

Stati tensionali e deformativi indotti da eventi sismici su tubazioni fognarie



1. Introduzione

I danneggiamenti generati da un evento sismico sulle tubazioni interrate destinate al trasporto di fluidi (quali acquedotti, reti idriche di distribuzione, reti fognarie) possono avere, in relazione alla sempre maggiore importanza che tali infrastrutture rivestono nella società moderna, un notevole impatto sulla ripresa di un'area colpita nel dopo-sisma. Pertanto, per poter garantire la corretta e necessaria funzionalità delle suddette infrastrutture sia durante che dopo l'evento sismico sono di fondamentale importanza l'analisi del comportamento strutturale delle tubazioni interrate in presenza di sisma e la conseguente fase progettuale. Nel presente lavoro, previa indicazione dei criteri progettuali per tubazioni in zona sismica e previa definizione del modello di interazione tubazione-terreno, si è analizzata la risposta strutturale di tubazioni normalmente utilizzate per il trasporto di acque reflue a seguito di un evento sismico, e di conseguenza si è determinata la massima tensione totale longitudinale σ_t generata dal suddetto evento. Inoltre, per tubazioni dotate di sistemi di giunzione di tipo elastico si sono valutati in corrispondenza degli stessi l'entità dello scorrimento assiale Δl e la rotazione relativa $\Delta\theta$, poiché in presenza di eventi sismici la probabilità di rischio più elevata per la fuoriuscita di servizio dell'infrastruttura tubazione si registra proprio in corrispondenza dei suddetti sistemi di giunzione.



2. Criteri progettuali per tubazioni posate in zona sismica

I criteri essenziali da seguire nella progettazione di tubazioni interrate in zona sismica sono nell'ordine i

seguenti [Chiorino et al., 1983]:

- 1) scelta del tracciato delle tubazioni;
- 2) indagini sulle caratteristiche sismiche e geotecniche dei terreni attraversati;
- 3) determinazione del movimento sismico di progetto;
- 4) definizione dei livelli di sicurezza richiesti in relazione all'importanza dell'opera e alle conseguenze dirette e indirette dell'insuccesso;
- 5) verifica strutturale degli elementi costituenti le tubazioni (tubi e sistemi di giunzione) nelle zone prive di singolarità;
- 6) studio dei provvedimenti particolari per le zone caratterizzate da singolarità nelle caratteristiche del sito e/o del tracciato e/o delle opere accessorie.

Osservazioni di campo, studi e normative indicano che i maggiori danneggiamenti riportati dalle tubazioni interrate in zone sismiche sono dovuti alle seguenti cause [Chiorino et al., 1983; Datta T.K., 1999; UNI ENV 1998-4, 2000]:

- a) propagazione delle onde sismiche capaci di generare all'interno del tubo un elevato stato tensionale e/o deformativo;
- b) collapsi del terreno causati dal sisma, quali frane e liquefazioni;
- c) deformazioni permanenti del terreno e spostamenti di faglia.

Nel presente lavoro non si sono analizzate le cause di danneggiamento di cui ai punti b) e c), mentre si sono valutate a mezzo di un adeguato modello di interazione tubazione-terreno le tensioni e le deformazioni che si generano nel tubo a seguito della propagazione delle onde sismiche nel terreno (punto a)), e ciò sia nel caso di tubazione continua che discontinua (ossia dotata di giunti elastici).



3. Il modello di calcolo

Per poter determinare lo stato tensionale che si genera nelle tubazioni continue e discontinue e gli spostamenti mutui che si generano in corrispondenza del sistema di giunzione di tubazioni discontinue è necessario:

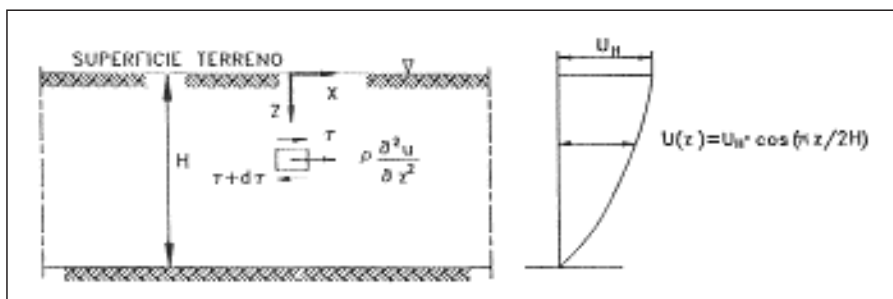
- determinare le caratteristiche del moto sismico negli strati superficiali del suolo nell'ipotesi di assenza della struttura tubazione;
- definire il modello di interazione tubazione-terreno.



