

Dissipazione dell'energia in strutture su pali

A. De Stefano, S. Foti, R. Lancellotta, V. Roma

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italy

SOMMARIO: Il presente lavoro tratta il tema dell'isolamento sismico delle strutture ottenuto attraverso pali di fondazione, svincolati dal terreno nella parte superiore. La necessità di limitare gli spostamenti della sovrastruttura richiede un sistema di dissipazione che smorzi la risposta strutturale, sia in termini di spostamento, sia di accelerazione. Esso consiste nell'inserimento nell'intercapedine tra palo e tubo forma di un fluido viscoso.

Attraverso un modello matematico, che simula il comportamento dell'insieme palo-fluido, si è studiata l'influenza che i parametri del sistema (diametro del palo e dell'involucro esterno a contatto col terreno, viscosità di fluido) hanno sulla risposta.

Attraverso due accelerogrammi relativi ad eventi sismici registrati, sono state infine eseguite alcune analisi parametriche, che hanno fornito risultati incoraggianti in termini di riduzione sia degli spostamenti relativi sia dell'accelerazione assoluta della sovrastruttura.

ABSTRACT: The paper is part of a framework about seismic isolation of buildings through modified pile foundation, which have been separated in their shallow part from the surrounding soil. Considering the problem of excessive movements in the structure, arising from previous analyses, a special dissipating system is proposed to attenuate the seismic response, both in terms of displacements and acceleration. The system is based on the insertion of a viscous fluid in the void space between the pile and the lining of the surrounding soil. A mathematical model has been developed to simulate the coupled behaviour of pile and fluid and to compute the viscous force that arises in opposition to pile motion. Using this model, the influence of the factors affecting the system response (pile and external lining diameters, fluid viscosity) has been assessed. In the last step of the analysis, some numerical simulations have been carried on using as excitation two different real seismograms, obtaining positive results for reduction of relative displacements and absolute acceleration of the superstructure.

1 INTRODUZIONE

In una memoria parallela (De Stefano et al. 1999), è stato proposto un sistema di isolamento alla base costituito da pali di fondazione svincolati dal terreno circostante nella porzione più superficiale. Tale accorgimento comporta vantaggi significativi in termini di disaccoppiamento del moto della sovrastruttura da quello del terreno, con conseguente abbattimento della accelerazione spettrale. Sussiste tuttavia il problema di controllare l'entità degli spostamenti relativi della sovrastruttura (Foti 1996) e si rende quindi necessario l'uso di dispositivi di dissipazione di energia, che riescano ad attenuare non solo gli spostamenti, ma la risposta strutturale in ogni sua forma, assorbendo parte dell'energia.

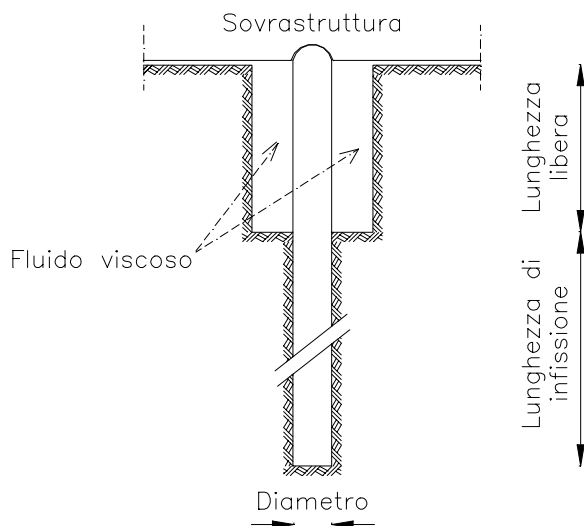


Figura 1 Schema del dispositivo proposto

Data la particolare tipologia di isolamento alla base, risulta interessante indagare i possibili benefici derivanti dall'inserimento di un fluido viscoso nell'intercapedine tra palo e rivestimento esterno, che circonda il palo (Fig. 1).

Per valutare il contributo dissipativo offerto dalla resistenza viscosa del fluido, è stato costruito un apposito modello matematico (Roma 1998). Un aspetto peculiare è costituito dalle condizioni al contorno, essendo il fluido intorno al palo confinato dal contenitore, per cui la risposta del sistema strutturale dipende, oltre che dalla natura del fluido anche dalla geometria dell'intercapedine esistente nel generico istante del moto tra palo e camicia.

Nella determinazione della risposta intervengono numerosi parametri quali la lunghezza libera, il materiale, il diametro, la lunghezza di infissione per quanto concerne i pali, le caratteristiche meccaniche del terreno, l'input sismico e le caratteristiche dinamiche della sovrastruttura supportata dai pali.

Le analisi esposte nel seguito, hanno cercato dapprima di chiarire l'influenza di questi parametri sulla risposta del sistema palo-terreno in funzione della presenza del fluido viscoso. Ulteriori analisi, sono state finalizzate all'individuazione dei benefici, che l'adozione del sistema di isolamento e smorzamento proposto comporta.

