

Rischio NaTech da sisma per stabilimenti con pericolo di incidente rilevante, un caso studio: serbatoi atmosferici a tetto galleggiante

M. Salimbeni¹, M. De Angelis¹, M. Ciucci²

¹ Università degli Studi di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.

² INAIL / Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici.

Sommario

Eventi recenti hanno messo in luce come l'interazione tra rischi naturali e rischio industriale (eventi NaTech) possa dar luogo ad incidenti rilevanti. In termini di sicurezza il riferimento normativo per stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR) è il D.Lgs. n.105/2015, che prevede esplicitamente l'analisi dei rischi NaTech, nell'ambito dei quali il sisma è uno dei più significativi. Per tali impianti, i codici normativi e le linee guida risultano essere non sempre adeguati allo svolgimento di un'analisi completa del rischio sismico, che richiede un approccio multidisciplinare, data l'elevata complessità del problema e le numerose tipologie di apparecchiature. Inoltre, le verifiche di sicurezza proposte dalle normative si concentrano perlopiù sugli elementi strutturali. Scopo di questo lavoro è fornire indicazioni circa la valutazione del rischio sismico attraverso l'analisi di un caso studio, considerando aspetti strutturali e non strutturali di un serbatoio atmosferico a tetto galleggiante, componente altamente vulnerabile e largamente diffuso per lo stoccaggio di sostanze pericolose. Infatti, danni strutturali e non strutturali ad un serbatoio possono provocare il rilascio di sostanze pericolose. È stata approfondita, quindi, l'interazione fluido-tetto, viste le criticità legate alla componente convettiva del moto del fluido innescato dal terremoto. Le analisi dinamiche, svolte sulla base di modelli analitici semplificati relativi allo studio del comportamento dei serbatoi, hanno messo in evidenza come per una adeguata e completa valutazione del rischio sismico sia necessario considerare la presenza del tetto galleggiante. Infatti, eccessive deformazioni dello stesso possono provocare la crisi del sistema di tenuta e, di conseguenza, il rilascio di sostanze pericolose.

1 Introduzione

Negli ultimi decenni diverse catastrofi naturali, i terremoti di Kobe (Giappone, 1995), Izmit (Kocaeli, Turchia, 1999), Gujarat (India, 2001), Tokachi-Oki (Giappone, 2003), il tornado Katrina nella costa orientale degli Stati Uniti (2005), hanno evidenziato che i disastri di origine naturale sono in grado di provocare importanti danni agli stabilimenti industriali, provocando spesso il rilascio di sostanze pericolose [1]. Tali disastri vengono definiti eventi NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters), nascono dall'interazione tra rischi naturali e rischio industriale e possono dar luogo ad incidenti rilevanti, nei quali sono coinvolte sostanze pericolose. Tra gli eventi NaTech, il sisma è uno dei più significativi, poiché investe contemporaneamente l'intero stabilimento e può causare danni simultanei alle apparecchiature. La vulnerabilità degli stabilimenti industriali deriva, soprattutto, dalla complessità del layout e dalla possibilità che si formino catene incidentali, con eventuale effetto domino, che possono provocare esplosioni, incendi e rilasci di sostanze pericolose stoccate e impiegate nei processi industriali [2].

In termini di sicurezza, il riferimento normativo per stabilimenti con Pericolo di Incidente Rilevante (PIR) è il D.Lgs. n.105/2015, che prevede esplicitamente l'analisi dei rischi NaTech. Attualmente però, i codici normativi e le linee guida in materia risultano essere non

sempre adeguati allo svolgimento di un'analisi completa del rischio sismico. Infatti, le verifiche di sicurezza si concentrano perlopiù sugli aspetti strutturali delle diverse componenti, trascurando la possibilità di crisi degli elementi non strutturali che pure possono essere coinvolti- se non addirittura causare- un incidente rilevante.

Nel presente lavoro vengono applicate le indicazioni normative in ambito di valutazione del rischio sismico in stabilimenti PIR, attraverso l'analisi di un caso studio, un serbatoio atmosferico a tetto galleggiante, considerando anche l'interazione fluido-tetto galleggiante, viste le criticità legate alla componente convettiva del moto del fluido innescato dal terremoto.

