

Vulnerabilità Sismica di Componenti Industriali Standard: I Serbatoi in Acciaio per Combustibili

Iunio Iervolino, Giovanni Fabbrocino e Gaetano Manfredi

Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale, Università di Napoli Federico II, Italia

SOMMARIO: Le più recenti normative nazionali ed internazionali sul rischio industriale prescrivono l'obbligo di tener conto di tutti gli eventi esterni nelle analisi quantitative di rischio (QRA), terremoti inclusi. Di conseguenza, è nata l'esigenza di impostare studi e ricerche di natura interdisciplinare che coinvolgano la geofisica, l'ingegneria strutturale e l'ingegneria chimica. Il presente lavoro è un contributo alla definizione di una procedura capace soddisfare esigenze di carattere applicativo. In particolare, è presentato uno strumento per la analisi di fragilità che consente di coprire un ampio spettro di componenti industriali. Sia la capacità che la domanda sismica sono elaborate in via probabilistica, ottenendo superfici di risposta che forniscono direttamente la probabilità di collasso di serbatoi non ancorati per il deposito di combustibili. La domanda sismica, valutata mediante analisi dinamiche incrementali, fa riferimento ad un modello strutturale mono-dimensionale, ottimizzato per cogliere i fenomeni di slittamento dei serbatoi e quelli di instabilità del mantello.

ABSTRACT: National and International guidelines concerning the industrial risk require to take properly into account all main external events in Quantitative Risk Analysis (QRA), including earthquakes. The present paper is intended as a contribution to the definition of a rational and easy to manage procedure for seismic vulnerability assessment of existing industrial constructions in a probabilistic framework. Herein a tool that covers a wide range of components of the same structural type is discussed. Both seismic demand and capacity are considered as probabilistic. A regression-based method is applied to the case of unanchored steel tanks for oil storage; buckling of shell is the limit state taken into consideration; sliding of the tank as a rigid body is the main feature of the simple, but effective, dynamic model used in the analysis.

1 INTRODUZIONE

La maggiore consapevolezza riguardo al rischio sismico cui sono esposte vaste aree del nostro paese ha determinato una revisione dei consolidati rapporti tra la ricerca finalizzata alla progettazione di nuove costruzioni e quella orientata allo sviluppo di metodologie per la valutazione e la protezione del patrimonio costruito. La situazione è più complessa nel caso di installazioni e manufatti inseriti in distretti industriali nei quali si trasformano, utilizzano oppure si depositano elevati quantitativi di sostanze chimiche pericolose. In tal caso, il terremoto può rappresentare l'evento iniziatore di un malfunzionamento dell'impianto ed innescare il rilascio di sostanze nocive o provocare incendi ed esplosioni.

Molto spesso l'hazard sismico non è inserito nelle valutazioni di rischio connesso all'esercizio di un impianto industriale, il quale è valutato come la probabilità annua che, in ogni punto dell'area in osservazione, si abbia il decesso dell'individuo per effetto di un incidente. Tale analisi viene eseguita attraverso una procedura definita QRA (Quantitative Risk Analysis; LEES, 1996), che consiste nella combinazione della probabilità di accadimento di un potenziale evento incidentale e del calcolo della gravità del danno che tale incidente può provocare sull'uomo e sull'ambiente.

Il rischio connesso ad eventi sismici può essere valutato con metodologie analoghe, a patto di integrare differenti competenze come quelle della geofisica, dell'ingegneria sismica, chimica e industriale. Nel settore dell'ingegneria strutturale, un numero sempre crescente di studi mira a sviluppare strumenti snelli ed efficaci capaci di tener conto delle incertezze che condizionano le

prestazioni sismiche. La formulazione di fragilità, come probabilità di collasso, condizionata ad una misura di intensità sismica, è adatta agli scopi dell'analisi di rischio. La convoluzione di tali funzioni con le curve di pericolosità, fornisce la probabilità del sistema di raggiungere un determinato stato limite (in un dato intervallo di tempo ed in un determinato luogo) per effetto dell'azione sismica. L'ulteriore interazione di questa probabilità di guasto con l'analisi industriale di rischio (QRA) permette una valutazione quantitativa che tiene conto anche della azione sismica senza richiedere lo sviluppo di tecniche ad hoc avulse dalla migliore pratica corrente.

La fase essenziale del processo di integrazione disciplinare, che conduce alla Analisi Quantitativa di Rischio Sismico nell'Industria di Processo, consiste nell'analisi di vulnerabilità sismica delle strutture e nella interazione di questa con l'hazard sismico. Sono possibili, a questo proposito, due approcci che vanno quindi esplorati: (1) il metodo analitico basato su simulazioni numeriche che consente di analizzare con attenzione i meccanismi che determinano la performance sismica, ma la sua fruibilità ed attendibilità è legata alla capacità di modellare e di misurare le incertezze; (2) il metodo osservazionale, che si basa sull'inferenza statistica di dati relativi ad indagini di danno post-sisma, è affetto dalla impossibilità di comprendere completamente come si è sviluppato il danno e da quali condizioni al contorno è stato influenzato, oltre che dalla necessità di raggiungere una dimensione statisticamente significativa del campione di dati.

Nel presente lavoro, il tema è affrontato sulla base del primo approccio e si focalizza l'attenzione, a titolo esemplificativo, su una tipologia strutturale assai semplice, ma nel contempo molto standardizzata e diffusa, quale quella dei serbatoi in acciaio per il deposito di combustibili. Saranno in particolare discussi gli aspetti metodologici salienti, allo scopo di evidenziare le potenzialità dello strumento e la sua trasferibilità a componenti industriali differenti.

2 INDUSTRIA DI PROCESSO E RISCHIO SISMICO: LA SITUAZIONE ITALIANA

In Tabella 1 sono riportati alcuni dati che forniscono un quadro della consistenza del problema in Italia. Essa sintetizza il risultato dell'incrocio dei dati di pericolosità sismica con quelli provenienti dal censimento degli impianti a rischio industriale rilevante presenti sul territorio italiano. La classificazione sismica è quella che, emanata con l'Ordinanza 3274 (2003), contempla quattro zone caratterizzate da livelli di pericolosità decrescenti. Il censimento degli impianti è stata condotta dal Ministero dell'Ambiente come richiesto nell'ambito della direttiva Europea, successivamente recepita dallo stato italiano, comunemente denominata 'Seveso bis' (2000). Tutti i dati sono aggiornati a ottobre 2003.