2 MODELLO MATEMATICO PER LA VALUTAZIONE DELLA FORZA VISCOSA

La resistenza al moto del palo dovuta alla presenza del fluido si esplica lungo tutta la parte libera del palo e ogni concio di palo è soggetto ad una forza viscosa diversa, dipendente dalla distanza dal contenitore. Nel caso in esame si è assunta come deformata caratteristica quella di una colonna a sezione costante incastrata ad un estremo e caricata da una forza statica concentrata all'estremo libero. Con tale ipotesi, e schematizzando la sovrastruttura come un oscillatore semplice non smorzato, è stato possibile utilizzare per le analisi un modello dinamico semplificato, ad un solo grado di libertà, rappresentato dallo spostamento relativo al suolo della testa dei pali. Assumendo che gli spostamenti di interesse siano solo quelli orizzontali, l'equazione di equilibrio dinamico è:

$$m\ddot{x} + c(x)\dot{x} + kx = -m\ddot{g} \quad (1)$$

dove:

x = spostamento relativo al terreno della testa dei ai pali, grado di libertà del modello dinamico;

- m = massa modale dell'oscillatore semplice, che coincide con la massa totale essendo la massa dei pali supposta trascurabile;
- c(x) = termine dissipativo derivante dalla presenza del fluido;
- k = rigidità statica di traslazione del sistema terreno-palo-sovrastuttura.

Per valutare il coefficiente di attenuazione c(x), relativo alla componente dissipativa, si sono introdotte le ipotesi seguenti.

Il palo è stato suddiviso in conci di lunghezza pari al suo diametro (Fig. 3), valutando il contributo relativo ad ogni cono, da integrare poi lungo lo sviluppo di tutto il palo.

Nell'equazione del moto del palo è stato considerato solo l'attrito tra palo e fluido viscoso, trascurando la distribuzione delle sovrappressioni che si formano nel fluido attorno al palo.

Si considera il moto sismico nella sola direzione orizzontale, dovuto ad onde sismiche di taglio, che si propagano verticalmente. Si tiene inoltre in conto la sola interazione inerziale e non quella cinematica tra terreno, pali e sovrastruttura.

Il contenitore è solidale col terreno e così anche il fluido, quindi il problema si riconduce al moto relativo tra palo e contenitore. Questa ipotesi consente di considerare il palo fermo e il fluido attorno in movimento o viceversa a seconda delle esigenze di calcolo senza pregiudicare la validità della trattazione.

Si ammette che la componente verticale di velocità del fluido sia inesistente, così che tra corone circolari di fluido attorno a due conci di palo successivi non esista scambio di massa fluida. Imponendo quindi la conservazione della massa relativamente ad una corona circolare si perviene all'espressione della forza viscosa.

La sezione del palo sia circolare, anche se l'inflessione del palo comporta un'eccentricità del cerchio, così che la sezione nell'istante generico sia ellittica. Concettualmente non esistono complicazioni alla rimozione di tale ipotesi semplificativa, ma solo variazioni di carattere analitico facilmente superabili.

Il fluido è incomprimibile, ipotesi abbastanza verosimile, che comporta che la densità ρ del fluido è costante e che quindi non esistono addensamenti di materia; dato un volume di fluido in un generico intervallo di tempo dt, la massa entrante è pari a quella uscente dal volume di controllo.

Il fluido è di tipo Newtoniano, quindi è possibile definire il legame costitutivo tra tensioni tangenziali τ agenti all'interfaccia tra fluido e palo e variazione infinitesima di velocità del fluido in direzione perpendicolare al bordo del palo nel punto in cui si valuta la τ . Il legame è lineare (Fig. 2) e dipende dalla viscosità dinamica μ del fluido

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \tag{2}$$

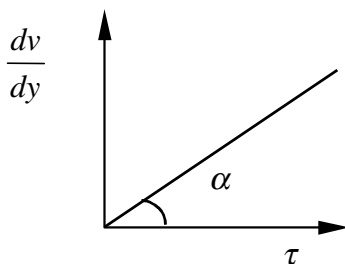


Figura 2 Legame costitutivo di un fluido newtoniano

Ipotesi fondamentale è che il moto sia di lento scorrimento o al più laminare, perché permette di ipotizzare un profilo di velocità del fluido responsabile del trasporto di massa di tipo parabolico, assumendo che tutto il campo fluido sia uno strato limite, in cui la vicinanza delle pareti fa sì che la forza viscosa sia prevalente sulla forza inerziale. La validità di tale ipotesi è

confermata dal basso valore del numero di Reynolds. Di conseguenza non esistono fenomeni di turbolenza e non esiste trasporto di massa fluida nella direzione perpendicolare al moto.

Non esiste distacco tra fluido e palo, perché l'aderenza fra le particelle fluide e contorno del palo è ragionevole, in virtù del basso valore di Re, che comporta un moto di lento scorrimento. Il distacco dello strato limite di fluido nella parte retrostante del palo è, infatti, legato proprio a fenomeni di turbolenza.