2 Serbatoi atmosferici a tetto galleggiante

I serbatoi atmosferici a tetto galleggiante [3][4] (Fig. 2.1) sono impiegati nello stoccaggio di sostanze che formano una notevole quantità di vapori. Il tetto galleggiante è sempre a contatto con il liquido, in modo da seguirne le variazioni di livello ed eliminare la camera superiore di gas, evitando così la formazione di miscele infiammabili e/o esplosive e riducendo le perdite per evaporazione del prodotto. Principalmente sono due i modelli di tetto galleggiante:

- a singolo pontone, costituito da un unico strato di lastre metalliche saldate al bordo del quale vi sono una serie di galleggianti (Fig. 2.1a);
- a doppio pontone, costituito da due lastre sovrapposte con intercapedine ed irrigidimenti di profilati in acciaio o tralicci (Fig. 2.1b).

La tenuta del tetto galleggiante è garantita da un sistema deformabile installato tra tetto e mantello, che consente lo spostamento verticale del tetto nelle fasi di immissione/scarico del fluido contenuto.

Per il funzionamento dei serbatoio sono necessari alcuni elementi, come i sistemi di tubazioni, uno scarico di fondo, una scala, il sistema di drenaggio delle acque meteoriche, i sensori di controllo.

Per la prevenzione degli incidenti, i serbatoi sono dotati di sistemi di allarme e blocco automatico per altissimo livello di riempimento, sistemi di allarme per inclinazione anomala del tetto, sistemi di rilevazione incendio, sistemi di continuità elettrica tra tetto e pareti del serbatoio messo a terra. Inoltre, sono presenti sistemi di protezione, quali sistemi di raffreddamento alle pareti e di immissione schiuma con mezzi fissi e/o mobili per lo spegnimento degli incendi.

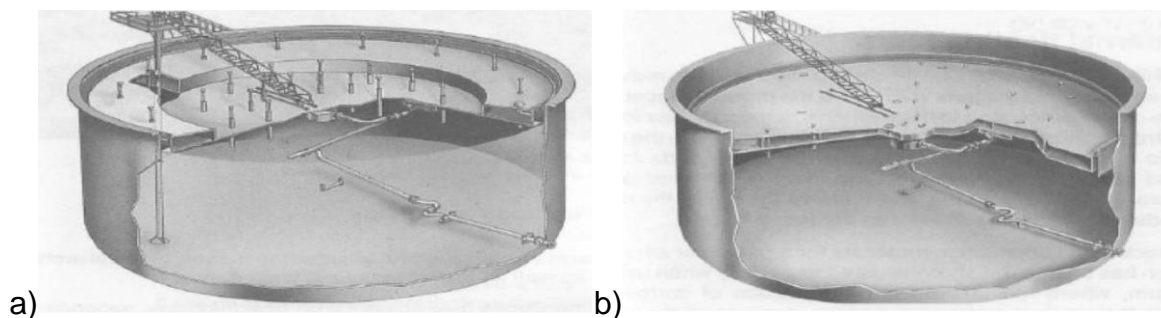


Figura 2.1: a) Serbatoio atmosferico con tetto galleggiante a singolo pontone b) Serbatoio atmosferico con tetto galleggiante a doppio pontone [4]

2.1 Comportamento dinamico

Il comportamento dinamico di un serbatoio atmosferico è essenzialmente riconducibile alla dinamica del fluido contenuto indotta dal terremoto.

Dato un serbatoio atmosferico cilindrico ad asse verticale soggetto ad una accelerazione orizzontale alla base, infatti, il fluido in moto esercita una sovrappressione idrodinamica sul serbatoio che può essere convenientemente suddivisa in tre componenti:

- pressione idrodinamica dovuta all'accelerazione del suolo considerando rigide le pareti del serbatoio, detta "impulsiva";
- pressione idrodinamica dovuta al moto oscillatorio della superficie del fluido, detta "di sloshing" o "convettiva";
- pressione idrodinamica dovuta alla flessibilità delle pareti del serbatoio, detta "flessibile".

I serbatoi si caratterizzano geometricamente tramite il rapporto di forma $s = H/R$, dove H è l'altezza di riempimento e R il raggio del serbatoio; in particolare, i modi convettivi- masse e frequenze modali- dipendono esclusivamente dalla geometria del serbatoio (Fig. 2.2).

I serbatoi atmosferici a tetto galleggiante sono considerati strutture tozze, con s compreso tra 0,3 e 1,5 circa. Per tali valori di s , la componente flessibile della sovrappressione idrodinamica non è significativa, mentre la componente convettiva non può essere trascurata, come dimostrano i rapporti tra massa convettiva m_{ci} (con $i = 1,2,3$) e massa liquida totale m_L , che risultano confrontabili con il rapporto m_i/m_L , dove m_i rappresenta la massa impulsiva (Fig. 2.2a).