L'ordinanza emanata nei primi mesi del 2003 recante la ri-classificazione del territorio, ha inciso marcatamente sul numero di impianti collocati in zona sismica portando ad un incremento del 34% rispetto alla classificazione precedente. Il numero degli impianti in zona 1, caratterizzata dalla massima pericolosità, è pari a circa il 3% del totale, mentre circa il 50% è equamente ripartito nelle zone 2 e 3.

La cartina di Tabella 1 riporta i dati complessivi per ciascuna regione. Si osserva una significativa concentrazione di impianti a rischio nel nord, Piemonte, Lombardia, Veneto ed Emilia Romagna; più contenuti sono i valori assoluti in altre regioni del sud e del centro come la Sicilia, la Campania, il Lazio. Osservando la ripartizione degli impianti nelle differenti zone sismiche è facile riconoscere che limitatamente alle regioni del nord Italia, la maggior parte degli impianti ricadono in zona 4, a bassa sismicità (Piemonte 92% e Lombardia 83%); l'Emilia Romagna e il Veneto si distinguono per il 75% degli impianti localizzate in zona 3.

Meno confortanti sono i dati relativi alla Campania, alla Sicilia e alla Calabria. Quest'ultima rappresenta la realtà più complessa: a fronte di un numero di impianti non particolarmente elevato, infatti, si rileva che il 77% degli impianti (10 su 13) sono collocati in zona 1. Per la Campania e la Sicilia, invece, i problemi nascono dalla presenza diffusa di impianti in zona 2. La successiva Tabella 2 riporta i dati riferiti agli impianti di deposito di combustibili, oggetto del presente lavoro. Come si vede, le osservazioni fatte in generale per tutte le categorie di impianti possono essere estese anche alla tipologia in esame.

Tabella 1. Situazione italiana degli impianti a rischio di incidente rilevante in zona sismica (2003)

Regione	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Abruzzo	0	11	10	0
Basilicata	1	3	2	0
Calabria	10	3	0	0
Campania	4	67	3	0
Emilia Romagna	0	22	74	2
Friuli	6	12	12	10
Lazio	0	39	38	4
Liguria	0	4	8	23
Molise	1	1	3	0
Puglia	0	11	26	13
Sicilia	0	67	0	2
Toscana	0	38	11	10
Umbria	4	9	5	0
Veneto	0	3	38	49
Valle D'Aosta	0	0	0	5
Trentino Alto Adige	0	0	8	12
Piemonte	0	1	8	108
Marche	0	14	0	0
Lombardia	0	2	42	218
Sardegna	0	0	0	47

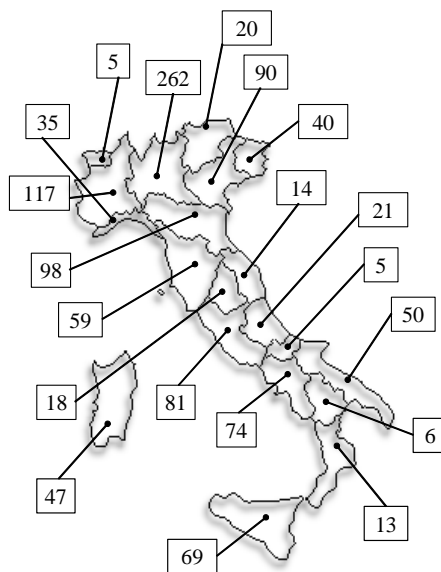
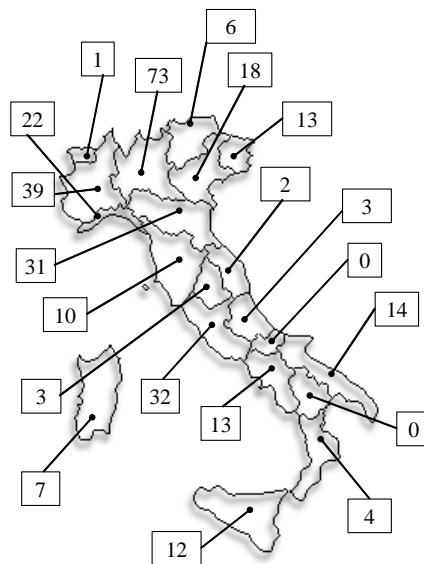


Tabella 2. Impianti di deposito di oli minerali a rischio di incidente rilevante in zona sismica (2003).

Regione	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Abruzzo	0	0	3	0
Basilicata	0	0	0	0
Calabria	3	1	0	0
Campania	0	13	0	0
Emilia Romagna	0	5	24	2
Friuli	1	4	4	4
Lazio	0	6	22	4
Liguria	0	3	4	15
Molise	0	0	0	0
Puglia	0	5	7	2
Sicilia	0	11	0	1
Toscana	0	6	4	0
Umbria	1	2	0	0
Veneto	0	1	5	12
Valle D'Aosta	0	0	0	1
Trentino Alto Adige	0	0	2	4
Piemonte	0	0	4	35
Marche	0	2	0	0
Lombardia	0	0	15	58
Sardegna	0	0	0	7



3 LA VULNERABILITA' SISMICA

La vulnerabilità sismica degli impianti industriali è stata tradizionalmente desunta dall'osservazione dei danni inflitti, dai terremoti passati, a strutture riconosciute come appartenenti ad una stessa tipologia. Questo approccio può essere condizionato dalla limitata disponibilità di dati significativi per l'analisi; soggettività nell'assegnazione dello stato di danno; impossibilità di distinguere l'influenza di ciascun possibile modo di danno sul collasso; difficoltà nel valutare l'influenza sul danno delle condizioni al contorno quali stato di manutenzione dell'opera o condizioni di fondazione; non agevole deduzione dell'influenza di parametri dimensionali o strutturali. Questi problemi osservati anche nell'analisi di vulnerabilità sperimentale dei serbatoi in acciaio (Iervolino, 2003), portano di solito ad un'elevata dispersione delle fragilità osservazionali e quindi ad una scarsa interpretabilità e fruibilità dei risultati.

Appare opportuno, quindi, riferirsi ad un'analisi di fragilità che permetta di ovviare a molti dei problemi descritti. Essa richiede un significativo sforzo computazionale e di modellazione.