2.1 Formulazione del modello

Si consideri la generica sezione dell'insieme palo-fluido-contenitore, introducendo tre diverse configurazioni individuate da altrettante terne di riferimento: $[x, y]$, $[\hat{x}, \hat{y}]$, $[\tilde{x}, \tilde{y}]$, traslate una rispetto all'altra lungo la direzione x (Fig. 4). La prima configurazione si riferisce alla situazione di quiete con palo e camicia concentrici. La seconda configurazione rappresenta la posizione relativa tra palo e contenitore nell'istante generico t ed è traslata di x dalla prima.

Quando il concio del palo si muove nella generica direzione x sposta un volume di fluido, che è costretto a fluire lateralmente. Si genera così un campo di velocità nel fluido e delle tensioni tangenziali attorno al palo, le cui componenti orizzontali integrate lungo la sezione circolare del palo danno la forza resistente per attrito dovuta al fluido in corrispondenza di un concio di palo. Si consideri come volume di controllo il quadrilatero curvilineo 5B72, individuato dalla retta a , dall'asse x , dal contenitore e dal concio. Nell'intervallo infinitesimo di tempo dt il concio si sposta della quantità infinitesima:

$$x_1 = \dot{x} dt \quad (3)$$

individuando la terza configurazione.

Per definire univocamente il profilo parabolico di velocità occorrono tre informazioni indipendenti, che possono essere individuate come segue:

- 1) P' appartiene al profilo;
- 2) B' ha velocità relativa con componente lungo la direzione del moto pari a: $\dot{x} \sin \beta$;
- 3) l'area racchiusa dalla parabola è data da $A = r_0 \dot{x} \sin \beta$

Trascurando i termini di ordine superiore al primo risulta :

$$A_{entrante} = r_0 \dot{x} \sin \beta dt = A dt \quad (4)$$

$$A_{entrante} = A_{(5236)} = A_{(60'O''4)} \cong (\overline{O'6} + \overline{O''4}) \cdot \frac{\overline{46}}{2} \quad (5)$$

con A = area racchiusa dal profilo parabolico di velocità perpendicolare alla sezione di passaggio del fluido uscente dal volume di controllo.

Noto il profilo di velocità, il coefficiente angolare m_0 della tangente al punto P' del profilo, moltiplicato per il coefficiente di viscosità dinamica μ , rappresenta il modulo delle τ :

$$\left| \vec{\tau} \right| = m_0 \mu = \mu \frac{2}{d} \dot{x} \sin \beta \left(\frac{3r_0}{d} - 1 \right) \quad (6)$$

Il fluido si oppone al moto del palo, mediante le tensioni tangenziali τ , le cui componenti orizzontali sommate con integrazione estesa a tutto il contorno circolare del concio danno la forza smorzante FH.

La forza infinitesima è data da:

$$dF_H = \tau_H r_0 d\beta \quad (7)$$

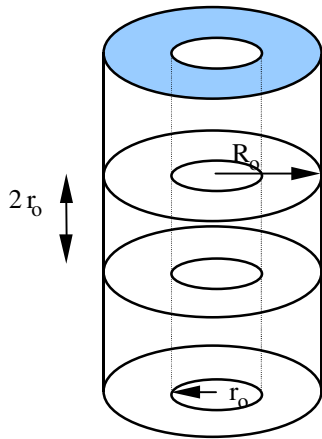


Figura 3 Suddivisione in concetti

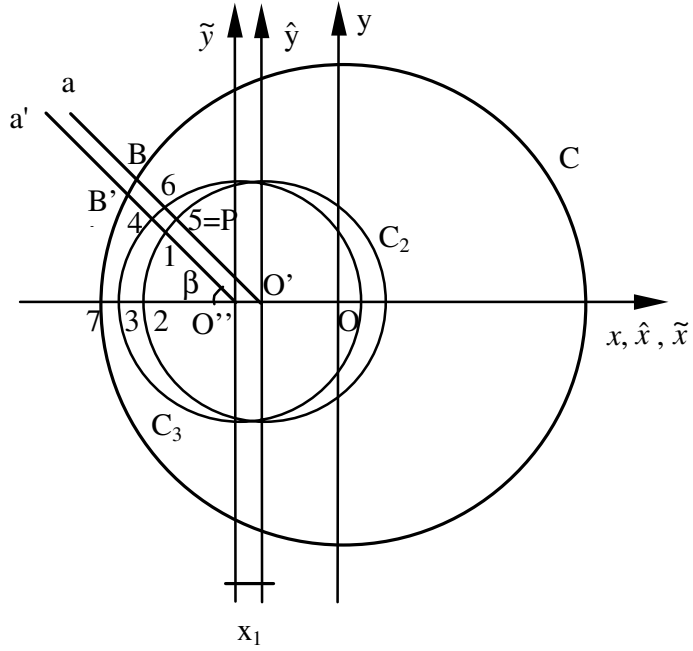


Figura 4 Configurazioni della sezione durante il moto

e quindi la forza risultante lungo x è espressa dall'integrale:

$$F_H = \int_0^{2\pi} dF_H = 2 \int_0^{\pi} dF_H \quad (8)$$

Sostituendo la (6) nella (7) e quest'ultima nella (8) si ottiene

$$F_H = 4r_0\mu\omega_0^2 \left(\frac{3r_0}{d(x, \beta)} - 1 \right) \frac{1}{d(x, \beta)} \sin^2 \beta d\beta \quad (9)$$

