

APPROCCIO MULTIDISCIPLINARE ALLA VULNERABILITÀ SISMICA DI TUBAZIONI E SERBATOI INTERRATI

Giovanni Lanzano, Filippo Santucci de Magistris, Giovanni Fabbrocino
*Università degli Studi del Molise – Dipartimento SAVA
Laboratorio di Dinamica Strutturale e Geotecnica StreGa*

giovanni.lanzano@unimol.it, filippo.santucci@unimol.it, giovanni.fabbrocino@unimol.it.

Ernesto Salzano

Istituto di Ricerche sulla Combustione - CNR

salzano@irc.cnr.it.

Sommario

Le strutture presenti negli impianti industriali sono estremamente complesse. Risulta importante assicurare a queste opere stringenti requisiti di sicurezza strutturale poiché, frequentemente, vengono trattate grandi quantità di sostanze tossiche e infiammabili. In particolare, le strutture di stoccaggio e trasporto di fluidi pericolosi devono essere progettate anche e soprattutto in funzione dei rischi associati alla perdita del materiale di contenimento. Si rende quindi necessario disporre di strumenti utili per la previsione e la mitigazione di possibili effetti legati a fenomeni di rotture e perdite, soprattutto a fronte di eventi naturali eccezionali come i terremoti. A tal scopo l'Unità di Ricerca Università del Molise conduce uno studio multidisciplinare nell'ambito delle Linee di Ricerca ReLUIS AT.2.2.3 e MT1.4, al fine di valutare la vulnerabilità sismica di alcuni componenti industriali, quali tubazioni, serbatoi e vasche interrato. Questa nota illustra alcuni risultati della prima parte del lavoro di ricerca.

Introduzione

Alcuni componenti degli impianti industriali vengono generalmente utilizzate per il trasporto e lo stoccaggio di sostanze liquide o aeriformi, talvolta pericolose, come acque potabili e reflue, oli e gas naturale. Talvolta queste strutture vengono interrato allo scopo di ottenere un doppio effetto benefico: in primo luogo, il confinamento laterale offerto dal terreno mitiga gli effetti sismici; in secondo luogo, gli effetti di una possibile perdita, in termini di inquinamento, incendi o esplosioni, possono essere ridotti rispetto a una struttura fuori terra.

Nonostante questi benefici, il comportamento sismico di queste strutture e componenti non sono risultate soddisfacenti durante alcuni terremoti particolarmente severi (ad esempio Northridge, 1994). Per questo motivo, la comunità scientifica e tecnologica si è assunto l'onere di effettuare corrette valutazioni della vulnerabilità sismica, con lo scopo di fornire strumenti normativi e progettuali. Ciò anche in considerazione del fatto che nella letteratura esistente e nei codici normativi sono pochissime le indicazioni relative al comportamento sismico di strutture, quali tubazioni, vasche e serbatoi interrati, per i quali la risposta dinamica è fortemente influenzata dal fluido contenuto all'interno della struttura e dalla sua interazione con la struttura stessa e il terreno circostante.

In questa nota, partendo dall'osservazione degli effetti di terremoti passati su impianti e componenti, viene proposto un breve stato dell'arte dei metodi di analisi sismica semplificata per le tubazioni e sono discussi alcuni aspetti salienti dei dati raccolti in un database ragionato basato essenzialmente su dati osservazionali.

Osservazione dei danni arrecati agli impianti industriali

Negli ultimi decenni (dagli anni 70' in poi) i danni provocati da terremoti sono stati catalogati e registrati attraverso l'osservazione diretta e l'analisi delle conseguenze a seguito dell'evento. Con riferimento agli impianti industriali, sono spesso pubblicati report post-sisma, soprattutto dopo terremoti particolarmente severi quali i terremoti di San Francisco (1908), Long Beach (1933), Loma Prieta (1978), Irpinia (1980), Northridge (1994), Kobe (1995), Chi-Chi (1999), Duzce (1999), Kocaeli (1999), L'Aquila (2009), Darfield (2010) e Maule (2010).

Northridge (1994) in California, nella città di Los Angeles, è stato uno dei terremoti più severi dal punto di vista delle tubazioni (*lifelines*) per uso industriale e civile. Lau *et alii* (1995) hanno quindi prodotto un report con numerosi dati relativi a tubazioni in acciaio per acqua e gas, che soffrono particolarmente di rotture dovute a trazione e/o compressione, instabilità, e tranciamento al passaggio di frane o faglie attive (Figura 1).