L'obiettivo è la valutazione della probabilità di collasso, intesa come la probabilità che la capacità strutturale sia ecceduta dalla domanda nell'arco della vita utile della struttura o comunque in riferimento ad un arco temporale di interesse, attraverso un modello matematico.

Nel caso di collasso per effetto dell'azione sismica, la stima quantitativa di rischio si può condurre nella forma seguente, estensione del teorema delle probabilità totali ai problemi d'ingegneria:

$$P_f = \Pr[C \leq D | D = d] \Pr[D = d | IM] \Pr[IM = im] \quad (1)$$

In particolare nella Equazione (1) si è assunto che la domanda D sia dipendente da una misura di intensità sismica mentre non lo è la capacità C .

Siccome $\Pr[IM = im]$ non è altri che la caratterizzazione probabilistica della pericolosità, risultato di un Probabilistic Seismic Hazard Analysis, l'attenzione dal punto di vista strutturale va posta sulla valutazione della fragilità che si può definire assemblando i termini dell'equazione (3) come:

$$P_{f|im} = \Pr[C \leq D | D = d] P[D = d | IM = im] = \Pr[C \leq D | IM = im] \quad (2)$$

Dove IM è la misura d'intensità sismica capace di caratterizzare la risposta della struttura.

E' utile osservare che la vulnerabilità analitica risolve molti dei problemi da cui è affetta la fragilità osservazionale, ma ne pone contemporaneamente di nuovi e non meno importanti: la significatività del risultato è fortemente legata alla qualità dei modelli meccanici che esprimono capacità e domanda ed alla disponibilità di informazioni sulle incertezze che entrano in gioco in essi. Inoltre, per quanto riguarda gli impianti industriali, l'analisi di affidabilità implica un numero di problemi differenti se confrontati alla valutazione del rischio sismico di edifici comuni: (1) gli stati limite strutturali di interesse sono quelli che inducono il rilascio di materiali pericolosi, perciò è necessario modellare tutti quei meccanismi di danno e soli legati a questi effetti; (2) non è quasi mai possibile trattare il componente da solo, ma va sempre visto come parte di un sistema di componenti interconnessi fisicamente; (3) spesso non sono disponibili modellazioni meccaniche e/o dinamiche adatte all'analisi della richiesta sismica o della capacità.

4 AFFIDABILITÀ SISMICA DI COMPONENTI INDUSTRIALI STANDARDIZZATI

Le funzioni di fragilità possono essere usate per un ampio spettro di strutture, della stessa tipologia strutturale, se la dipendenza dei fattori che definiscono la risposta è incorporata nella probabilità di collasso. Il Metodo della Superficie di Risposta può essere utile in tal senso; esso è stato originariamente sviluppato per la valutazione statistica della relazione tra variabili che influenzano presumibilmente il risultato e l'osservazione sperimentale (Khuri e Cornell, 1996). Nell'affidabilità strutturale, la RS può essere usata per interpolare un set di dati, come la capacità sismica di una struttura, con una funzione polinomiale approssimata (Yao e Wen, 1996). In questo caso, l'obiettivo della procedura è la stima della funzione limite della struttura (Guen e Melchers, 2000), e la conseguente valutazione della probabilità di collasso come First Order Reliability Method (FORM) o Metodi di Simulazione di tipo Montecarlo. Un approccio alternativo si basa, invece, su di una pianificazione preliminare degli esperimenti avente come finalità la definizione di una regione d'interesse del dominio definito dai parametri aleatori di riferimento e richiede la valutazione di una curva di fragilità per ogni punto del piano sperimentale. La regressione dei dati così ottenuti conduce direttamente alla probabilità di collasso, ancora una volta attraverso una funzione polinomiale.

Nel presente lavoro, si fa esplicito riferimento a questo secondo approccio, opportunamente modificato e ottimizzato per la specifica applicazione, analogamente a quanto proposto nelle linee-guida FEMA 350. Il nucleo della procedura è la simulazione del comportamento dinamico (sismico) della struttura; esso può essere adattato e rifinito per qualsiasi sistema modificando il modello dinamico.

Le incertezze aleatorie ed epistemiche del fenomeno sono tenute in conto a due differenti livelli. Le variabili aleatorie sono suddivise in due gruppi: quelle che influenzano la capacità $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ e quelle che influenzano la domanda $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$. Il primo vettore \bar{Y} è caratterizzato da variabili aleatorie; il secondo \bar{X} è composto da variabili quali le dimensioni strutturali e la forma degli elementi la cui incertezza è di natura epistemica. Si assume che una particolare realizzazione del vettore \bar{X} definisca una specifica struttura. Si effettua una valuta-

zione affidabilistica per ogni struttura, così si possono ottenere e combinare le distribuzioni probabilistiche stimate per la domanda e per la capacità. Un'ottimizzazione del processo si può perseguire indirizzando le scelte dei parametri più importanti per la superficie di risposta attraverso il cosiddetto 'engineering judgement'. I campi di variazione delle variabili nelle analisi (come estensione di un piano fattoriale completo 2^k) si possono stabilire in riferimento alla stima della distribuzione del secondo ordine nell'area geografica d'interesse. Nelle applicazioni del metodo della superficie di risposta all'ingegneria sismica, le analisi dinamiche non lineari sono del tutto equivalenti agli esperimenti cui il metodo della RS fa riferimento (Franchin et al., 2003).

4.1 La procedura

La valutazione della vulnerabilità sulla base della procedura proposta si fonda sui seguenti passi: (1) definizione preliminare della formulazione della capacità per ciascun modo di collasso tenuto in considerazione; (2) selezione e caratterizzazione probabilistica dei parametri aleatori da considerare nella costruzione del piano degli esperimenti; (3) analisi dinamica al passo effettuate in base al piano degli esperimenti; (4) combinazione della capacità probabilistica con la domanda per determinare la curva di fragilità per ciascuna configurazione; (5) regressione dei parametri della fragilità, media e dispersione, attraverso un polinomio nello spazio dei parametri affetti da incertezza di natura epistemica.

I campi di variazione dei parametri strutturali che influenzano la domanda sono definiti in accordo con le informazioni e dati disponibili. Nella presente applicazione, è stato definito un piano sperimentale ortogonale 2^k con l'aggiunta di punti $\mu \pm 3\sigma$. Ogni punto corrisponde ad una particolare configurazione strutturale, e definisce una struttura (Figura 1.a).