Si osservi che F_H dipende da x ed è proporzionale alla velocità. Considerando la rappresentazione grafica di Figura 4 si ha:

$$d(x, \beta) = \overline{BP} \quad (10)$$

espressione che varia sia con x sia con β , che può valutarsi come la distanza fra due punti, giungendo alla formula:

$$d(x, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}} \left[x - \sqrt{\Delta} + r_0 \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \right] & \beta \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \\ \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}} \left[x + \sqrt{\Delta} - r_0 \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \right] & \beta \in \left[\frac{\pi}{2}; \pi \right] \end{cases} \quad (11)$$

con

$$\Delta(x, \beta) = x^2 - (1 + \tan^2 \beta) (x^2 - R_0^2) \quad (12)$$

2.2 Valutazione della resistenza viscosa

Utilizzando l'espressione analitica della forza viscosa ricavata al punto 2.2, sono state effettuate diverse analisi parametriche per valutare l'influenza dei parametri che intervengono nella definizione della resistenza viscosa al moto del palo. A titolo di esempio si riporta il caso di un palo di diametro $D_{\text{palo}} = 0.610$ m, con contenitore esterno di diametro $D_{\text{est}} = 1.5 D_{\text{palo}}$. In Figura 5

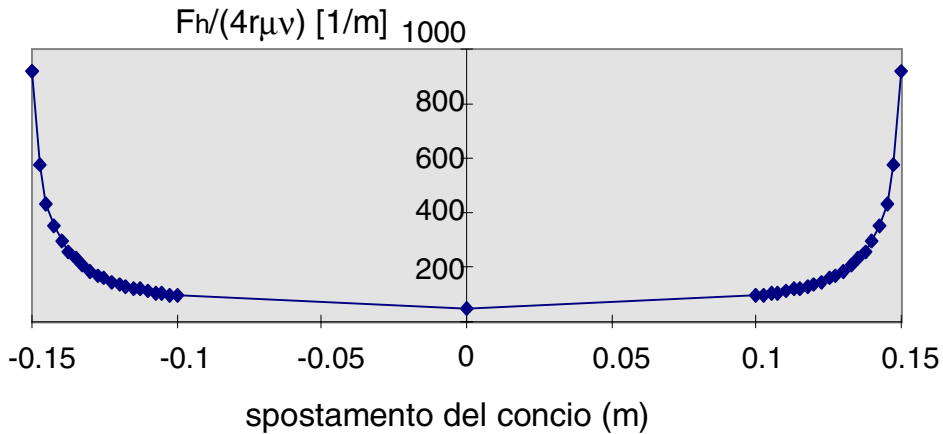


Figura 5 Forza viscosa normalizzata in funzione dello spostamento ($D_{\text{palo}}=0.610\text{m}; D_{\text{est}}=1.5D_{\text{palo}}$)

è diagrammata l'intensità della forza viscosa corrispondente ad un concio di lunghezza unitaria normalizzata rispetto al termine $4r\mu v$, in funzione dello spostamento del concio dal centro del contenitore.

Il grafico evidenzia l'influenza della distanza tra palo-contenitore sull'intensità delle τ e quindi sull'entità della forza viscosa. All'avvicinarsi del palo al contenitore la forza viscosa cresce in maniera sempre più marcata. La giustificazione fisica di questo fenomeno risiede nell'aumento della velocità puntuale: all'approssimarsi del palo al bordo del contenitore, la sezione attraverso cui il fluido deve defluire si riduce e, poiché il fluido è supposto incomprimibile e la portata è costante, il profilo di velocità si modifica, allungandosi nella direzione del moto. Inoltre la tangente al profilo di velocità nel punto di contatto tra fluido e palo tende a coincidere con la tangente geometrica al palo nello stesso punto. Queste considerazioni giustificano l'incremento della componente parallela al moto delle tensioni tangenziali τ e quindi della resistenza viscosa.

Per tali motivazioni, una riduzione del rapporto esistente tra il diametro del contenitore esterno e quello del palo comporta un aumento della forza viscosa. A titolo esemplificativo, la Figura 6 riporta l'andamento dell'intensità della forza viscosa normalizzata, in funzione della posizione del centro del palo per diversi valori del rapporto tra D_{esterno} e D_{palo} . In ascissa è riportato il rapporto adimensionale tra spostamento x del palo rispetto al centro del contenitore ed il massimo spostamento $(R_o - r_o)$ che il palo può manifestare.

