione comprendono guasti primari (di natura operativo-funzionale), cause esterne (es. anomalie o eventi indotti, tra cui anche l'azione sismica) ed errori umani o di comando. L'ETA (Figura 56), al contrario, adotta un approccio induttivo, partendo da un evento iniziatore (ad esempio, rilascio accidentale di una sostanza pericolosa) e sviluppando tutte le possibili direzioni evolutive del fenomeno, in funzione dell'efficienza dei sistemi di protezione e delle condizioni operative e ambientali che possono influenzare l'esito finale.

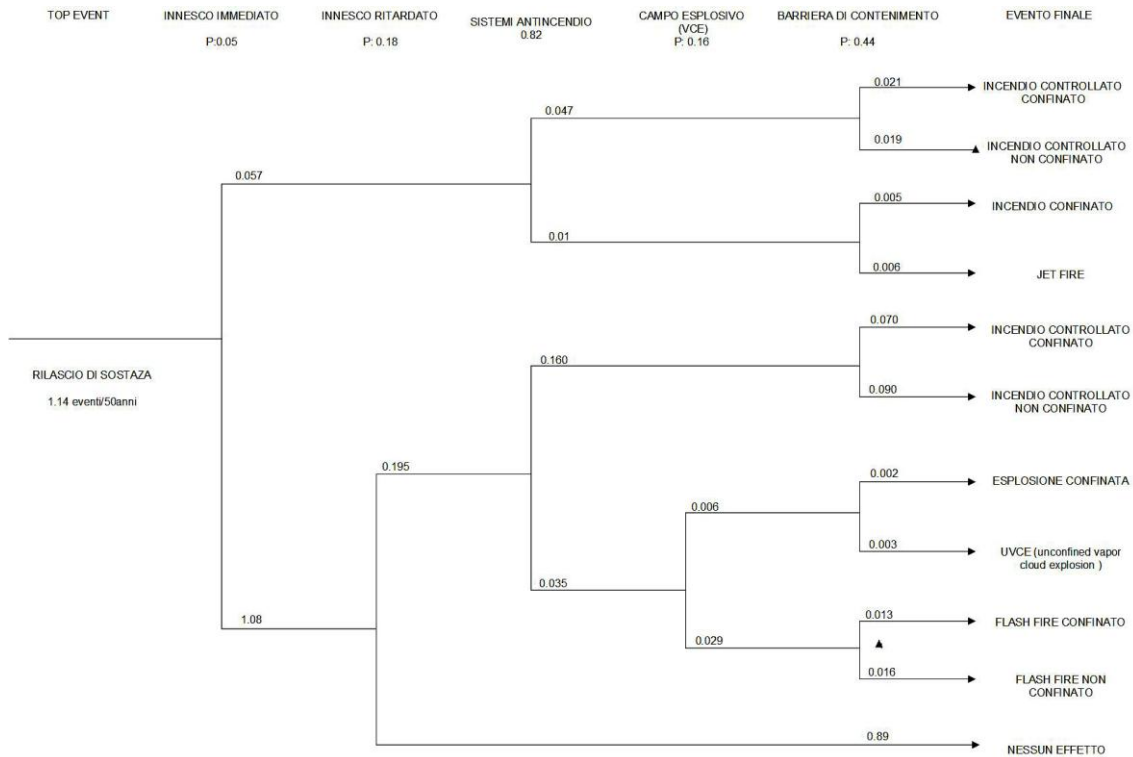


Figura 57 - Esempio di albero degli eventi

Ogni ramo dei due schemi rappresenta quindi una sequenza che conduce a differenti scenari, ciascuno caratterizzato da una probabilità di accadimento o frequenza annua di superamento. In tale approccio risiede proprio la possibilità di integrare lo scenario sismico: il tasso annuo di occorrenza dell'evento sismico, calcolato dalla combinazione tra curva di fragilità e di pericolosità (§7.2.4), viene accorpato al tasso di guasto operativo. A tal fine si considera la distribuzione di probabilità esponenziale:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{19}$$

dove:

$$\lambda = \lambda_{op} + \lambda_{eq} \tag{20}$$

La somma diretta dei tassi presuppone che guasti operativi e sismici siano indipendenti e mutualmente esclusivi. Tuttavia, dato che un guasto operativo potrebbe alterare la vulnerabilità sismica della struttura, potrebbe essere necessaria la considerazione di tale interazione modificando la capacità sismica strutturale, con effetti anche sugli esiti dell'analisi di fragilità (e quindi sulla valutazione finale del rischio).

Il criterio decisionale legato a questi due approcci prevede che una determinata circostanza oggetto di indagine venga trascurata solamene se il tasso annuo di guasto risulti inferiore all'ordine di "10<sup>-6</sup>" eventi critici l'anno.