Figura 1. Meccanismi di deformazione e di rotture per le tubazioni: a) trazione/compressione; b) instabilità; c) tranciamento al passaggio della faglia.

Nello stesso report, gli autori riportano alcuni dati di danni relativi ai serbatoi fuori terra (in acciaio) per lo stoccaggio di acqua, petrolio e gas: i fenomeni di rottura includono il crollo della copertura, instabilità, rottura dell'attacco fra tubazione e serbatoio, deformazione a "elephant foot", e collasso totale del serbatoio (Figura 2).

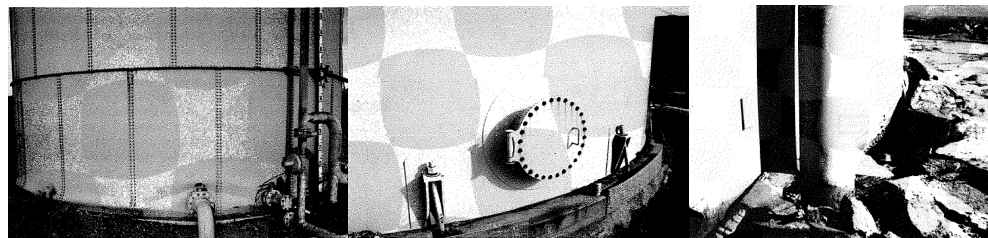


Figura 2. Meccanismi di deformazione e di rotture per i serbatoi fuori terra: a) "elephant foot buckling"; b) perdita di ancoraggio; c) sollevamento.

Dall'osservazione dei danni post-sismici alle componenti degli impianti industriali, si possono effettuare alcune considerazioni relativamente al comportamento di queste strutture.

- le strutture interrate soffrono danni minori rispetto alle corrispondenti strutture semi-interrate o fuori terra;
- il comportamento sismico migliora all'aumentare del livello di confinamento laterale;
- gli effetti del terreno su queste strutture possono essere divisi in due categorie: scuotimento del mezzo e fenomeni di rotture (liquefazione, frane e faglie attive);
- molti casi di danneggiamenti sono riferiti a strutture senza accorgimenti anti-sismici o sistemi usurati.

Approccio multidisciplinare per la vulnerabilità degli impianti industriali

Per quanto riguarda gli impianti industriali, lo studio di vulnerabilità è stato condotto su strutture per le quali l'interazione dinamica coinvolge tre distinte fasi: i) il terreno, che circonda la struttura e gli offre confinamento; ii) la struttura stessa, con le sue caratteristiche geometriche e dei materiali; iii) il fluido, che è contenuto all'interno della struttura (acqua potabile, reflua, petrolio o gas). Alcune caratteristiche tipiche delle strutture considerate sono riassunte nella Tabella 1.

<i>Lifeline</i>	<i>Uso</i>	<i>Materiali</i>	<i>Metodi di costruzione</i>
Tubazioni	Trasporto e distribuzione di liquidi o gas per scopi civili o industriali	Acciaio, materiali plastici (PVC), calcestruzzo armato	Scavo e ricoprimento al di sotto del piano campagna; per tubazioni profonde nessuno scavo; se fuori-terra alloggiate su delle selle
Serbatoi interrati orizzontali.	Stoccaggio di carburante GPL	Acciaio (prefabbricati).	Scavo e ricoprimento: possono essere disposti completamente sotto il piano di campagna o modificando il profilo del terreno
Vasche interrate e semi-interrate.	Sedimentazione e trattamento di liquidi inquinanti e residui	Calcestruzzo armato	Le vasche sono realizzate in cantiere tramite uno scavo e la realizzazione di opere di sostegno laterali e fondazione

Tabella 1. Alcuni aspetti costruttivi delle infrastrutture tecnologiche considerate.

Per ciascuna di queste strutture, i metodi di progettazioni, indicati dalle Normative Europee (EN-98), risultano semplificati e incompleti. Questo perché spesso vengono mutuati dallo studio sismico di strutture simili, per le quali le semplificazioni adottate potrebbero non esser valide per le strutture considerate.