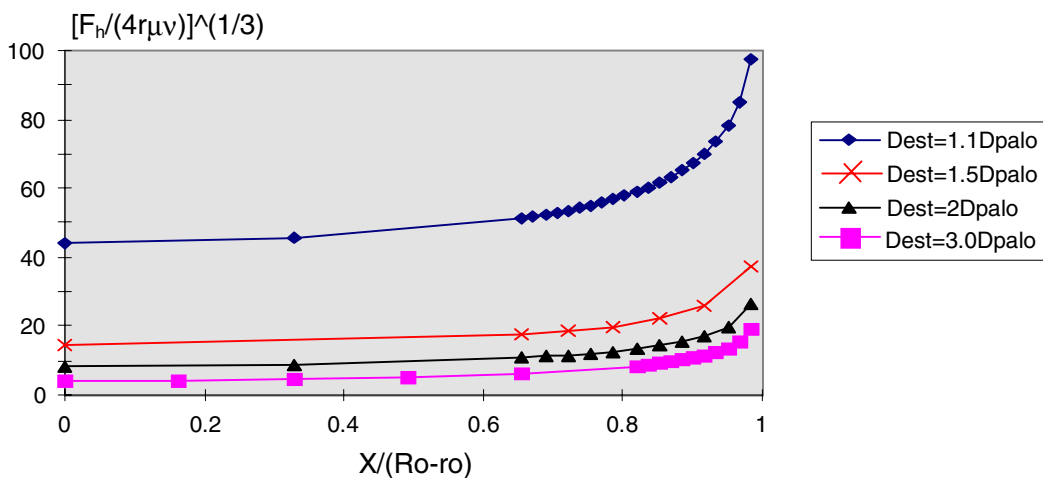


Figura 6 Forza viscosa in funzione dello spostamento per diversi rapporti $D_{\text{est}}/D_{\text{palo}}$

2.3 Integrazione lungo lo sviluppo del palo

L'equazione (9) fornisce la componente parallela alla direzione del moto della forza viscosa per unità di lunghezza libera, che deve essere integrata sulla lunghezza libera del palo per ottenere l'effettivo contributo dissipativo. Naturalmente per effettuare correttamente tale operazione bisognerebbe considerare ad ogni istante di tempo l'effettiva deformata della porzione libera di inflettersi del palo. Per semplificare tale procedimento si è preso come riferimento la deformata di una colonna incastrata alla base e caricata in testa da una forza concentrata. Con tale assunzione è possibile esprimere lo spostamento x alla quota generica z esclusivamente in funzione dello spostamento massimo x_{\max} in testa al palo, che è proprio il grado di libertà del modello dinamico. Con riferimento ai simboli introdotti in Figura 7, si ottiene:

$$x(z) = x_{\max} \cdot [1 - 1.5 \cdot (1 - z/L)^3 + 0.5 \cdot (1 - z/L)] \quad (13)$$

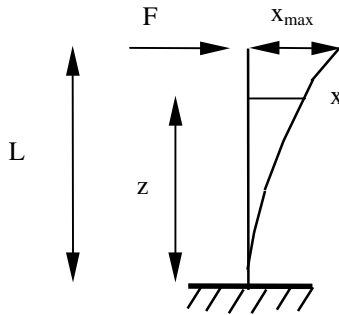


Figura 7 Forma della deformata del palo.

In definitiva si perviene al termine $c(x)$ dopo un'integrazione doppia, prima lungo il contorno, successivamente lungo l'altezza del palo.

$$c(x) = \int_0^L \left[4r\mu \cdot \int_0^\pi \left(\frac{3r}{d(x(z), \beta)} - 1 \right) \frac{1}{d(x(z), \beta)} \sin^2 \beta d\beta \right] \cdot dz \quad (14)$$

Si osservi che la x che compare nell'equazione differenziale (1) e che esprime la dipendenza della c nella (14) è la coordinata lagrangiana del sistema, cioè la x_{\max} in testa ai pali, mentre la $x(z)$ che appare all'interno dell'integrale è legata a quella dalla (13).

Inoltre è bene notare che la costante μ può essere portata fuori dall'integrale, e dunque la forza viscosa dipende linearmente da essa.

3 APPLICAZIONE

Per studiare l'effetto della dissipazione viscosa sul sistema ad un grado di libertà considerato per le analisi esplorative, si è proceduto all'integrazione nel dominio del tempo considerando come forzante due diverse registrazioni sismiche:

- Sisma del Friuli del 4/6/72, registrazione di Tolmezzo-Ambiesta, componente EW.
- Sisma dell'Irpinia del 23/11/80, registrazione di Bagnoli Irpino, componente EW.

Dato l'elevato numero di parametri che intervengono nella definizione del sistema nelle sue parti (terreno, pali, fluido viscoso, sovrastruttura), si è pensato di mantenerne costanti alcuni di essi e di farne variare altri. Si assumono costanti i parametri del terreno, supposto di natura argillosa, scegliendo un suolo soffice con bassa velocità di propagazione delle onde sismiche, che nel seguente lavoro si suppone siano onde di taglio verticali. Tale assunzione non è lontana dal vero, infatti le onde sismiche dirigendosi verso la superficie terrestre in genere incontrano