3.1 Caratteristiche del moto sismico nello strato superficiale

Nell'ipotesi di assenza della struttura tubazione, il modello di riferimento utilizzato per la valutazione degli spostamenti $U(z)$ all'interno di uno strato superficiale di potenza H poggiante su un banco rigido orizzontale (bed-rock) è rappresentato in Figura 1.

Per la determinazione degli spostamenti $U(z)$ è necessario determinare il periodo fondamentale del suolo T_g . Tale periodo corrisponde a quello delle oscillazioni orizzontali prodotte dalle onde di taglio, le più im-



• **Figura 1** - Caratteristiche del moto sismico negli strati superficiali del terreno [De Martino et al., 1994]

portanti ai fini degli effetti sismici [De Martino et al., 1994].

Nel caso di strato superficiale omogeneo (modulo di elasticità tangenziale G costante con la profondità), il periodo fondamentale del terreno riferito al primo modo di vibrare dello strato, ottenuto risolvendo l'equazione del moto di oscillazione libera dello strato superficiale [Chiorino et al., 1983; De Martino et al., 1994], è dato dalla seguente relazione:

$$T_g = \frac{4 \cdot H}{V_s}$$

dove V_s è la velocità di propagazione delle onde di taglio così definita:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

in cui G è il modulo di elasticità tangenziale e ρ è la densità dello strato di terreno.

Facendo riferimento al primo modo di vibrare, l'ampiezza dello spostamento $U(z)$ dei punti dello strato di terreno in direzione orizzontale (parallela o trasversale all'asse longitudinale della tubazione) è dato dalla seguente relazione [De Martino et al., 1994]:

$$U(z) = \frac{T_g^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot a \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{z}{H}\right) \quad (1)$$

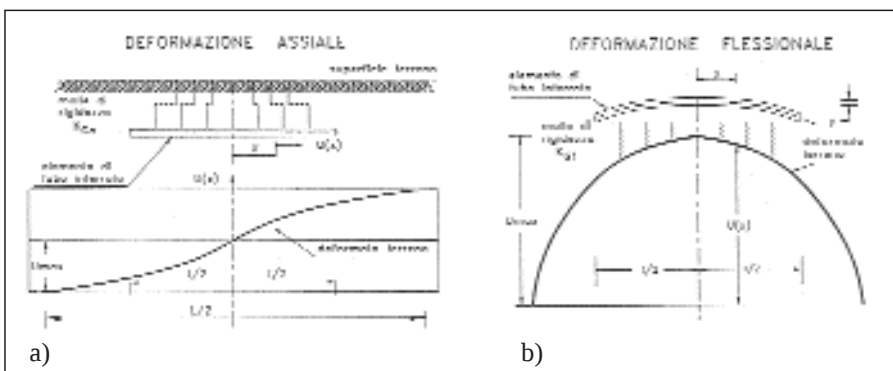
in cui a è l'accelerazione del moto sismico al suolo, z la profondità di un generico punto appartenente allo strato di terreno. Nel presente lavoro z corrisponde alla profondità di posa della tubazione.



3.2 Modello di interazione tubazione-terreno

Dal punto di vista strutturale il comportamento delle tubazioni interrato in zona sismica può essere assimilato a quello di una trave immersa in un mezzo elastico vibrante (strato superficiale del terreno soggetto a moto sismico) e dotata di modesta rigidità, tale cioè da non condizionare il moto sismico del terreno [Chiorino et al., 1983].

Al fine di valutare le tensioni che si generano nell'elemento tubo, l'interazione tra tubazione e terreno viene schematizzata mediante molle elastiche parallele e perpendicolari al-



• **Figura 2** - Modello di interazione tubazione-terreno [Chiorino et al., 1983].

l'asse della tubazione, di rigidezza pari rispettivamente a k_{Ga} e k_{Gf} (Figura 2) [Chiorino et al. 1983]. Nel seguito si riportano le formule necessarie per la determinazione:

- dello spostamento mutuo che si genera in corrispondenza del sistema di giunzione;
- della massima tensione totale all'interno di ogni elemento di tubo.