Housner [5] propone per primo un modello semplificato equivalente a due masse concentrate per il calcolo degli effetti idrodinamici su un serbatoio rigido (Fig. 2.3): la massa impulsiva M_0 , posta ad una altezza h_0 , si muove solidalmente con il serbatoio aumentando l'inerzia della struttura, mentre la massa convettiva M_1 è connessa al serbatoio tramite una molla all'altezza h_1 , dove M_1 è la massa corrispondente al primo modo di vibrare del fluido.

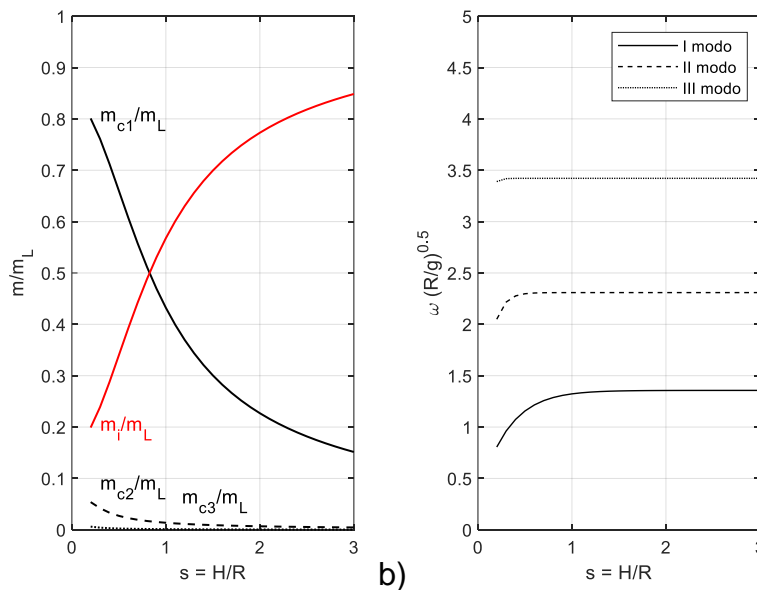


Figura 2.2: a) Rapporti di massa convettivi e impulsivo, b) Frequenze convettive adimensionalizzate

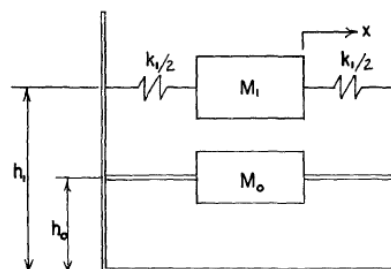


Figura 2.3: Modello meccanico a masse concentrate [5]

Mantenendo l'approccio a masse concentrate, altri autori hanno sviluppato modelli per serbatoi flessibili [6]–[8], ovvero tenendo in conto la flessibilità delle pareti del serbatoio.

2.2 Tipologie di danneggiamento

Le tipologie di danneggiamento di un serbatoio atmosferico a tetto galleggiante, a seguito di un terremoto, sono varie e dipendono dalle componenti impulsiva e convettiva del moto del fluido contenuto.

I danni riconducibili alla componente impulsiva coinvolgono principalmente gli elementi strutturali:

- Instabilità plastica del mantello, o deformazione a zampa d'elefante. Le tensioni circonferenziali, unitamente a quelle verticali di compressione, crescono fino a che, in prossimità del fondo, non si produce una instabilità locale.
- Instabilità elastica del mantello, o deformazione a diamante. La tensione verticale supera il valore critico dello sforzo verticale.
- Sollevamento del fondo e sue conseguenze, quali rottura del cordone di saldatura tra il fondo ed il mantello in serbatoi non ancorati, rottura in corrispondenza dell'ingresso/uscita di tubazioni.

La componente convettiva, invece, è responsabile dei danni alla parte superiore del mantello e al tetto del serbatoio, quali deformazioni eccessive, inclinazione e affondamento del tetto. In particolare, la crisi del tetto galleggiante e, soprattutto, degli elementi non strutturali ad esso connessi (es.: sistema di tenuta del tetto, sistemi di smaltimento delle acque meteoriche, sistemi di sicurezza), può provocare perdita di sostanze pericolose-inquinanti ed infiammabili- con possibile innesco di incendi ed esplosioni; oltre che per la combustione di sostanze sversate, un incendio può innescarsi a partire dagli urti ripetuti tra tetto galleggiante e mantello.