degli strati sempre meno compatti e alla superficie di separazione tra due strati, di cui quello superiore è meno addensato, l'obliquità della direzione di propagazione rispetto alla verticale si riduce per effetto della diversa velocità dell'onda nei due strati. Il modulo di deformabilità tangenziale considerato è $G = 10\text{MPa}$ costante con la profondità, il coefficiente di Poisson $\nu = 0.15$, la resistenza al taglio non drenata $C_u = 150\text{ kPa}$ costante con la profondità, necessaria alla determinazione della capacità portante dei pali. Si è ipotizzato un terreno molto deformabile per simulare le condizioni in cui i pali siano comunque necessari, per la limitazione dei cedimenti (Lancellotta 1993). Per quanto riguarda il palo si è considerata una sezione circolare cava in acciaio con spessore di 12mm e diametro di 0.610m, mentre la lunghezza libera è una variabile dell'analisi. La sovrastruttura è caratterizzata da una massa costante corrispondente alla capacità portante del singolo palo, ($m = 95.3 \cdot 10^3\text{ kg}$) e da un periodo fondamentale $T_0 = 0.7\text{sec}$. La sovrastruttura risulta sufficientemente rigida da entrare nel campo dei periodi dello spettro di risposta elastico dell'EC8 contraddistinti dalla massima accelerazione spettrale. Il tipo di fluido posto nell'intercapedine tra palo e contenitore è un'altra variabile dell'analisi e sono stati considerati tre fluidi, aventi diversa viscosità dinamica μ : acqua ($\mu = 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), olio industriale ($\mu = 1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), olio siliconico ($\mu = 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$). Si riportano solo i risultati relativi all'olio siliconico, che appaiono i più interessanti ai fini applicativi. Un altro parametro dell'analisi è il rapporto tra diametro della camicia esterna al palo e diametro del palo, che nell'esempio è stato fissato assumendo $D_{\text{est}} = 1.1D_{\text{palo}}$.

Come già detto, il parametro variabile nell'esempio riportato è la lunghezza libera dei pali, alla quale sono strettamente connessi la flessibilità e, conseguentemente, il periodo fondamentale del sistema. L'intervallo di variazione della lunghezza libera considerato va da 1m a 5m. Ai fini di evidenziare l'interesse di una simile tipologia di isolamento è possibile effettuare un confronto della risposta strutturale tra i casi di sovrastruttura su base fissa senza palificata e sovrastruttura con pali liberi con fluido e, in assenza di fluido, con il solo smorzamento strutturale equivalente del 5%.

La risposta nel caso di sovrastruttura a base fissa è espressa in termini di spostamento relativo e accelerazione assoluta della base. In presenza della palificata si aggiunge anche il momento flettente nella sezione di base, che è quella di passaggio tra parte libera e infissa del palo ed è la più sollecitata.

3.1 Caso a

La Figura 8 riporta l'accelerazione orizzontale al suolo nel tempo: il valore massimo è di $1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ rilevato a circa 4 s dall'inizio della registrazione.

Le Figure 9 e 10 riportano rispettivamente la risposta nel tempo della struttura a base fissa ed i valori massimi delle grandezze di interesse per la struttura su pali.

Il risultato è particolarmente interessante, perché, in funzione della lunghezza del tratto libero, si ha un abbattimento sia dello spostamento da 3,5cm a valori sotto 1cm, sia dell'accelerazione da $3,2\text{ms}^{-2}$ a valori inferiori ad $1,5\text{ ms}^{-2}$. Quindi è indubbia l'efficacia della strategia di isolamento, con notevoli vantaggi rispetto ad una struttura a base fissa. L'aspetto interessante è che diminuisce non solo l'accelerazione, ma soprattutto lo spostamento, che dovrebbe crescere, visto che la struttura aumenta la sua flessibilità. Un'altra considerazione è che, aumentando la lunghezza libera dei pali, la risposta strutturale migliora, infatti esiste un'attenuazione della risposta. In realtà se da un lato il sistema diventa più flessibile e quindi più deformabile, dall'altro una maggiore lunghezza libera comporta un aumento del termine viscoso e l'effetto di quest'ultimo è prevalente sul primo aspetto. Occorre inoltre osservare i bassi valori del momento flettente, che dal punto di vista della resistenza dei materiali confermano l'effettiva realizzabilità della tecnologia, infatti il momento che porta a snervamento l'acciaio ($f_y = 510\text{Nmm}^{-2}$) nella sezione di base è di circa 1600kNm .

Si osservi che i contributi dissipativi di fluido viscoso e smorzamento del 5% in generale non danno effetti confrontabili, infatti nell'esempio considerato il contributo dell'olio siliconico è preponderante su quello dello smorzamento del 5%, che è del tutto trascurabile.