## 7.2 Effetto domino

L'effetto domino è un fenomeno complesso del quale risulta difficile quantificare le conseguenze. La Direttiva Seveso III, all'Allegato E, fornisce criteri per l'individuazione delle condizioni per lo sviluppo di effetti domino in zone popolate da più impianti; tuttavia, non vengono fornite ulteriori indicazioni specifiche. In letteratura sono stati proposti diversi metodi semplificati, basati ad esempio sulla valutazione degli effetti fisici conseguenti al rilascio di materiale pericoloso [AOEC-016]. Un ulteriore approccio semplificato è quello che utilizza opportuni limiti oltre i quali è necessario condurre una valutazione quantitativa degli effetti domino [CS-004]. Esistono inoltre software dedicati in grado di effettuare tale valutazione [KBRPVH-013].

## 7.3 Individuazione delle condizioni che richiedono l'uso di sensori SMART

Una volta nota la frequenza media annua di superamento dei diversi "LOC", è possibile valutare quali frequenze risultino particolarmente elevate rispetto ai valori di rilascio normalmente utilizzati come riferimento limite nell'industria di processo [FIOS-005]. In tal modo sarà possibile individuare tutte le condizioni più critiche per le quali può risultare necessario intervenire con sistemi di mitigazione, come ad esempio i sistemi di monitoraggio (§6.6).

Un esempio di matrice di riferimento delle frequenze di "LOC" utilizzata per la valutazione quantitativa del rischio dei serbatoi atmosferici è illustrata in Tabella 15. Tale approccio risulta tuttavia criticabile, in quanto le frequenze di riferimento presenti in letteratura sono generalmente associate a eventi singoli e non legate a stati di danno.

Tabella 15 - Esempio di matrice di "LOC" nei serbatoi atmosferici (Uijt & Ale, 2005)

Installazione	G.1a Rilascio istantaneo in atmosfera	G.1b Rilascio istantaneo nel contenitore secondario	G.2a Rilascio continuo in atmosfera in 10 minuti	G.2b Rilascio continuo di 10 minuti nel contenitore secondario	G.3a Rilascio continuo con durata $\geq 10$ minuti nell'atmosfera	G.3b Rilascio continuo con durata $\geq 10$ minuti nel contenitore secondario
Serbatoio a contenimento singolo	$5 \times 10^{-6} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-6} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$	$1 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1}$	—
Serbatoio con mantello esterno protettivo	$5 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$	—	$1 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1}$
Serbatoio a doppio contenimento	$1.25 \times 10^{-8} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-9} \text{ y}^{-1}$	$1.25 \times 10^{-8} \text{ y}^{-1}$	$5 \times 10^{-9} \text{ y}^{-1}$	—	$1 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1}$
Serbatoio a contenimento completo	$1 \times 10^{-9} \text{ y}^{-1}$	—	—	—	—	—
Serbatoio interrato	—	$1 \times 10^{-5} \text{ y}^{-1}$	—	—	—	—

## 8 Gestione dell'emergenza in caso di evento sismico

I risultati ottenuti dall'Analisi del Rischio NaTech possono richiedere un aggiornamento degli scenari incidentali da considerare nella stesura del Piano di Emergenza Interno ("PEI"), oltre alle ulteriori informazioni che il gestore deve trasmettere all'Autorità Competente per la predisposizione del Piano di Emergenza Esterno (PEE). Ciò è legato al fatto che un terremoto può attivare dinamiche incidentali non previste negli scenari convenzionali e che potrebbero comportare effetti rilevanti sia internamente che al di fuori dello stabilimento.

Il "PEI" rappresenta il principale strumento gestionale interno degli stabilimenti "PIR" soggetti alla Direttiva Seveso poiché contiene l'organizzazione delle misure da adottare in caso di incidente rilevante. Al suo interno sono definiti i ruoli e le responsabilità del personale, i sistemi di allarme e le procedure di evacuazione, congiuntamente alle azioni di mitigazione da attuare per ridurre le conseguenze sull'impianto, sull'ambiente interno e sui lavoratori. È quindi un documento finalizzato alla salvaguardia del personale presente in sito e alla protezione degli asset aziendali.

Il "PEE", invece, è un piano di livello territoriale ed è predisposto dalla Prefettura o da altra Autorità Competente. Esso disciplina l'organizzazione delle attività di protezione civile nel caso in cui un incidente industriale generi effetti verso l'esterno dello stabilimento. Il piano comprende la gestione dell'informazione alla popolazione, il coordinamento delle forze di soccorso, la predisposizione delle misure di tutela pubblica e la definizione delle aree potenzialmente esposte agli effetti incidentali. Quando la causa dell'incidente è di matrice naturale, come nel caso dei terremoti, possono manifestarsi numerose criticità aggiuntive che amplificano le conseguenze dell'evento. Nei sistemi industriali, ad esempio, si possono verificare sequenze di eventi con effetti domino, la perdita di energia elettrica o di servizi essenziali, la rottura di apparecchiature e tubazioni, fenomeni di "sloshing" nei serbatoi o lo snervamento dei sistemi di ancoraggio. A ciò si sommano criticità di tipo sistemico, quali blackout delle comunicazioni, difficoltà di accesso allo stabilimento a causa di danni alla rete stradale e indisponibilità di risorse esterne di intervento, spesso già sovraccaricate dall'emergenza diffusa sul territorio. Per questo motivo, l'integrazione tra "PEI" e "PEE" risulta fondamentale nella gestione delle emergenze NaTech. Le indicazioni operative in tal senso sono fornite dal "DPCM del 14 gennaio 2014" (Figura 57) relativo al Programma nazionale di soccorso per il rischio sismico, che definisce la pianificazione dell'emergenza su scala nazionale e garantisce capacità di allertamento, attivazione e coordinamento degli interventi del Sistema di Protezione Civile.