La sotto-linea 6.4 del primo progetto ReLUI, nell'ambito della Linea 6 dedicata alle opere geotecniche, ha riguardato lo studio del comportamento sismico di alcune strutture interrate, come le gallerie metropolitane. Sono stati implementati alcuni modelli numerici di gallerie superficiali allo scopo di calibrare formulazioni semplificate per il progetto anti-sismico di queste strutture (Bilotta et al., 2007). Dall'esecuzione di prove in centrifuga su modello in scala ridotta, sono state ottenute misure fisiche dell'incremento delle sollecitazioni indotto dall'applicazione di un moto (Lanzano, 2009). Questi dati sperimentali sono stati ottenuti per creare dei case-history artificiali con cui calibrare i modelli semplificati.

Parallelamente alla Linea 6, sono state sviluppate procedure di analisi di vulnerabilità sismica per impianti industriali e in particolare di strutture di stoccaggio di materiali infiammabili (Salzano et al. 2009). A tale scopo, tutte le opere, le strutture e i componenti per uso industriale sono state raggruppate e organizzate in classi omogenee (Fabbrocino et al. 2007). Partendo dall'esperienza dei Progetti di Ricerca del precedente ReLUI, il lavoro è stato esteso anche a tubazioni e serbatoi interrati. La prima fase del lavoro viene illustrato in questa nota, con particolare riferimento alle tubazioni.

Analisi del comportamento dinamico delle tubazioni:

Il comportamento sismico delle strutture interrate è fortemente correlato al campo di spostamenti nel terreno indotti dal passaggio delle onde sismiche, nonché dalle caratteristiche intrinseche della struttura considerata e dalla sua interazione con il circostante terreno.

Dal punto di vista modellistico, il comportamento sismico di una tubazione può essere generalmente analizzato facendo riferimento a una trave elastica sottoposta a una deformazione imposta dal terreno circostante. Tre tipologie di deformazione sono indotte nella struttura interrata dal passaggio delle onde sismiche (Owen & Scholl, 1981): deformazione assiale generata dalle componenti delle onde sismiche che producono moti

paralleli all'asse della tubazione; deformazioni flettenti causate dalle componenti del moto sismico che producono un moto perpendicolare all'asse longitudinale; distorsione della sezione trasversale per effetto delle onde di taglio che si propagano normalmente all'asse della tubazione.

Lanzano (2009) descrive i metodi analitici per calcolare gli effetti indotti dal passaggio delle onde nella sezione trasversale e lungo l'asse di una galleria o tubazione. Per l'analisi sismica delle strutture interrate molto estese in direzione longitudinale, come le tubazioni, la propagazione orizzontale delle onde di volume e di superficie determina un'incoerenza spaziale del moto sismico. Infatti differenti tratti della struttura interrata non sono sottoposte alla stessa condizione di moto nello stesso istante. St. John & Zarah (1987) forniscono espressioni analitiche della massima deformazione e delle sollecitazioni massime indotte da un'onda sinusoidale che investe la struttura. Questa trattazione è stata anche recepita dalle normative europee (EN-98).

Analisi osservazionale del comportamento sismico delle tubazioni:

L'analisi di vulnerabilità sismica delle tubazioni è partita dalla raccolta sistematica e ragionata dei dati di danneggiamenti alle tubazioni, basata sui risultati ottenuti dai report post-sisma.

I dati sperimentali sono stati classificati e raggruppati in base a quattro categorie di parametri.

Parametri sismologici e geofisici

A ciascun dato di danneggiamento è stata associato un parametro sismico sintetico, in termini di accelerazione PGA e velocità PGV massima. I dati sono stati estrapolati da Shaking Map (USGS) relative al terremoto di pertinenza del danno, conoscendo l'esatta localizzazione del punto di rottura o perdita.

Parametri geotecnici

Trattandosi di opere frequentemente interrate, il comportamento durante il terremoto è fortemente condizionato dal comportamento del terreno circostante. In particolare, quando è stato registrato un danno a una tubazione, il dato è stato correlato a due possibili effetti sismici nel sottosuolo: scuotimento del mezzo (Strong Ground Shaking SGS) o fenomeni di rottura del terreno (Ground Failure GF). Per la descrizione sintetica del moto nei casi di rottura del mezzo è opportuno correlare la rottura con una deformazione permanente osservata al termine del sisma.