La caratterizzazione probabilistica della capacità va eseguita per ogni meccanismo di collasso atteso e/o considerato. La maniera più efficiente per conseguire tale scopo è la definizione di una funzione della capacità, da implementare in una procedura di simulazione come l'analisi Montecarlo.

$$\forall d_i \in [a, b]: f_{Y_1}(y_1), f_{Y_2}(y_2), \dots, f_{Y_n}(y_n) \rightarrow \text{Montecarlo} \rightarrow P[C < D | D = d_i] \quad (3)$$

Nell'equazione (3) C è la capacità associata ad un dato stato limite, Y_1, Y_2, \dots, Y_m sono le variabili aleatorie (parametri locali) che la influenzano.

Per la stima della domanda, devono essere condotte delle analisi dinamiche non lineari. L'input sismico necessario a tale tipo di analisi può essere desunto dalle registrazioni di eventi sismici storici, oppure generato per via numerica in modo da garantire la conformità ad uno spettro prefissato (accelerogrammi spettro-compatibili).

Nel caso in cui siano impiegate registrazioni di eventi sismici reali, alcuni elementi vanno tenuti in debito conto per nella fase di selezione degli accelerogrammi. Infatti, vanno selezionati accelerogrammi di tipo far field, con distanze dalla rottura della faglia superiori a 15 km allo scopo di ridurre effetti di direttività ed impulsi (Iervolino e Cornell, 2004). Occorre fare riferimento a sottosuoli rigidi per evitare effetti di sito ed utilizzare registrazioni effettuate in campo libero, ovvero in strutture con un numero di piani non superiore ad uno. E' opportuno evitare il ricorso a più registrazioni dello stesso evento, allo scopo di non introdurre del biasing nella stima della domanda e va controllato che gli spettri non siano affetti da amplificazioni indesiderate. E' appena necessario evidenziare che in presenza di informazioni dettagliate sul sito di interesse, alcune delle precauzioni segnalate possono essere evitate.

Si può realizzare una semplice regressione della domanda sismica per ciascuna configurazione variando l'input sismico scalando l'ordinata spettrale valutata in corrispondenza del periodo fondamentale della struttura. In questo modo può essere istituita limitatamente ad un dato intervallo una relazione tra la domanda e un parametro macrosismico (accelerazione spettrale).

Il passo successivo è la definizione della distribuzione di probabilità della domanda. Più in dettaglio, per ciascuna delle misure di intensità sismica, si scalerà il valore in funzione di una data IM in modo da stimare la domanda a quel livello con il valore minimo di varianza. Successivamente vanno effettuate tante analisi dinamiche non lineari quanti sono i livelli di IM selezionati. In questo modo si possono stimare nel modo migliore la domanda mediana e la sua varianza. Per la domanda si può assumere una distribuzione lognormale o di qualsiasi altro tipo validando l'ipotesi adottata attraverso opportuni test (per esempio attraverso il test di Kolmogorof-Smirnov).

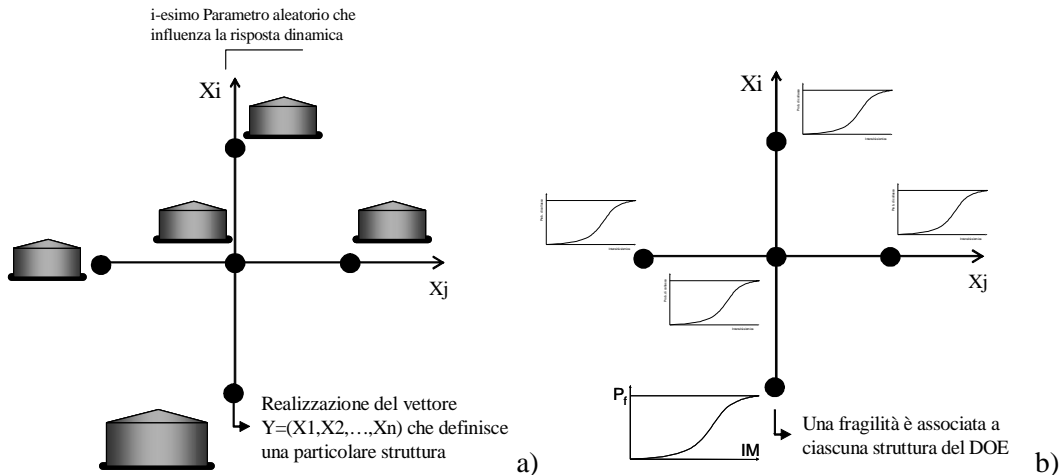


Figura 1. Il piano degli esperimenti (a) e fragilità del piano degli esperimenti (DOE) (b).

Effettuando incrociando capacità e domanda nell'intervallo di interesse per IM è possibile ottenere la curva di fragilità.

I passi 1 e 2 sono ripetuti per ciascuna configurazione strutturale contemplata nel piano degli esperimenti, in modo da generare una curva, Figura 1.b, per ciascuna realizzazione del vettore X . La disponibilità delle curve di fragilità per ciascuna delle configurazioni considerate nel piano degli esperimenti consente di regredire i dati disponibili in termini di mediana e dispersione; nel presente studio si è fatto riferimento a funzioni polinomiali come un modello del secondo ordine del tipo:

$$Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=2}^m \beta_{ij} X_i X_j \right]_{i < j} \quad (4)$$

dove Z è la risposta approssimata; X_1, X_2, \dots, X_m sono le variabili, che si ipotizza influenzino la risposta, e $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ sono i coefficienti stimati.

5 APPLICAZIONE AI SERBATOI IN ACCIAIO

I serbatoi in acciaio sono quasi eguali in tutto il mondo, essi differiscono l'un l'altro solo per le dimensioni e dettagli costruttivi. Le normative internazionali, infatti, suggeriscono procedure semplificate per il progetto dello spessore del mantello sotto l'azione di carichi essenzialmente gravitazionali. Altri codici normativi propongono calcoli più raffinati, ma sono generalmente di recente emanazione e quindi di minimo impatto sui manufatti esistenti (Iervolino, 2003).