Dal punto di vista operativo, la gestione delle emergenze è organizzata in maniera gerarchica, a seconda dell'estensione dei danni. Se l'emergenza è contenibile con le risorse locali, la direzione dei soccorsi è affidata al Sindaco, quale autorità di protezione civile. Qualora l'entità dei danni superi le capacità operative del Comune, intervengono la Prefettura e la Regione, che attivano ulteriori risorse territoriali. Nei casi più gravi, qualora l'emergenza manifesti rilievo nazionale, viene dichiarato lo stato di emergenza e il coordinamento passa al Presidente del Consiglio dei ministri tramite il Dipartimento della Protezione Civile.

La pianificazione per il rischio sismico è articolata in due parti: la prima dedicata all'organizzazione nazionale degli interventi, la seconda alla descrizione del contesto territoriale su scala regionale. La gestione dell'emergenza viene concepita come un sistema complesso in cui le diverse componenti, attraverso una logica di auto-organizzazione, attivano in maniera sinergica le funzioni di supporto. Tra queste riveste un ruolo centrale la funzione dedicata ai rischi indotti dagli effetti sismici, responsabile della raccolta e dell'analisi dei dati tecnici, nonché del coordinamento delle verifiche

sugli stabilimenti soggetti alla normativa Seveso. Questa funzione opera in collaborazione con gli enti territoriali, i centri di competenza della Protezione Civile e i professionisti tecnici abilitati per valutare il rischio residuo, individuare misure di messa in sicurezza e attuare interventi di mitigazione. Contribuisce inoltre al ripristino delle infrastrutture e delle strutture industriali danneggiate, garantendo la continuità della sicurezza anche in presenza di ulteriori scosse significative. Nel complesso, l'integrazione tra "PEI" e "PEE" rappresenta uno degli aspetti chiave nella gestione dei rischi Natech da sisma, poiché consente di assicurare una risposta emergenziale efficace e coordinata, in grado di tutelare tanto gli operatori industriali quanto la popolazione e l'ambiente circostante.

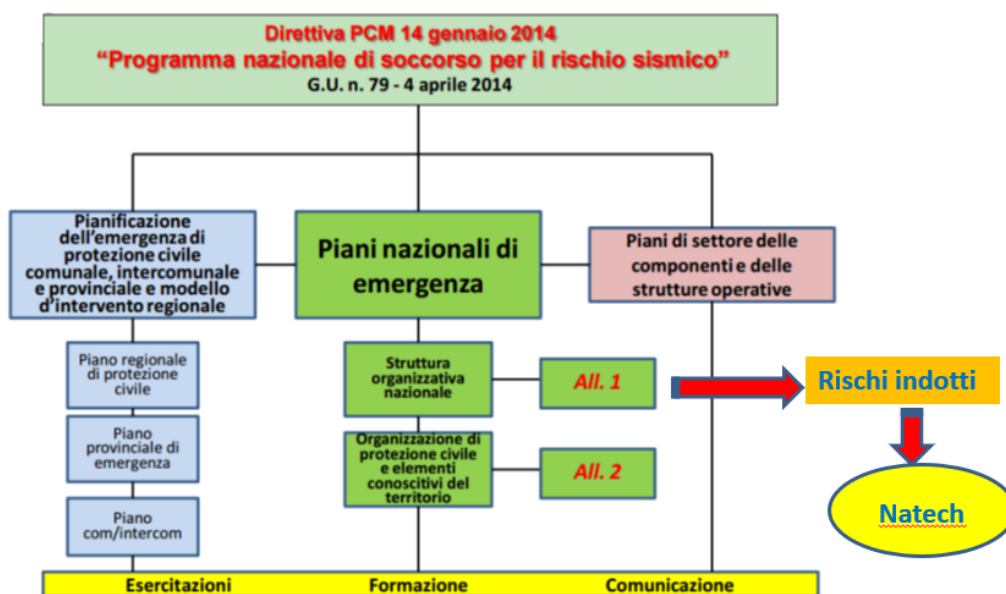


Figura 58 - Collocazione del rischio NaTech nell'ambito della pianificazione nazionale di emergenza per il rischio sismico, secondo la Direttiva PCM 14 gennaio 2014

## 8.1 Attività per la gestione dell'emergenza sismica

È quindi fondamentale che il gestore dello stabilimento disponga di strumenti in grado di supportare tempestivamente le decisioni in caso di evento NaTech, i quali dovrebbero permettere di identificare sin da subito i potenziali rischi per la popolazione e di fornire indicazioni operative alle squadre di emergenza sulle azioni da intraprendere. Allo stesso tempo, risulta essenziale prevedere adeguate attività di formazione e addestramento del personale, affinché esso sia preparato a utilizzare correttamente tali sistemi in condizioni critiche.