Parametri strutturali

Dal punto di vista strutturale è possibile classificare i dati disponibili sulle tubazioni in funzione di alcuni parametri (costruttivi, geometrici, e di esercizio):

- *Sostanza trasportata*: i dati sono stati divisi in due grandi classi: tubazioni per il trasporto di liquidi e tubazioni per il trasporto di sostanze aeriformi.
- *Tipo*: si differenzia tra tubazioni di trasmissione o di distribuzione, interrate o fuori terra;
- *Materiale*: i materiali per tubazioni sono stati divisi in duttili (acciaio, materiali plastici) e fragili (calcestruzzo rinforzato e non rinforzato), secondo la definizione Hazus (1997).
- *Tipologia di giunto*: meccanici, saldati, o di altri tipi
- *Diametro/spessore*: il database definisce tubi piccoli ($D < 150\text{mm}$) per la distribuzione, tubi di medio diametro ($D = 150\text{--}400\text{mm}$) e tubi di grande diametro ($D > 400\text{mm}$) per la trasmissione; lo spessore è generalmente legato al diametro da un rapporto costante;
- *Pressione di esercizio*: dipende dagli standard usati dal servizio nazionale ed internazionale di approvvigionamento.

Parametri prestazionali

Per ciascun dato è stato riconosciuto in indicatore della prestazione del tubo in funzione del livello di danneggiamento arrecato. Sono state utilizzate per la classificazione definizioni dei

livelli di danneggiamento mutuati da Syner-G (2009) (Tabella 3).

	Livello di danneggiamento	Descrizione del danno
DS0	Nessun danno	Nessuna perdita e/o rottura
DS1	Perdita	Perdita in almeno una sezione
DS2	Rottura	Rottura in almeno una sezione

Tabella 3. Livelli di danneggiamento per le tubazioni (Syner-G, 2009).

Database

I dati raccolti fanno riferimento a 11 differenti terremoti dal 1971 al 2001. I casi di danneggiamento raccolti sono totale rispettivamente 78 (per le tubazioni di gas) e 75 (per tubazioni per liquido, acqua o petrolio). Ciascun caso considerato può raccogliere anche più di una rottura, secondo le indicazioni della Tabella 3. Il database è attualmente in fase di arricchimento dati. In funzione di alcuni dei criteri di classificazione suddetti, i dati sono stati riportati in forma di istogrammi, come riportato in Figura 3.

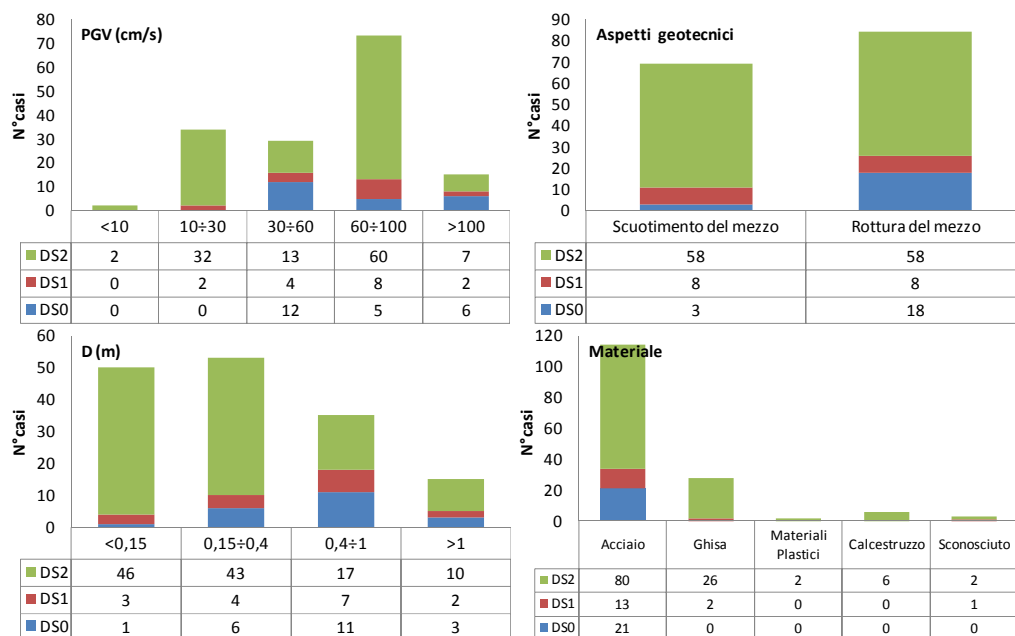


Figura 3. Distribuzione del DS in funzione di a) PGV, b) aspetti geotecnici, c) diametro, d) materiale