Il collasso dei serbatoi, oppure il danneggiamento per effetto delle azioni sismiche, può determinare rilascio del contenuto, innescando esplosioni o incendi anche di grandi proporzioni, com'è avvenuto recentemente in occasione del terremoto di Hokkaido dello scorso settembre. Tra i differenti tipi di danno che possono sofferti dai serbatoi in acciaio, il più comune è l'instabilizzazione del mantello avente la caratteristica forma a piede di elefante (elephant foot buckling, EFB); nel caso dei serbatoi non ancorati, poi, è frequente lo scorrimento del serbatoio rispetto alla fondazione. Esso è causato dal momento ribaltante che agisce alla base del serbatoio dovuto allo sbattimento del liquido all'interno della struttura (sloshing).

5.1 Risposta dinamica e formulazione della capacità

La risposta dinamica dei serbatoi è governata dall'interazione fluido-struttura. Il meccanismo primario che si innesca è lo sloshing della porzione di fluido collocato immediatamente al di sotto del pelo libero; essa ha periodo diverso dalla parte di fluido profondo. E' possibile, attraverso apposite correlazioni definire l'entità della cosiddetta massa impulsiva (solidale con il serbatoio) e della massa convettiva (interessata dallo sloshing), nonché le posizioni dei centri di massa, così come mostrato in Figura 2.

I serbatoi non ancorati, poi, possono essere interessati da spostamenti relativi tra il serbatoio e la fondazione, per cui in generale due sono le variabili aleatorie di natura epistemica che influenzano la risposta strutturale sismica: il rapporto tra altezza di riempimento e raggio, H/R e il coefficiente d'attrito, f , tra il serbatoio e la fondazione.

Per l'analisi della richiesta sismica è possibile monitorare la compressione nel mantello per effetto del momento ribaltante. Le normative attuali forniscono uno stato di compressione monoassiale, mentre in realtà lo stato tensionale è biassiale includendo anche le tensioni circonferenziali; questa condizione determina una eccentricità aggiuntiva che determina un fenomeno di instabilità di tipo elasto-plastico che viene chiamato correntemente instabilità a zampa di elefante. Si può tenere conto di questo fenomeno riducendo carico critico di un fattore che dipende dalla tensione di snervamento del materiale, del rapporto tra il raggio e lo spessore del mantello e della pressione interna.

Un semplice, ma efficiente, modello per i serbatoi è stato proposto da Malhotra (2000); esso consente di ricondurre il problema tridimensionale ad una condizione equivalente monodimensionale governata dalla massa convettiva, Figura 2. In quest'ultima m_c ed m_i sono le masse convettiva ed impulsiva rispettivamente; h_c ed h_i sono le posizioni dei baricentri delle masse suindicate; k_c è la rigidezza equivalente associata alla oscillazione della massa convettiva.

Il fenomeno di slittamento dei serbatoi non ancorati rispetto alla fondazione può essere facilmente implementato nel modello di Malhotra. Infatti, è possibile assumere, conformemente al modello di riferimento, che le pareti del serbatoio siano rigide, per cui il complesso serbatoio-fluido può scorrere rigidamente rispetto alla fondazione.

Il moto relativo si innesca attraverso soglie di accelerazione sia laterale che verticale ed è retto dalle equazioni riportate in Figura 3 dove sono fornite le equazioni di equilibrio delle masse impulsiva e convettiva, essendo u_i e u_c gli spostamenti delle masse impulsive e convettive rispettivamente ed a_g è l'accelerazione del suolo.

Nelle ipotesi enunciate, il momento ribaltante è dato dalla seguente equazione:

$$OTM(t) = m_i \ddot{u}_i(t)h_i + m_c \ddot{u}_c(t)h_c \quad (5)$$

ed è possibile, risalire da questo al valore della tensione di compressione nel mantello:

$$\sigma = \frac{W_t + 1.273 |OTM / 4R^2|}{t} \quad (6)$$

dove W_t è il peso del serbatoio.

Per quanto concerne la capacità, analisi numeriche hanno mostrato l'efficacia di una equazione assai semplice, (Kim e Kim 2002) che esprime la tensione critica del mantello.

$$\sigma_{cr} = 1.19 \left(\frac{H}{2R} \right)^{-0.0256} \frac{t}{2R} E \quad (7)$$

Nella equazione (7) R è il raggio nominale del serbatoio, E è il modulo di elasticità dell'acciaio; t è lo spessore del mantello ed H è l'altezza.

5.2 Incertezze nell'analisi dei serbatoi

Le variabili aleatorie, la cui incertezza è di natura epistemica, sono il rapporto tra l'altezza di riempimento del serbatoio e il raggio (H/R) e il coefficiente d'attrito tra la piastra di base e la fondazione (f). Lo spessore del mantello è un parametro fisso date le dimensioni globali.

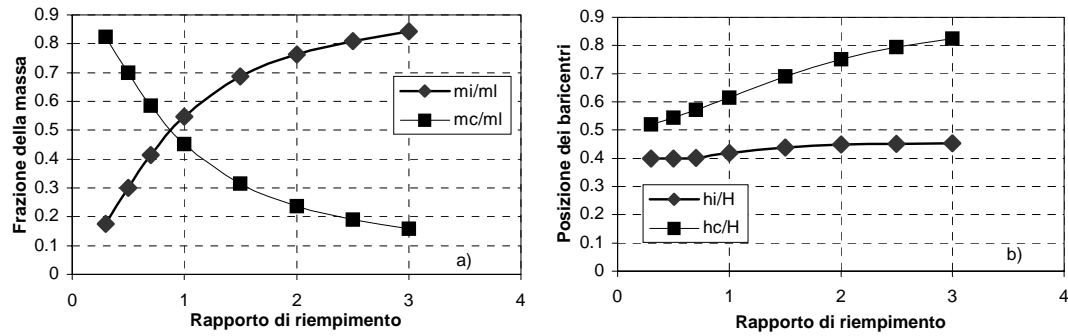
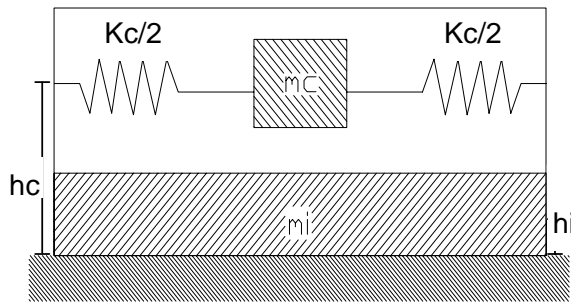


Figura 2. Masse impulsive e convettive (a) e posizione dei relativi baricentri (b) in funzione di H/R.