L'esperienza maturata in precedenti emergenze NaTech ha evidenziato che l'efficacia della risposta dipende in larga misura dalla preparazione preventiva: riconoscere e analizzare correttamente i fattori critici prima dell'evento è determinante, così come garantire che, durante la crisi, le interazioni tra tali fattori vengano opportunamente gestite in un'ottica coordinata.

I principali elementi da tenere in considerazione durante la gestione dell'emergenza includono:

- Presenza di sostanze pericolose: conoscere ubicazione, proprietà chimico-fisiche e livelli di

pericolosità, identificare i punti critici dai quali potrebbero verificarsi perdite di contenimento, valutare le potenziali quantità rilasciate e garantire procedure di primo soccorso e protezione adeguate al personale operativo;

- Risorse umane: disponibilità di operatori addestrati e competenti per affrontare scenari complessi tipici degli eventi NaTech;
- Sistemi di comunicazione e allerta: efficienza dei sistemi di attivazione delle procedure di emergenza e capacità di mantenere le comunicazioni operative (telefoni, radio, sistemi di allarme) nonostante possibili disservizi causati dal sisma;
- Servizi antincendio e gestione dei rilasci: funzionalità dei sistemi di rilevazione incendi o fughe di sostanze pericolose, disponibilità di mezzi per contenimento e spegnimento, capacità di attivare rapidamente personale e attrezzature di supporto anche per attività di ricerca, salvataggio e gestione dei detriti;
- Primo soccorso sanitario: presenza di risorse e protocolli adeguati al trattamento e il trasporto dei feriti o delle persone esposte, con attenzione alla possibile contaminazione chimica.

Considerando tali elementi, risulta evidente come la risposta agli eventi NaTech negli stabilimenti soggetti alla Direttiva Seveso presenti caratteristiche specifiche, che devono essere affrontate in maniera strutturata all'interno del Sistema di Gestione della Sicurezza e Prevenzione Incendi Rilevanti ("SGS-PIR").

Il SGS-PIR rappresenta infatti l'insieme organizzato di procedure, responsabilità e risorse introdotto dalla normativa Seveso per garantire la prevenzione degli incidenti rilevanti e limitare le conseguenze di eventuali rilasci di sostanze pericolose. Esso comprende:

- La definizione chiara dei compiti del personale coinvolto nella gestione dell'emergenza;
- La mappatura delle sostanze e dei pericoli presenti;
- Le misure tecniche e gestionali per ridurre la vulnerabilità degli impianti;
- Le modalità operative per il controllo e la risposta ai possibili scenari incidentali, compresi quelli di origine NaTech.

In questo contesto, il "SGS-PIR" assume un ruolo determinante per la gestione dell'emergenza: consente di predisporre una risposta tempestiva ed efficace, assicurando che le azioni intraprese siano coerenti con quanto pianificato e che gli interventi delle diverse squadre avvengano in modo coordinato.

Tale pianificazione non può essere circoscritta alla sola organizzazione interna dello stabilimento: deve essere condivisa con tutti i soggetti coinvolti, pubblici e privati, affinché vi sia un pieno coordinamento. In particolare, è fondamentale garantire l'integrazione con i piani delle Autorità (Prefettura, Comune e Protezione Civile) e con gli interventi dei Vigili del Fuoco e delle altre strutture operative, così da assicurare un allineamento delle attività nell'ambito della funzione "rischi indotti - NaTech" prevista dal Programma nazionale di soccorso per il rischio sismico.

## 9. Conclusioni

L'approccio metodologico descritto consente di integrare il contesto sismico nella gestione del rischio industriale, superando le criticità derivanti dalla scissione tra la valutazione dei rischi naturali e quelli tecnologici.

Attraverso l'utilizzo della matrice di screening, il gestore è in grado di concentrarsi sulle apparecchiature maggiormente esposte al rischio sismico, razionalizzando l'impiego delle risorse e privilegiando le azioni di mitigazione più efficaci. La modellazione sismica e lo sviluppo delle curve di fragilità permettono una valutazione quantitativa del rischio di rilascio che consente di individuare gli scenari da considerare nel rapporto di sicurezza. Inoltre, risulta fondamentale sia per il miglioramento continuo del Sistema di Gestione della Sicurezza ("SGS-PIR"), sia per una più efficace pianificazione dell'emergenza.

L'integrazione degli scenari incidentali NaTech (individuati nel rapporto di sicurezza) nei "PEI" e nei "PEE" rappresenta un passaggio fondamentale per assicurare tempestività di intervento, tutelare la popolazione e lavoratori e garantire la resilienza dell'impianto e del territorio circostante.

Sebbene siano disponibili strumenti e riferimenti operativi, la letteratura evidenzia ancora carenze di standardizzazione, soprattutto nella definizione delle soglie accettabili di rischio. Diventa quindi necessario, in futuro, continuare a sviluppare metodologie condivise e aggiornare gli strumenti di prevenzione, inclusi i sistemi di monitoraggio attivo e i protocolli di comunicazione tra gestori e Autorità. In tale prospettiva, il presente lavoro fornisce un contributo concreto per l'applicazione sistematica dell'analisi NaTech sismica nel panorama nazionale, delineando un quadro metodologico integrato e facilmente adattabile ai diversi contesti industriali. Esso rappresenta un passo verso un approccio orientato alla gestione del rischio capace di coniugare analisi tecnica, pianificazione operativa e innovazione tecnologica. L'adozione di soluzioni "SMART", sistemi di monitoraggio in tempo reale e procedure coordinate tra gestori e autorità potrà, in futuro, rendere gli impianti non solo più sicuri, ma anche più resilienti, contribuendo a una cultura della prevenzione sempre più matura e diffusa nel settore industriale.