3.2.1 Determinazione dello spostamento assiale in corrispondenza dei giunti

Nell'ipotesi di tubo infinitamente rigido rispetto al terreno, il massimo spostamento assiale Δl in corrispondenza dei giunti è pari a [Chiorino, 1983]:

$$\Delta l = \varepsilon_{max} \cdot l \quad (2)$$

dove:

- ε_{max} è la deformazione del suolo durante il sisma
 $\varepsilon_{max} = T_g \cdot a / (2\pi \cdot V_s)$;
- l è la lunghezza dell'elemento tubo.

3.2.2 Determinazione della rotazione in corrispondenza dei giunti

Nell'ipotesi di tubo infinitamente rigido rispetto al terreno, la massima rotazione relativa ai giunti θ è pari a [Chiorino, 1983]:

$$\theta = \chi_{max} \cdot l \quad (3)$$

dove:

- χ_{max} è la massima deformazione di curvatura del suolo durante il sisma $\chi_{max} = a/V_s^2$;

- l è la lunghezza dell'elemento tubo.

3.2.3 Determinazione delle tensioni nella sezione di mezzeria dell'elemento tubo dovute alla deformazione assiale del terreno

Con riferimento al modello di interazione elastica (figura 2 a)), la tensione massima della tubazione (continua o discontinua) ingenerata dallo spostamento $U(z)$ del terreno circostante può essere valutata tramite la seguente relazione [Chiorino et al., 1983]:

$$\sigma_z = \alpha_a \cdot \xi_a \cdot \frac{\pi \cdot U(z) \cdot E}{l}$$

in cui:

- $U(z)$ spostamento del terreno espresso dalla (1);
- E è il modulo di elasticità del materiale costituente la tubazione;
- L è la lunghezza d'onda del sisma;
- α_a coefficiente di sovraccarico assiale. Tale coefficiente può essere espresso mediante la seguente relazione:

$$\alpha_a = \frac{1}{1 + [2\pi / (\lambda_a \cdot \sqrt{2} \cdot L)]^2}$$

dove λ_a rappresenta un parametro che dipende dal rapporto tra la rigidezza delle molle assiali k_{Ga} (in prima approssimazione, dove G è il modulo di resistenza a taglio del terreno [Chiorino et al., 1983]) e la rigidezza assiale EA della sezione trasversale del tubo, ossia

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{k_{Ga}}{EA}} = \sqrt{\frac{3 \cdot G}{EA}}$$

- ε_a coefficiente che porta in conto l'espansione-contrazione dei giunti. Tale coefficiente può essere ricavato dall'integrazione dell'equazione differenziale che esprime la congruenza delle deformazioni tra tubo e terreno [Chiorino et al., 1983; De Martino et al., 1994]. Per tubazioni discontinue $\varepsilon_a < 1$, mentre per tubazioni continue $\varepsilon_a = 1$.

3.2.4 Determinazione delle tensioni nella sezione di mezzeria dell'elemento tubo dovute alla deformazione di curvatura del terreno

Con riferimento al modello di interazione elastica (figura 2 b)), la tensione massima della tubazione (continua o discontinua) ingenerata dallo spostamento $U(z)$ del terreno circostante può essere valutata tramite la seguente relazione [Chiorino et al., 1983]:

$$\sigma_f = \alpha_f \cdot \xi_f \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot U(z) \cdot D \cdot E}{l^2}$$

in cui:

- $U(z)$ spostamento del terreno espresso dalla (1);
- D è il diametro della tubazione;
- E è il modulo di elasticità del materiale costituente la tubazione;
- L è la lunghezza d'onda del sisma $= V_s \cdot T_g = 4H$;
- α_f coefficiente di sovraccarico flessionale. Tale coefficiente può essere espresso mediante la seguente relazione:

$$\alpha_f = \frac{1}{1 + [2\pi / (\lambda_f \cdot L)]^2}$$

dove λ_f rappresenta un parametro che dipende dal rapporto tra la rigidezza delle molle assiali k_{Gf} (in prima approssimazione $k_{Gf} = k_{Ga} = 3 \cdot G$, dove G è il modulo di resistenza a taglio del terreno [Chiorino et al., 1983]) e la rigidezza flessionale EI della sezione trasversale del tubo, ossia

$$\lambda_f = \sqrt[4]{\frac{k_{Gf}}{EI}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot G}{EI}}$$

■ ε_f coefficiente che porta in conto la rotazione relativa dei giunti. Tale coefficiente può essere ricavato dall'integrazione dell'equazione differenziale che esprime la congruenza delle deformazioni tra tubo e terreno [Chiorino et al., 1983; De Martino et al., 1994]. Per tubazioni discontinue $\varepsilon_f < 1$, mentre per tubazioni continue $\varepsilon_f = 1$.