Pertanto, i danni connessi alla componente convettiva del moto del fluido sono quelli maggiormente coinvolti in incidenti che possono divenire rilevanti. Secondo uno studio [9] relativo agli incidenti avvenuti negli anni 1981-1995 nei serbatoi di stoccaggio atmosferici a tetto galleggiante di grande capacità (diametro ≥ 40 m), le criticità riscontrate hanno riguardato rilasci di idrocarburi liquidi sul tetto e nel bacino di contenimento, affondamento del tetto galleggiante e incendi in corrispondenza della tenuta del tetto, sul tetto e nel bacino di contenimento. Tali incidenti, che si possono verificare anche in assenza di terremoto- per sovra riempimento, guasti al drenaggio acqua piovana, pioggia intensa, guasti ai cassoni di galleggiamento, fulmini, elettricità statica, hanno maggiore probabilità di accadimento in presenza di sisma, a causa del moto del fluido e del tetto galleggiante.



Figura 2.4: Incendio e affondamento del tetto galleggiante

3 Normativa di riferimento

Per gli stabilimenti industriali, in Italia si applicano le disposizioni contenute nel D.M. del 17.01.2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, la cui Circolare del 21.01.2019 individua i componenti non strutturali che richiedono una valutazione sismica. In generale, si richiede una maggiore priorità di adeguamento sismico per i sistemi che presentano un’elevata vulnerabilità, una grande importanza, un basso costo di adeguamento sismico e una limitata interruzione dei servizi necessaria per portare a termine l’adeguamento (Tabella C8.7.6.3.I).

La progettazione dei serbatoi in Italia fa riferimento alle NTC 2018 ed anche agli Eurocodici. Per i serbatoi di stoccaggio le verifiche possono essere eseguite secondo l’EC 8-4 o secondo le API Std 650. Altre norme degne di nota e utilizzate a livello internazionale sono le indiane IITK-GSDMA “Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks”, e le neozelandesi “New Zealand Recommendations Seismic Design of Storage Tanks”.

In questo lavoro sono approfonditi i modelli proposti dalle API Std 650 e dall’EC8-4.

L’EC8-4 propone un modello meccanico a masse concentrate che tiene conto sia della componente impulsiva che convettiva del moto del fluido, ed anche di una componente di interazione fluido-struttura nel caso di serbatoio a pareti flessibili. La norma fornisce sia le espressioni analitiche per il calcolo della pressione idrodinamica agente sul mantello e sulla base, sia il modello semplificato proposto in [8] per il calcolo del taglio alla base e del momento ribaltante, valido nel caso di serbatoio a pareti flessibili. Infine, la norma prevede anche la modifica delle caratteristiche dinamiche dovuta all’interazione suolo-struttura, ovvero aumento del periodo di vibrare impulsivo e dello smorzamento totale della struttura. Le verifiche di sicurezza riguardano l’instabilità del mantello, lo scorrimento e il sollevamento del fondo e il franco libero, che deve essere superiore alla massima altezza dell’onda di sloshing.

Gli Standards API 650, nell’Appendice E, propongono una procedura semplificata per la progettazione dei serbatoi basata sul metodo delle tensioni ammissibili: la procedura prevede l’applicazione di forze statiche equivalenti al sisma di progetto ad un modello meccanico a masse concentrate. L’azione impulsiva presenta smorzamenti dell’ordine del 5%, l’azione convettiva ha smorzamento ridotto allo 0,5%. Per ciascuna delle due componenti vengono fornite direttamente le espressioni per il calcolo del taglio alla base, del momento ribaltante e delle tensioni sul mantello. In questo caso, le verifiche di sicurezza riguardano trazione e compressione massima agenti sul mantello, sollevamento del fondo e franco libero.

Le prescrizioni antisismiche dei codici normativi riguardano la sicurezza del mantello e del fondo, legata prevalentemente alla dinamica impulsiva del fluido; il moto convettivo è esplicitamente considerato solamente in termini di massima altezza dell’onda di sloshing. Sono assenti indicazioni progettuali e di verifica per sisma sia per tetto galleggiante che per gli elementi non strutturali ed i sistemi di sicurezza.

3.1 Applicazione al caso studio

Dato il serbatoio di stoccaggio olio a tetto galleggiante, la cui geometria è riportata in tab. 3.1, sono state svolte le verifiche di sicurezza così come indicato dai codici EC8-4 e API 650, utilizzando gli spettri di risposta in Fig. 3.1.

raggio	22.50 m
altezza mantello	14.72 m
capacità utile serbatoio	20000 m ³
spessore medio mantello	14.96 mm
spessore lamiera di fondo	9.35 mm
modulo elastico acciaio	200 GPa
tensione di snervamento acciaio	275 MPa
peso specifico acciaio	7860 kg/m ³
peso specifico liquido	778 kg/m ³
peso proprio copertura	1495.3 kN
peso proprio mantello	1962.1 kN