## Riferimenti bibliografici

[MRSMC-019] Moreno, V., C., Ricci, F., Sorichetti, R., Misuri, A., Cozzani, V. Analysis of past accidents triggered by natural events in the chemical and process industry, *Chem Eng Trans*, vol. 74, pp. 1405-1410, 2019, doi: 10.3303/CET1974235.

[BRAP-015] Bursi, O. S., Reza, M. S., Abbiati, G., & Paolacci, F. (2015). Performance-based earthquake evaluation of a full-scale petrochemical piping system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33, 10-22.

[PP-016] Phan, H. N., & Paolacci, F. (2016, July). Efficient intensity measures for probabilistic seismic response analysis of anchored above-ground liquid steel storage tanks. In *Pressure vessels and piping conference* (Vol. 50411, p. V005T09A010). American Society of Mechanical Engineers.

[CJHF-002] Cornell, C.A., Jalayer, F., Hamburger, R.O., Foutch, D.A., (2002). Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 128(4), 526-533.

[CPC-021] Corritore, D., Paolacci, F., & Caprinuzzi, S. (2021). A screening methodology for the identification of critical units in major-hazard facilities under seismic loading. *Frontiers in built environment*, 7, 780719.

[CB-001] Cook, R. A., & Bobo, B. J. (2001). Design guidelines for annular base plates (No. UF Proj 4910-4504-716-12,).

[KB-011] Karamanos, S., & Bursi, O. S. (2011). Structural safety of industrial steel tanks, pressure vessels and piping systems under seismic loading.

[KPL-006] Karamanos, S., Patkas, L.A., Lathyrrachos, M.A. (2006) Sloshing Effects on the Seismic Design of Horizontal-Cylindrical and Spherical Industrial Vessels, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 128, pp. 328-340, 2006.

[PP-018] Phan H.N., Paolacci F., Alessandri S., (2018), Enhanced seismic fragility analysis of unanchored steel storage tanks accounting for uncertain modeling parameters, submitted to *Journal of Pressure Vessel and Technology*. DOI: 10.1115/1.4039635.

[BdLPR-018] Bursi, O. S., di Filippo, R., La Salandra, V., Pedot, M., Reza, M. S., (2018). Probabilistic seismic analysis of an LNG subplant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 45-60.

[VKKS-015] Vathi, M., Karamanos, S.A., Kapogiannis, I.A., Spiliopoulos, K.V., (2015). "Performance criteria for liquid storage tanks and piping systems subjected to seismic loading," *Proc. of ASME 2015 Conference on Pressure Vessels and Piping PVP2015*, Paper # PVP2015-45700, July 19-23, 2015, Boston, MA, USA.

[LL-008] Lin, C.-J., and C.-C. Liu (2008), Calibrating the R-1 rotation sensors on CT-EW1 table, Inst. Earth Sci. Rep. IESER2008-001, Acad. Sin., Taipei.

[PZTABSU-011] Pozzi M., Zonta D., Trapani D., Amditis A.J., Bimpas M., Stratakos Y.E., Ulieru D., (2011). "MEMS-based sensors for post-earthquake damage assessment" Simbolo: .pdf(1MB). Journal of Physics: Conf. Ser., v. 305, p. 012100.

[MCP-017] 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.

[SBS-015] Sättele M, Bründl M., Straub D., (2015), Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning, Reliability Engineering & System Safety, Volume 142.

[IW-013] Inaudi D., Walder R., (2013), Automated test system for monitoring the efficacy and reliability of leakage detection systems in pipelines, Rio Pipeline Conference & Exposition 2013, Sept. 24-26.

[RBW-008] Röck F., Barsan N., Weimar U., (2008), Electronic Nose: Current Status and Future Trends, Chemical Reviews 2008 108 (2), 705-725

[PQNVMC-021] Paolacci, F., Quinci, G., Nardin, C., Vezzari, V., Marino, A., & Ciucci, M. (2021). Bolted flange joints equipped with FBG sensors in industrial piping systems subjected to seismic loads. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 72, 104576.

[LE-004] LESSLOSS (2004). Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides. Report No. GOCE-CT-2003-505448. Luxembourg: European Union.

[TPGM-016] Tsionis, G., Pinto, A., Giardini, D., and Mignan, A. (2016). Harmonized Approach to Stress Tests for Critical Infrastructures against Natural Hazards, STREST Reference Report: Report on Lessons Learned from Recent Catastrophic Events. Luxembourg: European Union.

[KBRPVH-013] Karamanos, S., Bursi, O. S., Reza, M. S., Paolacci, F., Varelis, B., and Hoffmeister, G. (2013). INDUSE - Structural Safety of Industrial Steel Tanks, Pressure Vessels and Piping Systems Under Seismic Loading, INDUSE Project, Research Fund for Coal and Steel. Report No. RFSR-CT-2009-00022. Luxembourg: European Union.