3.2.5 Determinazione delle tensioni totali nella sezione di mezzoria dell'elemento tubo

Per determinare le tensioni totali massime σ_t in corrispondenza della fibra più sollecitata è necessario sommare le tensioni relative alle deformazioni assiali e flessionali. In realtà il fenomeno è ben più complesso in quanto si sovrappongono gli effetti di onde sia dirette che riflesse, con angoli diversi di inclinazione e di fase.

Per la valutazione della tensione totale massima σ_t la letteratura fornisce la seguente formula [Chiorino et al., 1983]:

$$\sigma_t = \sqrt{3.12 \cdot \sigma_a^2 + \sigma_f^2} \quad (4)$$

Tale formula è stata proposta considerando un'onda di tipo flessionale

che si propaga lungo l'asse longitudinale della tubazione e quattro onde di tipo assiale disposte in piani diversi e con angolo di incidenza di 45° ognuna.

4. Valutazione degli stati tensionali e deformativi indotti dal sisma su tubazioni fognarie

Definito il modello di interazione sismica tubazione-terreno è ora possibile valutare la tensione totale massima generata in seguito ad un evento sismico in una tubazione interrata (sia essa continua che dotata di giunzioni di tipo elastico) e, nel caso di tubazioni dotate di giunzioni di tipo elastico, lo spostamento mutuo (spostamenti assiali e rotazioni relative) che si genera in corrispondenza dei giunti.

Nel presente lavoro si è determinato lo stato tensionale indotto da un'azione sismica su tubazioni normalmente utilizzate per il trasporto di acque reflue, ossia:

- 1) tubazioni in gres;
- 2) tubazioni in ghisa sferoidale;
- 3) tubazioni in PVC;
- 4) tubazioni in PEAD.

Inoltre per le prime tre tubazioni, essendo dotate di sistema di giunzione elastico (tubazioni discontinue), si sono valutati lo scorrimento assiale Δl (eq. 2) e la rotazione relativa $\Delta \theta$ (eq. 3) in corri-

spondenza dei giunti.

Lo stato tensionale e deformativo è stato calcolato facendo riferimento ai seguenti diametri nominali: 200, 250, 300 (315 per le tubazioni in PVC e PEAD), 400, 500, 600 (630 per le tubazioni in PVC e PEAD), 700 (710 per le tubazioni in PVC e PEAD) e 800 mm.

Nella Tabella 1 sono riportati le lunghezze l dei tubi, i moduli di elasticità normale E e le tensioni ammissibili di trazione σ_{amm} relativi alle tubazioni sopracitate.

Lo stato tensionale e deformativo è stato calcolato facendo riferimento ai seguenti valori dei parametri che esercitano la loro influenza nel fenomeno di interazione tubazione-terreno:

- $G = 10, 50, 100 \text{ MPa}$;
- $H = 10 \text{ e } 20 \text{ m}$;
- $z = 2.00 \text{ m}$;
- $a = 0.10 \cdot g$ corrispondente a quella definita dalla normativa antisismica italiana per opere civili che ricadono in zona sismica di 1ª categoria;
- $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$

I risultati delle elaborazioni numeriche sono sintetizzati sotto forma grafica. Le tensioni totali σ_t sono state determinate tramite la (4); per ciascuna tipologia di materiale costituente la tubazione, esse sono state diagrammate in forma adimensionalizzata, ossia σ_{amm}/σ_t . Dall'analisi dei grafici è emerso quanto segue:

Tipologia tubazione	Lunghezza tubo [m]	Modulo di elasticità E [Mpa]	Tensione ammissibile σ_{amm} [Mpa]
Gres	2.00	50000	10
Ghisa sferoidale	6.00	170000	270
PVC	6.00	3000	10
PEAD	Tubazione Continua	900	5

• Tabella 1 - Lunghezza del tubo, modulo di elasticità e tensione ammissibile di trazione per tipologia di tubazione