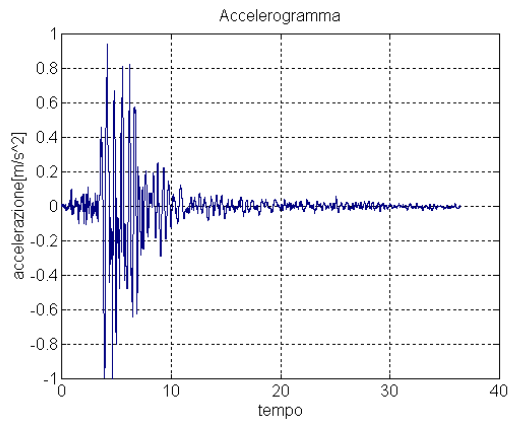


Figura 8 Terremoto del Friuli (1976), registrazione di Tolmezzo
Ambiesta, componente EW

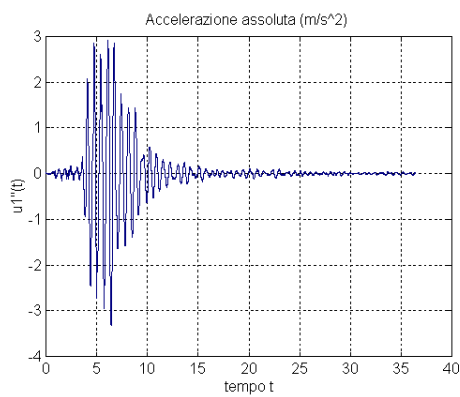
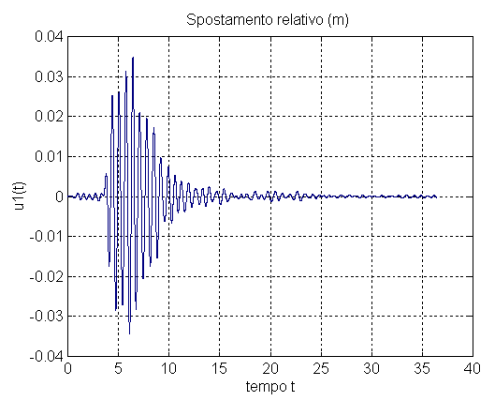


Figura 9a, 9b. Risposta al terremoto di Tolmezzo-Ambiesta EW dell'oscillatore semplice a base fissa

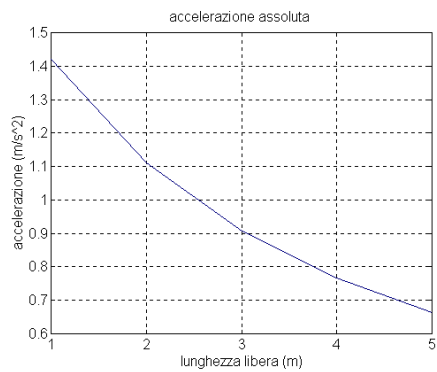
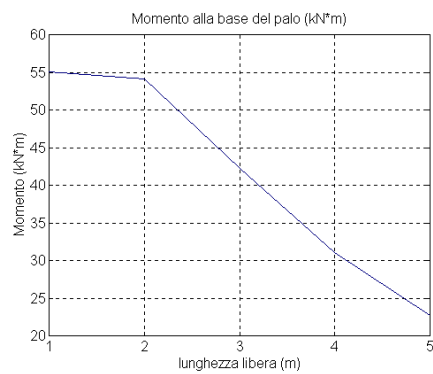
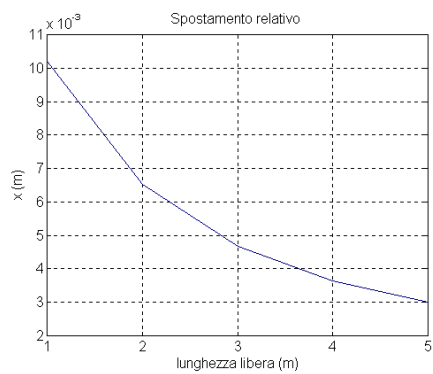


Figura 10a, b, c Risposta dell'oscillatore isolato su pali con dispositivo di dissipazione al terremoto di Tolmezzo-Ambiesta per diversi valori di lunghezza libera

3.2 Caso b

La Figura 11 riporta l'accelerazione orizzontale al suolo nel tempo: il valore massimo è anche in questo caso $1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ rilevato a circa 3 s dall'inizio della registrazione.

I valori massimi relativi alla struttura su pali sono invece riportati in funzione della lunghezza libera in figura 12.

I risultati relativi alla sovrastruttura su base fissa corrispondono ad uno spostamento massimo di circa 2cm e ad un'accelerazione massima intorno a $1,8\text{ms}^{-2}$.

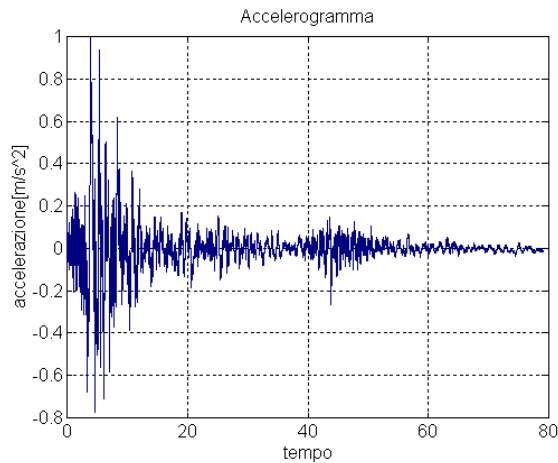


Figura 11 Terremoto dell'Irpinia (1980), registrazione di Bagnoli Iripino, componente EW