Tabella 3.1: Geometria serbatoio

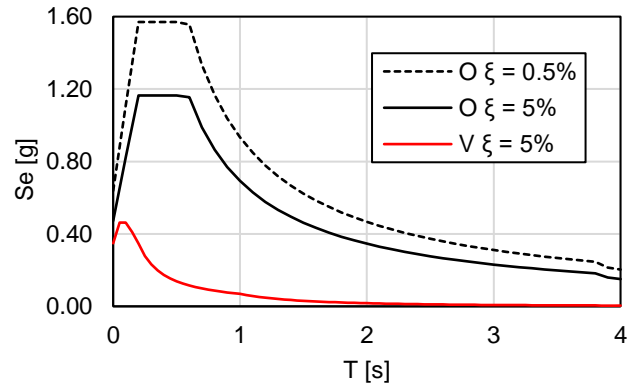


Figura 3.1: Spettro di risposta orizzontale (O) per le componenti impulsiva ($\xi=5\%$) e convettiva ($\xi=0.5\%$) e spettro di risposta verticale (V)

Le API Std 650 forniscono delle espressioni per il calcolo delle tensioni di parallelo e meridiano del mantello, l'EC8-4, invece, propone la formulazione analitica delle pressioni idrodinamiche dovute alle componenti impulsiva e convettive del liquido stoccato. Le tensioni di parallelo e meridiano secondo il modello dell'EC8-4, pertanto, sono state valutate applicando tali pressioni ad un modello agli elementi finiti: in particolare, è stato necessario valutare la sollecitazione di compressione massima nei meridiani (Fig. 3.2a) e di trazione massima dei paralleli (Fig. 3.2b).

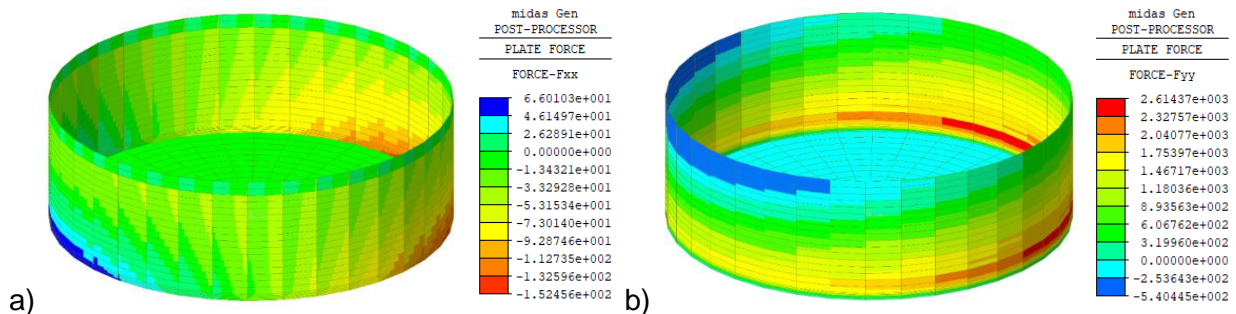


Figura 3.2: a) Sollecitazioni di compressione di meridiano b) Sollecitazioni di trazione di parallelo

Dal confronto tra i valori di taglio e momento sollecitanti alla base ottenuti applicando i due codici normativi (Tab. 3.2), emerge una notevole differenza, che dipende dalle accelerazioni associate alle componenti impulsiva e convettiva, nonché dai metodi di combinazione di tali componenti, SRSS per le API 650, somma diretta per l'EC8-4.

Come è evidente dai risultati riportati in Tab 3.2, è necessario operare una scelta consapevole del fattore di comportamento: la norma europea non consente l'utilizzo di fattori superiori al valore di 1,5, mentre le API Std 650 assegnano un fattore 3,5. Per tale motivo, l'EC8-4 risulta essere a favore di sicurezza, mantenendo il comportamento del componente in campo elastico.