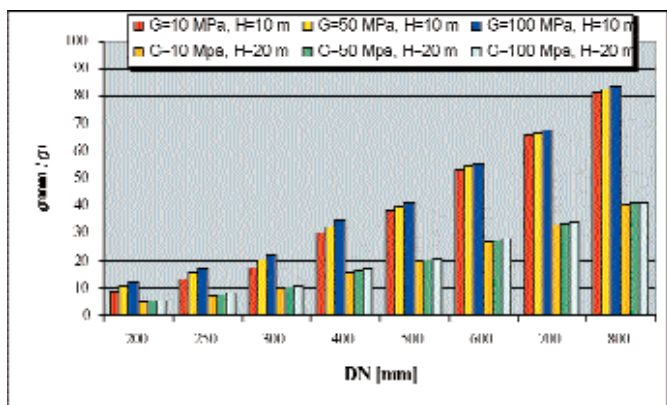
- qualsiasi sia il materiale costituente la tubazione, qualsiasi sia il diametro, e a parità di modulo di elasticità tangenziale G , lo stato di sollecitazione cresce al crescere dello strato superficiale di terreno H (infatti il rapporto σ_{amm}/σ_t diminuisce) (Figure 3, 4, 5, 6);
- per ciascun tipo di materiale costituente le tubazioni, a parità di diametro nominale e di altezza dello strato di terreno superficiale H , lo stato di sollecitazione decresce al crescere del modulo di elasticità tangenziale G (infatti il rapporto σ_{amm}/σ_t aumenta). Tale fenomeno è più sensibile nei materiali plastici (PVC e PEAD) (Figure 3, 4, 5, 6);
- a parità di modulo di tensione tangenziale G e di altezza dello strato superficiale di terreno H , lo stato tensionale decresce all'aumentare del diametro nominale (infatti il rapporto σ_{amm}/σ_t aumenta) (Figure 3, 4, 5, 6);
- a parità di modulo di tensione tangenziale G e di altezza dello strato superficiale del terreno

H , per diametri superiori ai 300 mm lo stato tensionale cui è soggetto il tubo in gres è minore rispetto agli altri stati tensionali relativi ai tubi in ghisa sferoidale, PVC e PEAD (Figura 7);

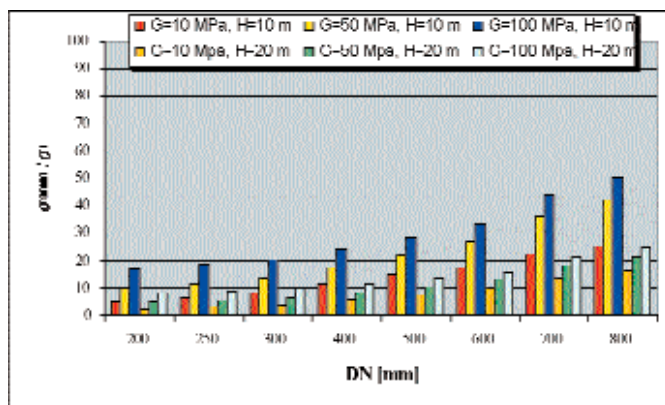
- per i parametri assunti e per ciascun tipo di tubazione, il rapporto σ_{amm}/σ_t è sempre maggiore rispetto al fattore di sicurezza assunto nella normale progettazione delle tubazioni non in pressione ($FS=\sigma_{amm}/\sigma_t=1.5$). Ad ogni modo nella fase di verifica strutturale il progettista non deve dimenticare di sommare alla tensione massima totale indotta dall'azione sismica quella indotta dai carichi di natura statica;
- qualsiasi sia il materiale costituente la tubazione, a parità di modulo di elasticità tangenziale G , lo spostamento assiale Δl cresce al crescere dello strato di terreno superficiale H (Figure 8, 9, 10);
- qualsiasi sia il materiale costituente la tubazione, a parità di

modulo di altezza dello strato superficiale di terreno H , lo spostamento assiale Δl decresce al crescere del modulo di elasticità tangenziale G (Figure 8, 9, 10);