Dall'analisi dei dati così organizzati possono essere desunte le seguenti osservazioni:

- la maggior parte dei dati di danneggiamento mostrati sono da ascrivere allo stato DS2 (76%), mentre pochi fanno riferimento allo stato DS1 (10%);
- i casi di danneggiamento sono stati catalogati in funzione della velocità di picco PGV;
- non si verificano danneggiamenti alle tubazioni per velocità inferiori a 10 cm/s, ma la maggioranza delle rotture avvengono fra 60 e 100 cm/s;
- gli aspetti geotecnici connessi con il danneggiamento delle tubazioni dividono approssimativamente la popolazione dei dati in due parti, con una maggioranza per i casi in cui avvengono fenomeni di rottura nel mezzo a seguito del sisma;
- gran parte delle rotture avvengono per le tubazioni di diametro minore di 400 mm;
- gran parte delle tubazioni esaminate è di acciaio, ma nonostante ciò molte tubazioni in ghisa si sono danneggiate, con livelli elevati di danneggiamento (DS2).

Conclusioni:

Questa nota ha lo scopo di illustrare alcune attività preliminari sull'analisi di vulnerabilità sismica di componenti industriali in cui l'interazione terreno/struttura/fluido non è trascurabile (tubazioni, serbatoi e vasche interrato). In particolare, l'attenzione è stato focalizzato sui criteri adottati per l'organizzazione di un database di danni osservati su tubazioni a seguito di terremoti e sulla natura delle tipologie, materiali, condizioni geotecniche e geofisiche che hanno dimostrato le maggiori criticità.

Ringraziamenti:

Gli autori desiderano ringraziare il Consorzio ReLUIIS per il supporto economico e scientifico ricevuto nell'ambito del progetto Reluis 2 (2010-2013) e i coordinatori della Linea 2.2 "Strutture Speciali" (Prof. Ing. Edoardo Cosenza) e della Linea MT1 Geotecnica (Prof. Ing. Francesco Silvestri). Un ringraziamento va inoltre al giovane Giuseppe Di Nunzio per l'attività svolta nel corso del tirocinio presso il Laboratorio StreGa, dell'Università del Molise, coordinatore scientifico Prof. Ing. Giovanni Fabbrocino.

Bibliografia

- Bilotta E., Lanzano G., Russo G., Santucci de Magistris F., Silvestri F. (2007). *Methods for the seismic analysis of transverse section of circular tunnels in soft ground*. ISSMGE-ERTC12 Workshop, XIV ECSMGE, Geotechnical Aspects of EC8, Chapter 22, Madrid Spain.
- Fabbrocino G., Di Carluccio A., Manfredi G., Iervolino I., Salzano E. (2007). *Structural Characterization of Industrial Facilities in the Framework of Seismic Risk Analysis*. Proc. XXI CTA, Catania.
- EN 1998-1 (2003), *Eurocode 8: Design of structure for earthquake resistance*,. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN European Committee for Standardization.
- HAZUS (1997). *Earthquake Loss Estimation Methodology*. National Institute of Building Sciences, prepared by Risk Management Solutions, Menlo Park, CA, USA.
- Lanzano, G. (2009). *Physical and Analytical Modelling of Tunnels under Dynamic Loadings*. PhD Thesis, University of Naples Federico II, <http://www.fedoa.unina.it/3364/>
- Lau, D.L., Tang, A. and Pierre, J-R. (1995). *Performance of lifelines during the 1994 Northridge earthquake*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.22, pp. 438-451.
- Owen G.N., Scholl R.E. (1981). *Earthquake engineering of large underground structures*, Report no. FHWA/RD-80/195. Federal Highway Administration and National Science Foundation.
- Salzano, E., Agreda, A.G., Di Carluccio, A. and Fabbrocino, G. (2009). Risk Assessment and Early Warning Systems for Industrial Facilities in Seismic Zones. *Reliability Engineering & System Safety*, 94, 110, 1577-1584.
- St. John C.M., Zahrah T.F. (1987). Aseismic design of underground structures, *Tunneling and Underground Space Technology*, 2, 165-197)
- Syner-G (2009), *D3.4 Fragility functions for gas and oil system networks*. Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain. Retrieve on <http://www.usgs.gov>