Le verifiche sul mantello, riportate in Tab. 3.3 sottoforma di rapporti capacità/domanda, sebbene risultino ampiamente soddisfatte secondo entrambe le normative, non sono direttamente confrontabili per via della diversa formulazione dell'espressione da verificare.

fattore di comportamento	API 650		EC8-4	
	impulsivo	convettivo	impulsivo	convettivo
	3.5	2	1.5	1
accelerazione O (g)	0.449	0.100*	1.047	0.100*
accelerazione V (g)	0.316		0.313	
taglio (kN)	25955.7		68703.0	
momento (kNm)	136996.9		382484.3	

Tabella 3.2: Confronto tra le azioni sollecitanti (*l'accelerazione orizzontale associata alla componente convettiva non può essere inferiore a 0.1 g)

	API Std 650	EC8-4
instabilità elasto-plastica	-	10.1
instabilità elastica	-	7.7
compressione massima	6.0	-
trazione massima	4.9	-

Tabella 3.3: Rapporti di verifica capacità/domanda

4 Interazione fluido-tetto galleggiante

Prima degli anni '50, il tetto galleggiante veniva considerato come elemento non strutturale ed il suo contributo alla risposta si limitava ad un incremento dello smorzamento; tutta la progettazione si basava sulle teorie proposte da Jacobsen [10] e Senda e Nakagawa [11] per serbatoi cilindrici. In Nakagawa [12] il tetto viene modellato come una piastra rigida priva di massa e viene applicata la teoria del potenziale lineare per risolvere il problema di interazione fluido-tetto. Successivamente, in Sakai et al [13] il tetto viene modellato con una piastra elastica con massa, rimanendo ancora nell'ambito della teoria del potenziale elastico. Altri autori si sono poi occupati degli aspetti non lineari del problema [13][14].

In Matsui [16] il tetto galleggiante a doppio pontone è modellato con una piastra elastica isotropa con massa e rigidità uniformi. In Matsui [17] il tetto galleggiante a singolo pontone è modellato con una piastra isotropa elastica a massa e rigidità costanti nella zona centrale e una trave al bordo di rigidità più elevata. Entrambe le formulazioni proposte in [15][16] si inquadrano nella teoria del potenziale lineare.

4.1 Applicazione al caso studio

Dato il serbatoio presentato al paragrafo 3.1, sono state ipotizzate le tre configurazioni presentate in Fig. 4.1 e, con le ipotesi di pareti rigide del serbatoio, fluido non viscoso, incomprimibile e irrotazionale, sono state applicate le formulazioni proposte in [15][16].

Dati i periodi di vibrare convettivi del fluido e del sistema fluido-tetto (Fig. 4.2a), è noto che presenza del tetto non altera il primo modo convettivo del fluido, indipendentemente dalla rigidità; pertanto, è ragionevole trascurare la presenza del tetto galleggiante in problemi che coinvolgono prevalentemente aspetti strutturali del serbatoio. I periodi di vibrare superiori al primo, invece, dipendono principalmente dalla rigidità del tetto galleggiante.

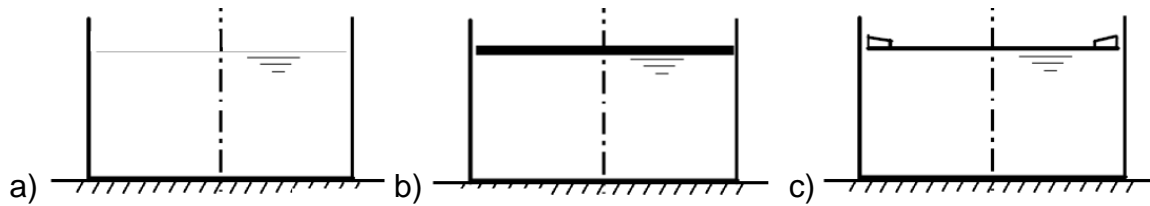


Figura 4.1: a) Serbatoio a superficie libera, b) Serbatoio con tetto galleggiante a doppio pontone c) Serbatoio con tetto galleggiante a singolo pontone

Assegnato l'accelerogramma alla base corrispondente al terremoto dell'Irpinia del 1980 in direzione orizzontale, gli spostamenti e le sollecitazioni del tetto galleggiante nelle due configurazioni sono riportate in Fig. 4.2.