[BR-018a] Bursi, O., and Reza, M. (2018a). INDUSE-2-SAFETY - Component Fragility Evaluation and Seismic Safety Assessment of 'Special Risk' Petrochemical Plants Under Design Basis and Beyond Design Basis Accidents. Luxembourg: European Union.

[BR-018b] Bursi, O., and Reza, M. (2018b). XP-RESILIENCE - Extreme Loading Analysis of Petrochemical Plants and Design of Metamaterial-Based Shields for Enhanced Resilience. Luxembourg: European Union.

[KONS-985] Kiremidjian, A., Ortiz, K., Nielsen, R., Safavi, B., 1985, "Seismic Risk to Major Industrial Facilities", Report No. 72, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, USA.

[SETR-996] Seligson H.A., Eguchi, R.T., Tierney, K.J., Richmond, K., 1996, "Chemical Hazards, Mitigation and Preparedness in Areas of High Seismic Risk. A Methodology for Estimating the Risk of Post Earthquake Hazardous Materials Release", National Centre for Earthquake Engineering Research, State University of NY at Buffalo, Technical Report NCEER-96-0013.

[GK-013] Girgin S., Krausmann E., 2013, "RAPID-N: Rapid natech risk assessment and mapping framework", J Loss Prevent Proc, Vol. 26, pp. 949-960.

[BMCR-011] Busini, V., Marzo, E., Callioni, A., Rota, R., 2011, "Definition of a Short-cut Methodology for Assessing Earthquake-related Na-Tech Risk", J. of Hazardous Materials, Vol. 192, pp. 329-339.

[MBR-015] Marzo, E., Busini, V., Rota, R., 2015, "Definition of a Short-Cut Methodology for Assessing the Vulnerability of a Territory in Natural-Technological Risk Estimation", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 134, pp. 92- 97.

[SACF-009] Salzano, E., Agreda, A. G., Carluccio, A., & Fabbrocino, G., 2009, "Risk assessment and early warning systems for industrial facilities in seismic zones", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94:10, pp. 1577-1584.

[FIOS-005] Fabbrocino, G., Iervolino, I., Orlando, F., Salzano, E., 2005, "Quantitative Risk Analysis of Oil Storage Facilities in Seismic Areas", J. of Hazardous materials, Vol. A123, pp. 61-69.

[ASC-007] Antonioni, G., Spadoni, G., & Cozzani, V., 2007, "A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events". Journal of Hazardous Materials, Vol. 147, p. 48-59.

[CCGS-008] 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.

[CALTBS-014] Cozzani, V., Antonioni, G., Landucci, G., Tugnoli, A., Bonvicini, S., Spadoni, G., 2014, "Quantitative Assessment of Domino and Natech Scenarios in Complex Industrial Areas", J. of Loss Prevention in Process Industries, Vol. 28, pp. 10-22.

[SACF-009] Salzano, E., Agreda, A. G., Carluccio, A., & Fabbrocino, G., 2009, "Risk assessment and early warning systems for industrial facilities in seismic zones", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94:10, pp. 1577-1584.

[FIOS-005] Fabbrocino, G., Iervolino, I., orlando, F., Salzano, E., 2005, "Quantitative Risk Analysis of Oil Storage Facilities in Seismic Areas", J. of Hazardous materials, Vol. A123, pp. 61-69.

[SH-014] Sadeg-Azar, H., Hasenbank-Kriegbaum, T.D., 2014, "Probabilistic Seismic Analysis of Existing Industrial Facilities", in Klinkel, S. et al. (Eds.), *Seismic Design of Industrial Facilities*, Proc. of the Int. Conf. on Seismic Design of Industrial Facilities (SeDIF), pp. 101-112, Springer.

[CV-017] Caputo, A.C., Vigna, A., 2017, Numerical simulation of seismic risk and loss propagation effects in process plants. An oil refinery case study, Proc. ASME Pressure Vessel & Piping Conference PVP2017, July 16-20, 2017, Waikoloa, Hawaii, United States, DOI: 10.1115/PVP2017-65465.

[Ca-016] Caputo, A.C., 2016, "A model for probabilistic seismic risk assessment of process plants", Proc. ASME Pressure Vessels & Piping Conference PVP2016 July 17-21, Vancouver, British Columbia, Canada, Paper No. PVP2016-63280, DOI:10.1115/PVP2016-63280.

[CPBG-019] Caputo A. C., Paolacci F., Bursi O.S., Giannini. R., (2019), Problems and perspectives in seismic QRA of chemical process plants for decision making, submitted to *Journal of Pressure Vessel and Technology*.

[JC-003] Jalayer, F., and Cornell, A. (2003). A Technical Framework for Probability-Based Demand and Capacity Factor Design (DCFD) Seismic Formats. Report, 08 (Berkeley: PEER).

[AOEC-016] Alileche, A., Olivier, D., Estel, L., Cozzani, V., 2016. Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. *Saf. Sci.* 97, 10-19. January 2016.