Un ulteriore parametro aleatorio è rappresentato dal modulo elastico dell'acciaio (E) che governa la capacità in termini di tensione critica del mantello. Vale la pena notare che le variabili assunte nella domanda sono in realtà deterministiche per la capacità. Questo avviene perché il metodo proposto risolve un problema di affidabilità per ogni serbatoio del piano sperimentale, per cui fissato il punto dello spazio degli esperimenti una particolare struttura resta definita e la variabilità epistemica annullata.



$$\begin{cases} m_c \ddot{u}_c(t) + k_c [u_c(t) - u_i(t)] = -m_c a_g(t) \\ m_i \ddot{u}_i(t) - k_c [u_c(t) - u_i(t)] = -m_i a_g(t) - \text{sgn}(\dot{u}(t)) \mu (m_i + m_c) a_g(t) \end{cases}$$

Figura 3. Modello dinamico ed equazioni del moto del serbatoio.

Nel caso di funzioni di capacità di tipo lineare come quella rappresentata dalla relazione (7), la trattazione probabilistica è particolarmente agevole; nondimeno, nel caso di funzioni più complesse è comunque possibile ricondursi ad una caratterizzazione della tensione critica di compressione attraverso metodi affidabilistici approssimati o di simulazione.

La descrizione delle variabili aleatorie considerate è riportata a sinistra nella Tabella 3.

Tabella 3. Caratterizzazione delle variabili aleatorie (sinistra) e schema degli esperimenti (destra).

Variabile aleatoria	PDF	Media	C.o.V.	Configurazione	Rapporto H/R	Coefficiente d'attrito
E (MPa)	Normale	210000	0.15	1	μ	μ
H/R	Normale	0.7	0.3	2	$\mu - 1\sigma$	$\mu - 1\sigma$
F	Normale	0.5	0.3	3	$\mu + 1\sigma$	$\mu + 1\sigma$
				4	$\mu - 1\sigma$	$\mu + 1\sigma$
				5	$\mu + 3\sigma$	$\mu - 1\sigma$
				6	$\mu + 1\sigma$	μ
				7	$\mu - 3\sigma$	μ
				8	μ	$\mu + 3\sigma$
				9	μ	$\mu - 3\sigma$

5.3 Analisi di affidabilità

Il numero minimo di esperimenti necessario per sviluppare la superficie di risposta dipende dai coefficienti del polinomio adottato per approssimare la funzione d'interesse. Il piano considerato nel presente studio è riportato a destra nella Tabella 3. Conformemente al modello proposto le proprietà dinamiche di ogni configurazione dipendono solo dai parametri dimensionali e dal livello di riempimento.

Il piano degli esperimenti costituisce una matrice di differenti configurazioni elencate nel dettaglio in Tabella 4; sono riportati: H/R rapporto tra l'altezza di riempimento e il raggio del serbatoio; m_c/M frazione convettiva del contenuto, Figura 2; m_i/M frazione convettiva, Figura 2; h_c/H e h_i/H sono le posizioni adimensionalizzate rispetto all'altezza di riempimento dei baricentri delle masse, Figura 2; T_c è il periodo di oscillazione convettivo ed f è il coefficiente di attrito.

Per ciascuna configurazione è stata eseguita una serie di analisi dinamiche non lineari. Un set di sei accelerogrammi è stato scalato in base all'accelerazione convettiva spettrale. Le registrazioni accelerometriche considerate provengono dal Pacific Earthquake Engineering Center Database (<http://peer.berkeley.edu>). L'intervallo di accelerazione analizzato va da 1 g a 2 g e coincide con l'intervallo di maggiore interesse per la vulnerabilità dei serbatoi, conformemente ai risultati ottenuti dal punto di vista osservazionale. L'intervallo di accelerazione è stato diviso in 20 punti, ogni accelerogramma è stato opportunamente scalato per essere conforme al valore considerato sull'asse delle accelerazioni, per ogni punto di cui è stato diviso l'intervallo e per ogni configurazione sperimentale di accelerazione sono state eseguite sei analisi dinamiche nell'ottica della Incremental Dynamic Analysis (Vamvatsikos e Cornell 2002).

E' stato possibile, dunque, eseguire una regressione dei parametri di fragilità della struttura come funzione della accelerazione di picco per ciascuna configurazione. Nelle Figure 4.a e 4.b i risultati delle analisi sono riportati direttamente in termini di mediana e deviazione standard della compressione nel mantello per ciascun serbatoio nel piano degli esperimenti.

La semplicità della formulazione della tensione critica σ_{cr} ha determinato una valutazione della capacità aleatoria diretta, dal momento che essa è data dalla CDF del modulo di elasticità del materiale modificato attraverso alcune costanti come mostrato in Figura 5.a.

Tabella 4. Prospetto delle configurazioni.

	H/R	m_c/M	m_i/M	h_c/H	h_i/H	T_c (sec)	f
Configurazione 1	0.840	0.52	0.48	0.59	0.41	4.95	0.5
Configurazione 2	0.588	0.65	0.35	0.56	0.40	5.47	0.35
Configurazione 3	1.092	0.42	0.58	0.63	0.42	4.65	0.65
Configurazione 4	0.588	0.65	0.35	0.56	0.40	5.47	0.65
Configurazione 5	1.092	0.42	0.58	0.63	0.42	4.65	0.35
Configurazione 6	1.596	0.29	0.71	0.70	0.44	4.53	0.5
Configurazione 7	0.084	0.99	0.01	0.49	0.39	7.39	0.5
Configurazione 8	0.840	0.52	0.48	0.59	0.41	4.95	0.95
Configurazione 9	0.840	0.52	0.48	0.59	0.41	4.95	0.05

5.4 Fragilità

Il risultato delle analisi di fragilità per ciascuna configurazione è riportato nella Figura 5.b ed è stato ottenuto approssimando i dati con una distribuzione log-normale. Si osserva una stretta dipendenza della mediana dal livello di riempimento del serbatoio fissato il raggio. In particolare più basso è il riempimento più alta risulta la soglia di accelerazione spettrale che innesca una significativa probabilità di danno. Nel caso della configurazione 7, caratterizzata da un riempimento estremamente basso ad esempio, la probabilità di collasso è trascurabile per tutto il range di accelerazione investigato.