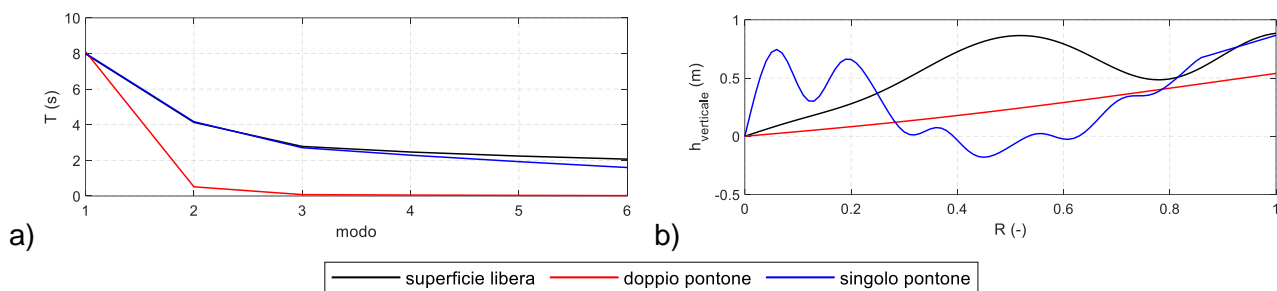


Figura 4.2: a) Periodi dei modi di vibrare, b) Spostamenti verticali

Per quanto riguarda lo spostamento convettivo massimo al bordo, non si evidenziano significative differenze fra i tre casi (Fig. 4.2b), ad eccezione del tetto a doppio pontone che, data la sua rigidità, mitiga la massima altezza dell'onda di sloshing.

Nel caso di tetti flessibili, come il tetto a singolo pontone in Fig 4.2b, si possono verificare, però, grandi deformazioni, con la conseguente crisi del pontone stesso e degli elementi non strutturali ad esso connessi, primi fra tutti il sistema di tenuta e i dispositivi di sicurezza.

A conferma dei risultati ottenuti, alcuni autori si sono occupati di questo aspetto: in Goudarzi et al [15] il secondo modo di sloshing induce deformazioni verticali fuori piano della piastra interna di un tetto a singolo pontone, che comporta una contrazione del tetto stesso in direzione orizzontale, causando deformazioni ellittiche del pontone; in Yamauchi et al [14] si considerano il comportamento non lineare del primo modo di sloshing e le grandi deformazioni del tetto a singolo pontone dovute secondo modo.

5 Sistemi di gestione e mitigazione del rischio sismico

La riduzione del rischio sismico si può ottenere mediante adeguamento/miglioramento secondo normativa e/o tramite monitoraggio strutturale [18]. Nel primo caso, possono essere svolti interventi tradizionali o innovativi di protezione sismica passiva. Gli interventi di tipo innovativo si sono dimostrati nel tempo utili ed efficaci per diversi tipi di costruzioni civili (edifici, grattacieli, ponti ecc.), e negli ultimi anni sono stati applicati anche in campo industriale, a seguito di studi condotti sul tema [2][19]–[21].

Nei casi in cui l'adeguamento o il miglioramento non consentano di raggiungere il livello minimo di sicurezza richiesto (costi elevati, impossibilità di interruzione di attività, realizzazione complessa), è opportuno realizzare il monitoraggio degli elementi critici. Il monitoraggio strutturale ha come obiettivo il "controllo dello stato di salute" della costruzione, tramite la registrazione in tempo reale di grandezze che caratterizzano la struttura; si avvale di strumenti di misura, come trasduttori di spostamento, estensimetri, inclinometri, accelerometri, sensori per la fuoriuscita di sostanza, misuratori di livello di riempimento [22].

Generalmente, già in condizioni di esercizio le componenti industriali sono monitorate; pertanto, arricchendo la rete sensoristica presente con strumenti SMART [23], sia contactless che installati direttamente sulla struttura in punti di interesse, è possibile realizzare un monitoraggio della risposta strutturale anche in caso di sisma.

Tale sistema di monitoraggio del rischio sismico, se integrato con sistemi automatici di segnalazione del pericolo nel caso in cui una o più grandezze di controllo superino determinate soglie di sicurezza, consente la realizzazione in sito di un Earthquake Early Warning System (EWW). A partire dall'avviso di pericolo emanato grazie al "sistema di allertamento precoce", è possibile avviare le procedure previste per la gestione e la mitigazione delle conseguenze degli incidenti, come l'interruzione delle attività, la chiusura delle valvole, l'attivazione dei dispositivi di sicurezza o dei sistemi di controllo attivo se presenti.