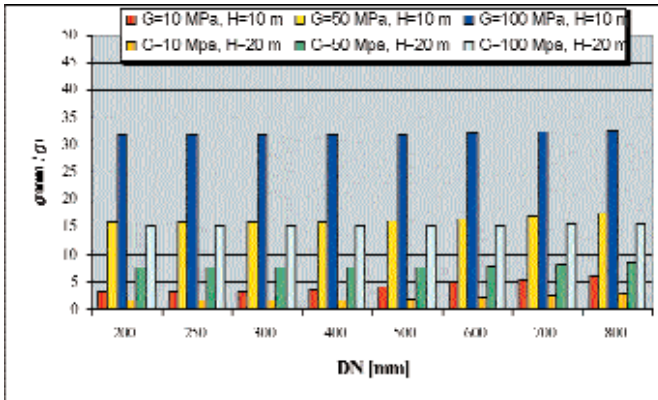
- qualsiasi sia il materiale costituente la tubazione, a parità di altezza dello strato superficiale di terreno H , la rotazione relativa $\Delta\theta$ decresce al crescere del modulo di elasticità tangenziale G (Figure 11, 12, 13);
- a parità di modulo di tensione tangenziale G e di altezza dello strato superficiale di terreno H , sia lo spostamento assiale che la rotazione relativa per tubi in gres sono minori rispetto ai corrispondenti spostamenti assiali e rotazioni relative riguardanti tubi in ghisa sferoidale e PVC (Figure 14 e 15);
- i valori degli spostamenti assiali e delle rotazioni relative risultano per le tubazioni dotate di giunzioni elastiche (gres, ghisa sferoidale e PVC) risultano essere molto più piccole rispetto ai valori massimi ammissibili.



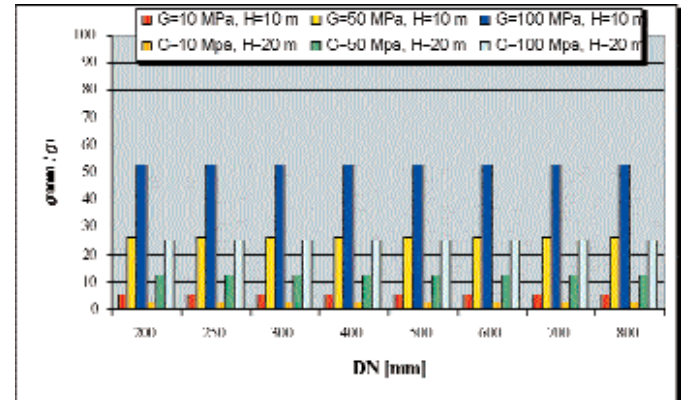
• **Figura 3** - Tensioni totali sismiche adimensionalizzate relative a tubazioni in gres.



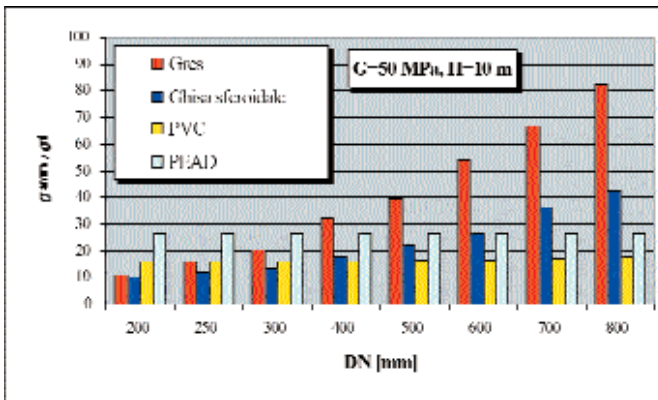
• **Figura 4** - Tensioni totali sismiche adimensionalizzate relative a tubazioni in ghisa sferoidale.



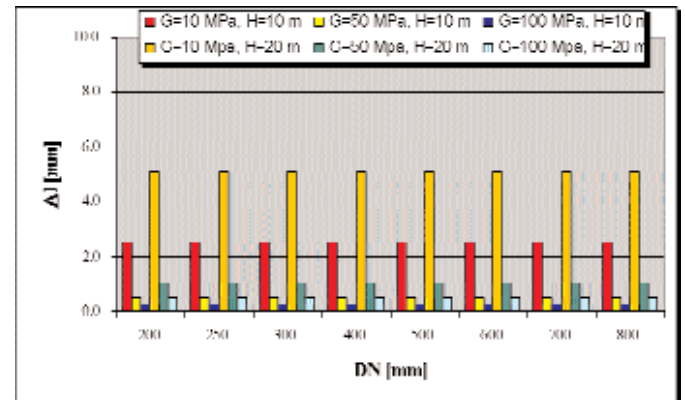
• **Figura 5** - Tensioni totali sismiche adimensionalizzate relative a tubazioni in PVC.