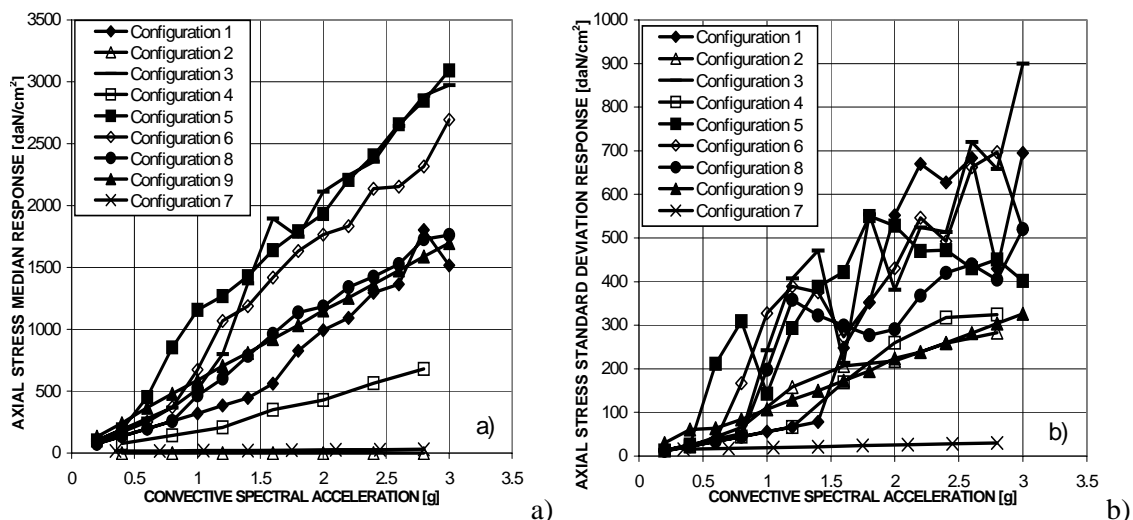


Figura 4. Mediana (a) e deviazione standard (b) della domanda sismica.

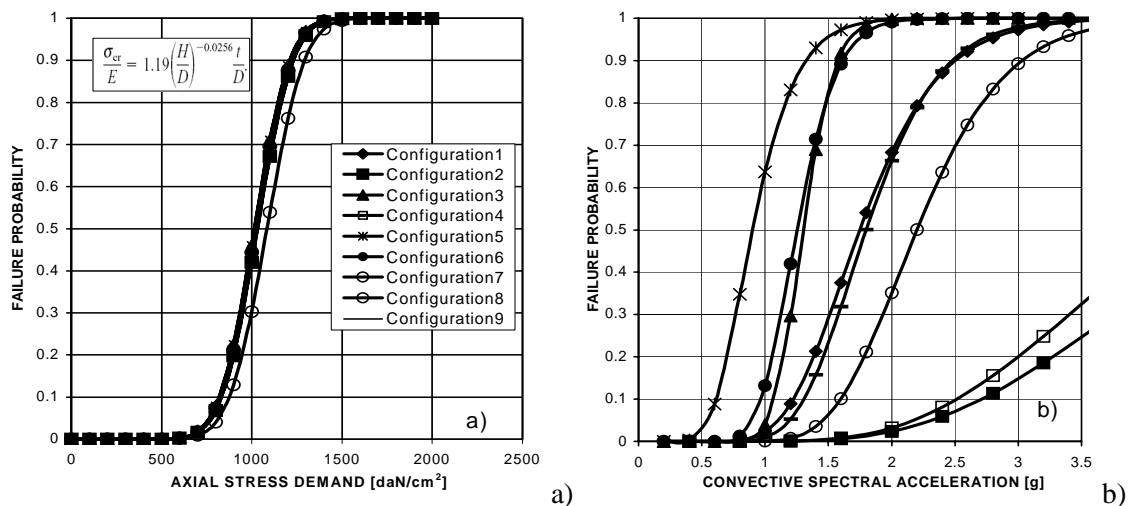


Figure 5. Capacità all'instabilizzazione del mantello (a) e fragilità per il piano degli esperimenti (b).

La fragilità dei serbatoi in funzione dei parametri che definiscono le strutture nel piano sperimentale può essere definita nel modo seguente:

$$Fragility = LN \left(\mu \left(\frac{H}{R}, f \right), \beta \left(\frac{H}{R}, f \right) \right) \quad (8)$$

in cui $\mu(H/R, f)$ e $\sigma(H/R, f)$ sono la mediana e la dispersione lognormale in funzione dei parametri che definiscono sismicamente la struttura.