[CS-004] Cozzani, V., and Salzano, E., 2004, "Threshold Values for Domino Effects Caused by Blast Wave Interaction with Process Equipment," *J. Loss Prev. Process Ind.*, 17(6), pp. 437-447.

[KBRPVH-013] Kadri F., Chatelet E., (2013), Domino Effect Analysis and Assessment of Industrial Sites: A Review of Methodologies and Software Tools, *International Journal of Computers and Distributed Systems* Vol. No.2, Issue III, Feb-March.

[FIOS-005] 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.

[BC-999] Bazzurro P. and Cornell C. A.; 1999: Disaggregation of seismic hazard. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 89, 501-520.

[GR-944] Gutenberg, B., and Richter, C. F. 1944. Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185-188.

[VK-015] Vathi, M., and Karamanos, S.A., 2015, "Simplified model for the seismic performance of unanchored liquid storage tanks," In *Proceedings of ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference*, Boston, Massachusetts, USA.

[PPA-016] Phan, H. N., Paolacci, F., & Alessandri, S. (2016, July). Fragility analysis methods for

steel storage tanks in seismic prone areas. In Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 50466, p. V008T08A023). American Society of Mechanical Engineers.

[QPFB-025] Quinci, G., Paolacci, F., Fragiadakis, M., & Bursi, O. S. (2025). A machine learning framework for seismic risk assessment of industrial equipment. *Reliability Engineering & System Safety*, 254, 110606.

[SDC-022] Salimbeni, M., De Angelis, M., & Ciucci, M. (2022). Earthquake NaTech Risk Assessment in Major-Hazard Industrial Plants, a Case Study: Cylindrical Liquid Storage Tank with Floating Roof. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 193-198.

[AMSC-022] Amaducci, F., Misuri, A., Salzano, E., & Cozzani, V. (2022). Assessment of failure frequencies of pipelines in Natech events triggered by earthquakes. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 451-456.

[KCCP-024] Kalemi, B., Caputo, A. C., Corritore, D., & Paolacci, F. (2024). A probabilistic framework for the estimation of resilience of process plants under Na-Tech seismic events. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(1), 75-106.

[ACCGPP-018] Alessandri A., 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*, Vol 53 - pp. 136-148, DOI: 10.1016/j.jlp.2017.12.013.

[BGMMMVS-024] Berardo G., Giannini L.M., Marino A., Maschio G., Mocellin P., Vianello C & Scarascia Mugnozza G., Assessing local seismic response in Major-Hazard industrial plants: implications for NaTech events, *IJECE*, Special Issue 1 (2024): 23-30, DOI: 10.4408/IJECE.2024-01.S-03E-ISSN 2035-5688 | ISSN 1825-6635, 2024.

[MBC-024] Marino A., Berardo G., Ciucci M., Early warning and smart technologies for seismic NaTech risk management in major hazard industries, *Proceedings 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024) Milan, Italy, June 30 - July 5, 2024*. ISSN 3006-5933, 2024.

[MC.022] Marino A., Ciucci M. Smart, Technologies for Integrated NaTech Risk Management in Major Hazard Industrial Plants, *Proceedings of the 32nd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2022) 28th August - 1st September 2022, Dublin, Ireland* doi:10.3850/978-981-18-5183-4\_R27-02-268-cd, 2022.

[BGS-022] Berardo G., Giannini L.M., Marino A., Scarascia Mugnozza G., Probabilistic modelling of soil properties variability for local seismic response analysis in NaTech events, *Proceedings EGU 2024 - European Geoscience Union General Assembly, Vienna 14-19 Aprile 2024*.

[ACCGP-016] Alessandri, S., Caputo, A. C., Corritore, D., Giannini, R., & Paolacci, F. (2016, July). Seismic quantitative risk assessment of process plants through Monte Carlo simulations. In Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 50466, p. V008T08A013). American Society of Mechanical Engineers.

*Legislazione e normative*

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 (Direttiva Seveso III).

Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC 2018).

Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n. 7 del 21 gennaio 2019 - Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

Decreto Ministeriale 9 maggio 2001 - Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei depositi di gas naturale con capacità complessiva superiore a 50.000 Nm<sup>3</sup>.

CNR-DT 214/2018 - Istruzioni per la valutazione della sicurezza delle strutture esistenti.

EN 1990: 2002+A1:2005 (Eurocode 0) - Basis of Structural Design.

EN 1998 - 1:2004 (Eurocode 8) - Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings.

EN 1998 - 4:2006 (Eurocode 8) - Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 4: Silos, Tanks and Pipelines.

EN 1998-6: 2005 (Eurocode 8) - Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 6: Towers, Masts and Chimneys.

EN 14015: 2004 - 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.

EN 13445 (series) - Unfired Pressure Vessels.

EN 13121 (series) - GRP Tanks and Vessels for Use Above Ground.

UNI/TS 11816-1: 2021 - Serbatoi per liquidi - Progettazione, costruzione e installazione - Parte 1: Serbatoi cilindrici verticali in acciaio saldato con fondo e tetto fissi.

API Standard 650 (2020) - Welded Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute.

API Standard 653 (2020) - Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. American Petroleum Institute.