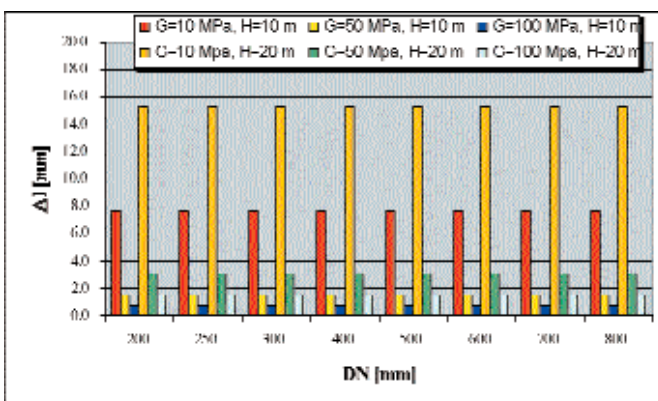
• **Figura 6** - Tensioni totali sismiche adimensionalizzate relative a tubazioni in PEAD.



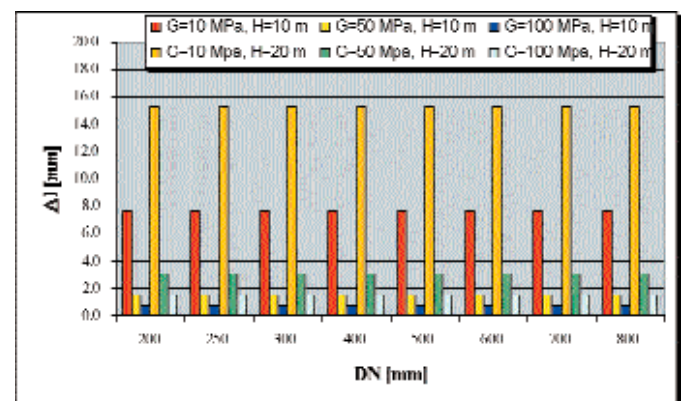
• **Figura 7** - Confronto tra tensioni totali sismiche adimensionalizzate relative a diverse tipologie di tubazioni.



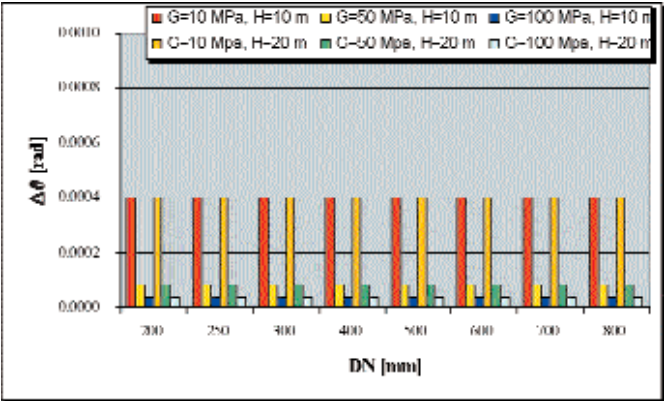
• **Figura 8** - Spostamenti assiali indotti dall'azione sismica relativi a tubazioni in gres.



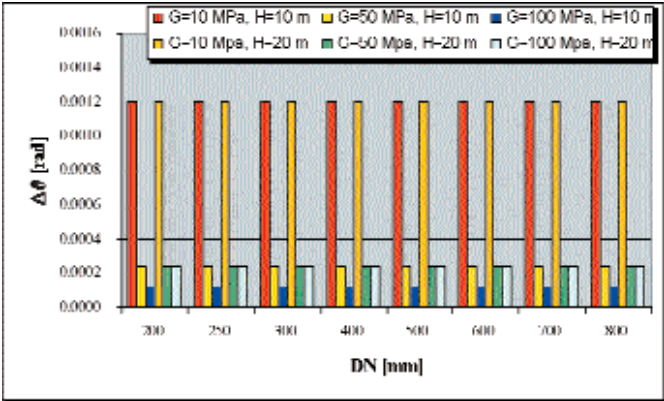
• **Figura 9** - Spostamenti assiali indotti dall'azione sismica relativi a tubazioni in ghisa sferoidale.



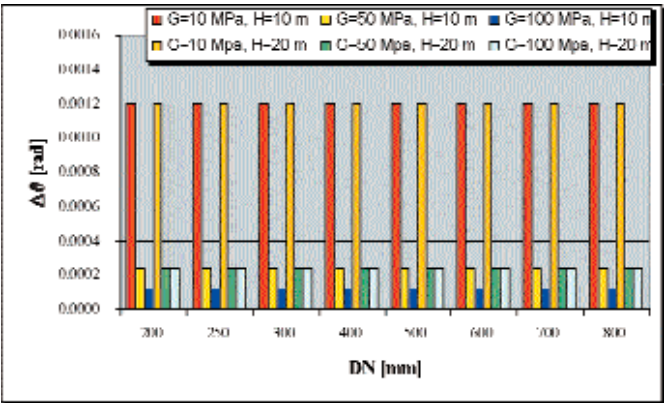
• **Figura 10** - Spostamenti assiali indotti dall'azione sismica relativi a tubazioni in PVC.