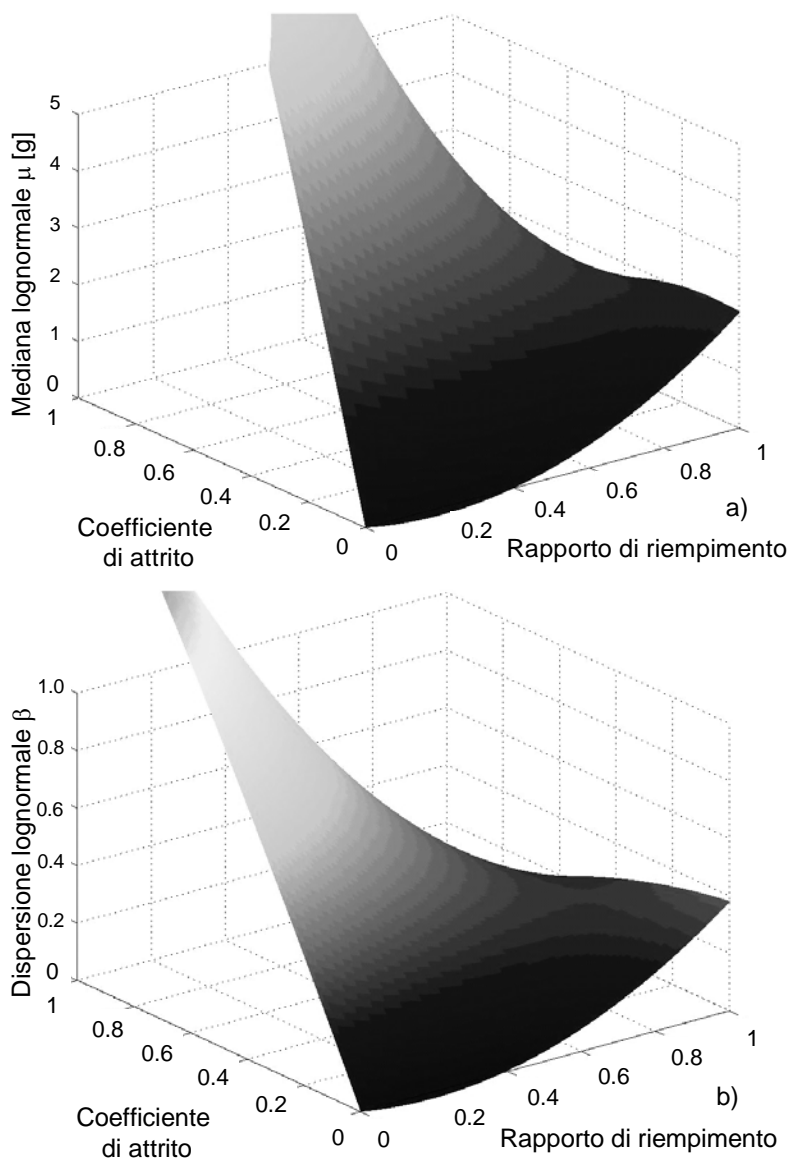


Figura 6. Interpolazione del secondo ordine per la mediana (a) e la deviazione standard (b).

La regressione delle funzioni $\mu(H/R, f)$ e $\beta(H/R, f)$ consente la stima dell'influenza dei parametri strutturali sulla mediana e sulla dispersione indipendentemente migliorando la conoscenza del fenomeno. Due polinomi completi di secondo grado sono stati ottimizzati con il metodo dei minimi quadrati per riassumere la variabilità dei dati come mostrato in Figura 6.

La superficie di risposta in termini di mediana della fragilità dimostra che la riduzione dell'attrito in fondazione corrisponde ad un incremento della vulnerabilità. Per alti livelli d'attrito invece, il serbatoio tende ad essere ancorato attesa l'ipotesi di piastra di base infinitamente rigida; di conseguenza, la vulnerabilità diminuisce sensibilmente come confermato dai dati sperimentali (Salzano et al., 2003) ed osservato nella analisi delle singole curve di fragilità ottenute. La rappresentazione dei dati in termini di dispersione aiuta a comprendere che essa è una funzione crescente dell'accelerazione mediana; questo risultato è legato al concetto, già noto per le analisi dinamiche incrementali degli edifici, per cui l'incertezza nella analisi aumenta all'aumento della intensità sismica.

6 CONCLUSIONI

La procedura proposta per l'analisi di componenti industriali standardizzati rappresenta uno

strumento efficace con notevoli caratteristiche di trasferibilità. Gli aspetti più interessanti consistono nella possibilità di applicazione a tutte le strutture che appartengono ad una categoria omogenea, come i serbatoi, con il medesimo livello di accuratezza, nella caratterizzazione probabilistica della capacità e della domanda, valutata attraverso analisi dinamiche incrementali e tenendo conto in maniera esplicita della propagazione dell'errore, nella possibilità di evidenziare l'influenza della progettazione degli esperimenti direttamente sulla probabilità di collasso. Esistono, in ogni caso, delle limitazioni, comuni a tutti i metodi basati sull'utilizzo delle superfici di risposta; i risultati discussi, inoltre, si riferiscono solamente ad una categoria specifica di serbatoi, quelli non ancorati, e sono stati ottenuti mediante una modellazione semplificata, ma ottimizzata in termini di input strutturale, onere computazionali e validazione della risposta.

RINGRAZIAMENTI

Ricerca condotta nell'ambito del Programma Quadro 2000-2002 del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), finanziato dal Dipartimento di Protezione Civile. Progetto di Ricerca VIA 'Riduzione della Vulnerabilità sismica di Sistemi infrastrutturali e Ambiente Fisico', coordinato da Gian Michele Calvi. Responsabile dell'unità di ricerca: Gaetano Manfredi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- D.lgs 334/199, 2000. *Seveso II*, Gazzetta Ufficiale n. 195.
- FEMA-350, 2000. *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*.
- Franchin P., Lupoi A., Pinto P. E., 2003. *Seismic Fragility Of Reinforced Concrete Structures Using A Response Surface Approach*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, Special Issue 1 45-77.
- Guan X. L., Melchers R. E., 2000. *A Parametric Study On The Response Surface Method*, 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, PMC2000-023.
- Iervolino I., 2003. *Analisi Quantitativa di Rischio Sismico nell'Industria di Processo*, Tesi di Dottorato in Rischio Sismico XVI ciclo, Università degli Studi di Napoli Federico II. [<http://cds.unina.it/~iuniervo>].
- Iervolino I., Cornell C.A., 2004. *Sulla Selezione degli Accelerogrammi nella Analisi Non-lineare delle Strutture*, XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova.
- Iervolino I., Fabbrocino G., Manfredi G. 2003. *A Contribution to Risk Assessment of Industrial Facilities: The Case of Oil Storage Tanks in Seismic Regions*, Journal of Earthquake Engineering (Submitted).
- Khuri A.I., Cornell J.A., 1996. *Response surfaces: Designs and Analyses*, Marcel Dekker, New York.
- Kim S., Kim C., 2002. *Buckling Strength of the Cylindrical Shell and Tank Subjected to Axially Compressive Loads*, Thin-Walled Structures 40 329-353.
- Lees F.P., 1996. *Loss Prevention in the process industries (II ed.)*, Butterworth-Heinemann, Oxford (UK).
- Malhotra P. K., Wenk T., Wieland M., 2000. *Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks*, Structural Engineering International, 3/2000.
- Salzano E., Iervolino I., Fabbrocino G., 2003. *Seismic Risk Of Atmospheric Storage Tanks in the Framework of Quantitative Risk Analysis*, Journal of Loss Prevention in the Process Industry, Volume 16, Issue 5, pp. 403-409.
- Ordinanza 20/03/2003 n. 3274 *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. (Gazzetta ufficiale 08/05/2003 n. 105)
- Vamvatsikos D., Cornell C. A., 2002. *Incremental Dynamic Analysis*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 31(3):491-514.
- Yao T.H.J., Wen Y.K., 1996. *Response Surface Method for Time Variant Reliability Analysis*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 122, n° 2.