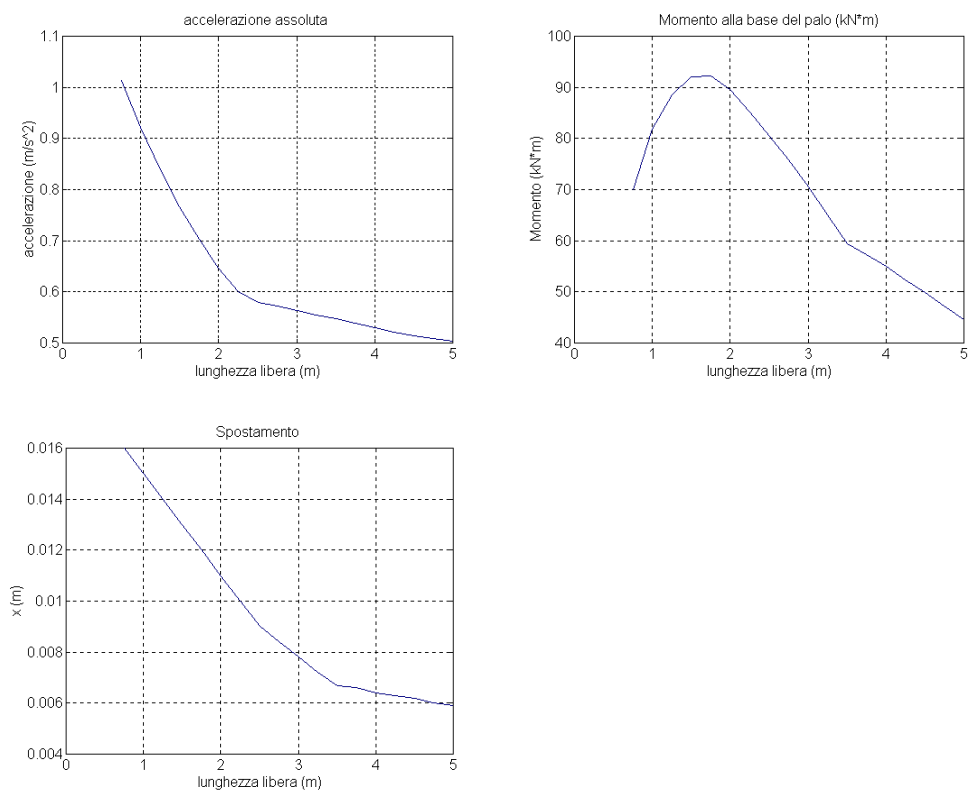


Figura 12 a, b, c Risposta dell'oscillatore isolato su pali con dispositivo di dissipazione al terremoto di Bagnoli Iripino per diversi valori di lunghezza libera

Anche nel caso b) al crescere della lunghezza libera dei pali aumenta l'attenuazione della risposta, sia in termini di spostamento sia di accelerazione e i bassi valori di momento alla base dei pali non costituiscono un problema alla realizzabilità del sistema di isolamento.

Occorre osservare che il dispositivo di dissipazione proposto è tanto più efficace, quanto più è grande la lunghezza libera dei pali, infatti in entrambi i casi a) e b) l'effetto di smorzamento viscoso è decisamente prevalente sull'effetto di riduzione di rigidità del sistema, che potrebbe portare ad un aumento degli spostamenti.

4 CONCLUSIONI

Il dispositivo di smorzamento per isolamento alla base attraverso pali liberi nella parte superiore, che si basa sull'inserimento di un fluido viscoso nella zona in cui il palo di fondazione è svincolato dal terreno circostante, appare, in base a queste prime analisi esplorative, estremamente efficace.

Utilizzando un modello matematico appositamente costruito per valutare la resistenza per attrito che il fluido viscoso oppone al moto in un campo fluido confinato, sono state eseguite alcune simulazioni numeriche, imponendo come eccitazione alla base la storia temporale corrispondente a due accelerogrammi registrati.

Le analisi condotte, seppur riguardanti un modello strutturale estremamente semplificato, hanno fornito risultati incoraggianti, sia per quanto riguarda la riduzione di accelerazione assoluta e spostamenti relativi sulla sovrastruttura, sia per ciò che concerne la resistenza meccanica dei pali di fondazione così modificati.

Naturalmente la realizzazione di un sistema siffatto richiede la messa a punto di tutti i dettagli costruttivi, ma appare promettente laddove i pali di fondazione debbano essere comunque utilizzati in funzione delle specifiche di progetto e dei terreni presenti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- De Stefano A., Foti S., Lancellotta R., Roma V. 1999. Isolamento sismico di strutture su pali. *Atti del IX convegno nazionale l'ingegneria sismica in Italia*, Torino, Settembre 1999
- Foti S. 1996. *Aspetti di isolamento sismico connessi alla tipologia delle fondazioni*, Tesi di laurea. Politecnico di Torino.
- Lancellotta R. 1993. *Geotecnica*. Bologna: Zanichelli, II ed.
- Roma V. 1998. *Attenuazione della risposta sismica di strutture su pali*. Tesi di laurea. Politecnico di Torino, maggio 1998