6 Conclusioni

Come sottolineato nel D.Lgs. n.105/2015, il rischio Natech da sisma non può essere trascurato durante lo svolgimento di una analisi dei rischi per stabilimenti PIR. In particolare, i serbatoi atmosferici a tetto galleggiante, impiegati per lo stoccaggio di sostanze pericolose ed inquinanti, risultano essere vulnerabili ai terremoti. Le tipologie di danneggiamento che possono dar luogo ad incidenti rilevanti, quali sversamento di sostanza pericolosa, innesco di incendi od esplosione, coinvolgono prevalentemente il tetto galleggiante e gli elementi non strutturali ad esso connessi, ovvero i sistemi di tenuta, di smaltimento delle acque meteoriche e di sicurezza. Le verifiche di sicurezza proposte dai codici normativi per la valutazione della vulnerabilità sismica di componenti industriali si concentrano sugli aspetti prevalentemente strutturali. Dall'applicazione di modelli di Letteratura per serbatoi atmosferici a tetto galleggiante, però, emerge la possibilità che il tetto subisca grandi deformazioni in presenza di terremoto, per via dell'interazione fluido-struttura tra la componente convettiva del moto del fluido, il tetto galleggiante ed il mantello. Al fine di ottenere la mitigazione del rischio sismico, è possibile sia svolgere interventi di miglioramento/adequamento che installare sistemi di monitoraggio strutturale per il controllo delle componenti critiche. Gli EEW, che si avvalgono di una rete di sensori opportunamente realizzata per il monitoraggio strutturale ad hoc per il sisma, permettono di emanare un avviso di pericolo nel caso in cui una o più grandezze di controllo superino determinate soglie di sicurezza, e, se necessario, di procedere con l'attivazione delle misure di gestione e mitigazione di incidenti rilevanti.

7 Bibliografia

- [1] M. Campedel, "Analysis of major industrial accidents triggered by natural events reported in the principal available chemical accident databases," *JRC Sci. Tech. Reports*, 2008.
- [2] F. Paolacci, R. Giannini, M. De Angelis, and M. Ciucci, "Seismic vulnerability of major-hazard industrial plants and applicability of innovative seismic protection systems for its reduction," 2009.
- [3] M. Philip E., *Aboveground storage tanks*. McGraw-Hill Education, 1997.
- [4] B. Long and B. Gardner, *Guide to Storage Tanks and Equipment*. Wiley, 2004.
- [5] G. W. Housner, "The dynamic behavior of water tanks," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 53, no. 2, pp. 381–387, 1963.
- [6] A. S. Veletsos and Y. Tang, "Rocking response of liquid storage tanks," *J. Eng. Mech.*, vol. 113, no. 11, pp. 1774–1792, 1987.

- [7] A. S. Veletsos, "Seismic effects in flexible liquid storage tanks," 1974.
- [8] P. K. Malhotra, T. Wenk, and M. Wieland, "Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks," *Struct. Eng. Int.*, vol. 10, no. 3, pp. 197–201, 2000.
- [9] "Large Atmospheric Storage Tank Fire Project: LASTFIRE Project Analysis of incident frequency survey.", 1997-2005.
- [10] B. L. S. Jacobsen, "Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 39, pp. 189–204, 1949.
- [11] K. Senda, "On the Vibration of an Elevated Water-Tank I," *Tech. Rep. Osaka Univ.*, vol. 117, pp. 247–264, 1954..
- [12] K. Nakagawa, "On the vibration of an elevated water tank II," *Tech. Reports Osaka Univ.*, vol. 5, no. 170, 1955.
- [13] F. Sakai, M. Nishimura, and H. Ogawa, "Sloshing behavior of floating-roof oil storage tanks," *Comput. Struct.*, vol. 19, no. 1–2, pp. 183–192, 1984.
- [14] Y. Yamauchi, A. Kamei, S. Zama, and Y. Uchida, "Seismic design of floating roof of oil storage tanks under liquid sloshing," 2006.
- [15] M. A. Goudarzi, "Seismic behavior of a single deck floating roof due to second sloshing mode," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 135, no. 1, pp. 1–6, 2013.
- [16] T. Matsui, "Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a floating roof under seismic excitation," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 129, no. 4, pp. 557–566, 2007.
- [17] T. Matsui, "Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a single-deck type floating roof under seismic excitation," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 131, no. 2, 2009.
- [18] G. Fabbrocino, I. Iervolino, G. Manfredi, and E. Salzano, "Seismic early warning systems: Some insights for the process industry," *Struct. Heal. Monit. Intell. Infrastruct. - Proc. 2nd Int. Conf. Struct. Heal. Monit. Intell. Infrastructure, SHMII 2005*, vol. 1, pp. 687–692, 2006.
- [19] F. Paolacci, R. Giannini, and M. De Angelis, "Seismic response mitigation of chemical plant components by passive control techniques," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 5, pp. 924–935, 2013.
- [20] M. De Angelis, R. Giannini, and F. Paolacci, "Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests," no. August 2009, pp. 377–396, 2010.
- [21] F. Paolacci, R. Giannini, M. De Angelis, and M. Ciucci, "Experimental investigation on the seismic behaviour of base-isolated steel storage tank," 2009.
- [22] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, 2007.
- [23] A. Marino, M. Ciucci, and F. Paolacci, "Smart technologies for integrated natural risk management: Innovative methodologies and remote sensing," *Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP*, vol. 8, pp. 1–7, 2017.