AWWA D100-05 - Welded Carbon Steel Tanks for Water Storage. American Water Works Association.

NZSEE (2009) - New Zealand Society for Earthquake Engineering - Recommendations for Seismic Design of Storage Tanks.

IITK-GSDMA Guidelines (2007) - Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks. Indian Institute of Technology Kanpur - Gujarat State Disaster Management Authority.

ASME - Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) - Rules for Construction of Pressure Vessels and Boilers. American Society of Mechanical Engineers.

ASME B31.3 - Process Piping Code (2020) - Process Piping. American Society of Mechanical Engineers.

## I Quaderni di ricerca

- 1 - G. Ciriello, M. De Felice, R. Mosca, M. Veltroni, *Infortuni sul lavoro. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail*
- 2 - L. Cortis, F. M. Fabiani, C. Ratti, L. Rossi, D. G. Svampa, C. Vitale, *Analisi e valutazione del comportamento dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta con differenti masse di prova*
- 3 - P. Rossi, *Danno biologico: monitoraggio, criticità e prospettive d'interesse medico-legale a dieci anni dall'introduzione della nuova disciplina*
- 4 - M. De Felice, A. Goggiamani, R. Mosca, M. Veltroni, *Malattie professionali. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail*
- 5 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Nuovi strumenti per la valutazione dello scivolamento e ribaltamento delle scale portatili*
- 6 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Determinazione della resistenza caratteristica dei dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata*
- 7 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: il modello di valutazione delle forniture IT dell'Inail*
- 8 - P. Agnello, S. M. Ansaldi, *Una proposta di ontologia per gli Open Data Inail sugli infortuni: dalla numerosità dei dati alla gestione della conoscenza*
- 9 - A. Alvino, A. Antonini, C. Delle Site, A. Di Loreto, F. Giacobbe, D. Lega, E. Pichini, M.A. Pierdominici, L. Ricciardi, A. Tonti, *Analisi delle cause di rottura di materiali metallici: esempi di Applicazione*
- 10 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Light workers e criticità dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta*
- 11 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: la valutazione delle forniture IT dell'Inail per il 2015*
- 12 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Metodologia per prove di rigidità e resistenza per i dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata*
- 13 - R. Giovinazzo, E. Guerrera, M. Mameli, D. Sarto, M. Veltroni, *Analisi della contaminazione microbiologica degli ambienti di lavoro. Valutazione della qualità del dato analitico nel conteggio microbico su piastra e nelle prestazioni dell'operatore*
- 14 - P. Agnello, F. Bracco, C. Brunel, M. Masini, T. F. Piccinno, A. Sedaoui, D. Tazi, *Promuovere la sicurezza nelle organizzazioni attraverso manager resilienti*

- 15 - L. Rossi, *Esecuzione in sicurezza dei lavori in copertura. Misure di prevenzione e protezione*
- 16 - F. Antonello, P. Bragatto, F. Di Maio, S. M. Hoseyni, E. Zio, *Stima adattiva del rischio di rottura di attrezzature in pressione, sulla base dei dati di monitoraggio*
- 17 - J. Cecca, N. L'Episcopo, L. Mainero Rocca, *Nuove tecniche analitiche al servizio della sicurezza dei lavoratori: sviluppo di un metodo di analisi diretta di fungicidi e insetticidi sulla superficie delle foglie*
- 18 - A. Di Francesco, P. Iacono, A. Nebbioso, A. Pirone, G. Saputi, C. Simeoni, M.R. Vallerotonda, *Settore Seveso: contesto normativo e caratterizzazione statistica degli infortuni*
- 19 - F. M. Fabiani, L. Rossi, *Criticità delle reti di sicurezza di piccole dimensioni*
- 20 - Bragatto, C. Mennuti, M. F. Milazzo, E. Proverbio, *Tecniche avanzate per la gestione dei serbatoi di stoccaggio atmosferico*
- 21 - E. Badellino, T. P. Baccolo, M. R. Marchetti, A. Papale, I. Rossi, E. Rotoli, S. Signorini *Il progetto Inail: La prevenzione alimentare al lavoro in ottica bio-psico-sociale - I risultati della ricerca-intervento*
- 22 - A. Abrardo, P. Agnello, S. M. Ansaldi, L. Belli, P. Bragatto, L. Davoli, F. M. Fabiani, G. Ferrari, L. Parri, *CP-SEC: Sistema Cyber-Fisico per la sicurezza dei lavoratori in presenza di sostanze pericolose*
- 23 - D. Accordin, P. Agnello, S. M. Ansaldi, S. Arrigoni, F. Braghin, E. Cagno, C. Frasccheri, E. Lenzi, D. Piantella, M. Roveri, L. Tanca, G. Viscardi, *RECKON: Tecnologie abilitanti per il monitoraggio degli elementi di contesto (Operatore-Macchina- Ambiente) per la prevenzione di incidenti sul lavoro*
- 25 - L. Rossi, M. Vallesi, *Azioni sugli ancoraggi permanenti esercitate dai sistemi di protezione individuale dalle cadute.*
- 26 - F. M. Fabiani, L. Rossi, *Le reti di sicurezza contro la caduta di oggetti.*