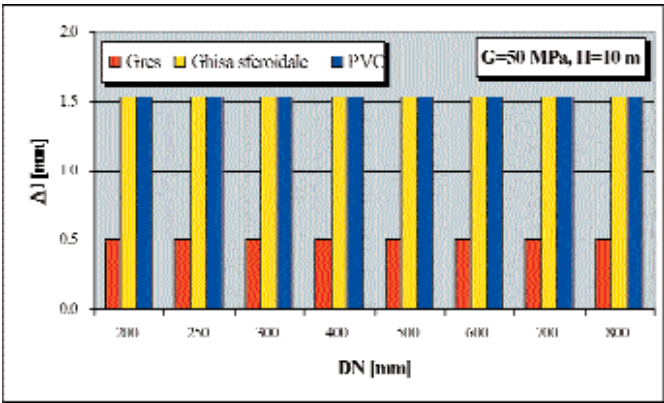
• **Figura 11** - Rotazioni relative indotte dall'azione sismica per tubazioni in gres.



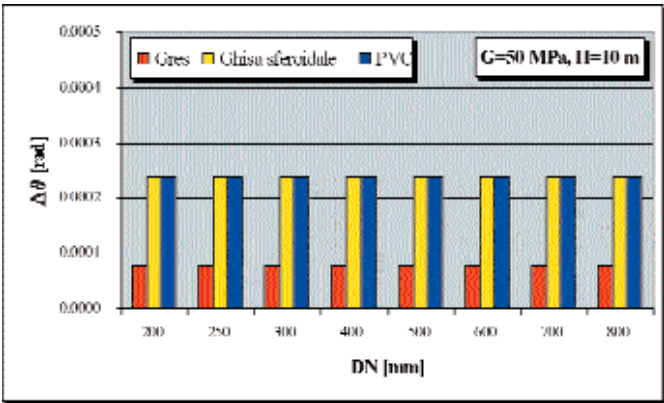
• **Figura 12** - Rotazioni relative indotte dall'azione sismica per tubazioni in ghisa sferoidale.



• **Figura 13** - Rotazioni relative indotte dall'azione sismica per tubazioni in PVC.



• **Figura 14** - Confronto tra spostamenti assiali indotti dal sisma per diverse tipologie di tubazioni.



• **Figura 15** - Confronto tra rotazioni relative indotte dal sisma per diverse tipologie di tubazioni.



5. Conclusioni

In relazione al modello di interazione tubo-terreno utilizzato, le simulazioni effettuate hanno messo in evidenza che i parametri che giocano un ruolo fondamentale sull'entità dello stato tensionale e deformativo sono il modulo di elasticità tangenziale G dello strato superficiale di terreno, l'altezza H dello strato superficiale di terreno ma soprattutto il diametro della tubazione e la lunghezza l del singolo tubo. Infatti, dalla serie di grafici illustrati, si è osservato che tubi di $DN > 300$ mm e di modesta lunghezza, quali quelli

in gres ($l = 2.00$ m), risultano essere, a parità di altre condizioni e rispetto a tubi di lunghezze superiori, i meno sollecitati (il rapporto σ_{amm}/σ_t è sempre il più elevato) e meno soggetti in corrispondenza delle giunzioni a scorrimenti assiali e a rotazioni relative.



Bibliografia

- Chiorino M.A., Losana G., Bosco G. Forte G.. – *Problemi di progettazione antisismica di condotte interrato con particolare riguardo alle tubazioni in cemento armato e precompresso* – A.N.D.I.S., Convegno materiali per condotte, Roma, Sheraton Hotel, 15-16-17 Dicembre 1983.
- Datta T.K. – *Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review* – Nuclear Engineering and Design, n°192, 271-284, 1999.
- De Martino G., de Marinis G., Giugni M. – *Risposta dinamica di tubazioni di drenaggio in zona sismica* – Idrotecnica n°1, Gennaio-Febbraio 1994.
- Eurocodice 8 – *Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture* – UNI ENV 1998-1-1, Ottobre 1997.