

## **ALCUNE CONSIDERAZIONI SULL'IMPORTANZA RELATIVA TRA EFFETTI CINEMATICI E INERZIALI PER FONDAZIONI PROFONDE**

Raffaele Di Laora

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli  
raffaele.dilaora@unina2.it*

Alessandro Mandolini

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli  
alessandro.mandolini@unina2.it*

### **Sommario**

Nell'articolo vengono espone alcune considerazioni sul rapporto relativo tra momenti di natura cinematica e inerziale per fondazioni profonde, alla luce delle prescrizioni normative italiane ed europee. Tra i risultati di maggiore rilevanza, viene mostrato come per terreni scadenti, anche se caratterizzati da rigidità costante con la profondità, i momenti di natura cinematica sono spesso maggiori di quelli inerziali. Vengono quindi discussi i contenuti delle NTC dell'Eurocodice 8 in materia di interazione cinematica.

### **Introduzione**

L'interazione cinematica è un fenomeno che si verifica nel momento in cui un palo si oppone alle deformazioni che il terreno, posto in vibrazione dal sisma, tenta di imporgli. Tale resistenza, offerta dal palo a causa della sua maggiore rigidità flessionale, ha come effetto una modifica del moto sismico che arriva alla testa della fondazione. Tuttavia i pali subiscono deformazioni, e conseguenti curvature, anche in assenza di una sovrastruttura. Tali curvature rappresentano quindi un'ulteriore componente sollecitativa che si somma a quella di natura inerziale, ovvero dovuta alle vibrazioni della struttura.

Tale problematica è oggetto di studio da oltre 30 anni (vedere ad esempio Di Laora, 2009). Ci sono inoltre evidenze sperimentali (Mizuno, 1987) che mostrano come alcuni pali si siano rotti sotto sisma in terreni non liquefacibili a profondità alle quali le sollecitazioni inerziali sono da ritenersi trascurabili. L'accumulata evidenza teorica, numerica e sperimentale ha spinto recenti normative, quali l'Eurocodice 8 parte 5 (BS EN 1998-5, 2003) e le NTC 2008 (D.M. 14.1.2008), a imporre la valutazione degli effetti di natura cinematica per fondazioni profonde, sebbene solo in particolari condizioni. Ad esempio la Normativa Italiana, analogamente a quella Europea, afferma che: "In presenza di moto sismico, nei pali si sviluppano sollecitazioni dovute sia alle forze inerziali trasmesse dalla sovrastruttura (interazione inerziale) sia all'interazione tra palo e terreno (interazione cinematica). È opportuno che i momenti flettenti dovuti all'interazione cinematica siano valutati per le costruzioni di classe d'uso III e IV, per sottosuoli di tipo D o peggiori, in siti a sismicità media o alta ( $a_g > 0,25g$ ) e in presenza di elevati contrasti di rigidità al contatto fra strati contigui di terreno. ”.

In principio il sistema a tre componenti dovrebbe essere analizzato nella sua interezza; tuttavia, si dimostra che sotto l'ipotesi di validità del principio di sovrapposizione degli effetti (che a sua volta richiede il comportamento linearmente elastico di tutti i materiali) una più semplice procedura può essere adottata per il calcolo delle sollecitazioni agenti lungo il palo.

Tale metodo (vedere ad esempio Gazetas e Mylonakis, 1998) consiste nelle seguenti fasi consecutive:

- un'analisi di interazione cinematica, nella quale la sovrastruttura non ha massa, finalizzata al calcolo di (a) la prima componente di sollecitazioni che impegna il palo e (b) il moto della fondazione (Foundation Input Motion);
- un'analisi di interazione inerziale dove la struttura, messa in vibrazione dal FIM, scarica forze in fondazione, la quale può eventualmente essere sostituita nell'analisi con un set di molle e smorzatori (impedenza dinamica);
- derivazione della seconda parte di sollecitazioni agenti sui pali a causa delle forze inerziali.

Inoltre, un'ulteriore semplificazione può essere introdotta nella procedura. Di Laora (2009) ha mostrato che l'effetto filtro esercitato dei pali sul moto sismico, sebbene dipendente da una serie di fattori, può essere trascurato in parecchi casi almeno per scopi ingegneristici.

### **L'interazione cinematica nelle norme sismiche**

Le condizioni da verificarsi affinché il progettista sia spinto a valutare gli effetti di interazione cinematica lungo un palo sono state precedentemente esposte con riferimento alle NTC.

L'Eurocodice 8 fornisce indicazioni simili; le differenze rispetto alle NTC possono essere riassunte nel fatto che la condizione sulla sismicità è  $a_g S > 0.1g$  (contro  $a_g > 0.25g$  per le norme italiane). La versione precedente dell'Eurocodice (ENV 1998-5, 1994) imponeva condizioni più restrittive: al di là dell'accelerazione "limite" leggermente più alta ( $a_g > 0.1g$ ), impone la valutazione degli effetti cinematici anche per terreni di migliori caratteristiche (classe C o peggiori) e, soprattutto, solo due delle tre condizioni devono verificarsi. La Tabella 1 riassume le condizioni imposte dalle tre norme.

Tuttavia, molti scenari non ricadenti in tali condizioni portano a momenti cinematici importanti. Nel seguito, si cerca di discutere ciascuna delle condizioni citate, alla luce di un possibile aggiornamento delle norme.

#### *Classe d'importanza*

Il primo aspetto da sottolineare, da cui discenderanno i successivi ragionamenti, è cosa intendere per "importante" o, al contrario, per "trascurabile". Dato che le sollecitazioni flessionali nei pali provengono da interazione cinematica e inerziale, sembra ragionevole considerare gli effetti cinematici come trascurabili se essi sono piccoli rispetto a quelli inerziali.

Da qui, il primo limite di tutte le norme sopracitate è tutte le condizioni ignorano l'entità e la distribuzione di masse strutturali, proporzionali ai momenti inerziali. La sovrastruttura influenza una condizione solo attraverso la sua classe di importanza. Tale affermazione, quindi, appare come un ulteriore coefficiente di sicurezza per strutture importanti, che si aggiunge alle già più grandi sollecitazioni (di natura inerziale) a cui la struttura è chiamata a resistere.

#### *Sismicità*

Seguendo lo stesso spirito, la condizione circa la sismicità sembra meritare discussione. Infatti, l'accelerazione di progetto è proporzionale sia ai momenti cinematici che a quelli inerziali, non modificando la loro importanza relativa. Più in dettaglio, un'accelerazione maggiore può incrementare le deformazioni tangenziali nel terreno e, conseguentemente, diminuire la rigidezza del terreno. Ciò ha un importante effetto sui momenti cinematici (all'incirca inversamente proporzionali alla rigidezza del terreno) mentre un effetto più debole sui momenti inerziali (inversamente proporzionali alla radice quarta della rigidezza del

terreno). Tuttavia, si ritiene che il fenomeno descritto rivesta un'importanza minore sull'importanza relativa tra momenti cinematici e inerziali.

	ENV 1998-5 (1994)	EN 1998-5 (2004)	D.M. 14.01.2008
<b>SISMICITA'</b>	$a_g > 0.10g$	$a_g S > 0.10g$	$a_g > 0.25g$
<b>SOVRA-STRUTTURA</b>	Classe di importanza I o II (*)	Classe di importanza III o IV	Classe di importanza III o IV
<b>PROFILO DEL TERRENO</b>	Tipo C o peggiori  Presenza di elevati contrasti di rigidezza tra strati contigui di terreno	Tipo D, S <sub>1</sub> o S <sub>2</sub>  Presenza di elevati contrasti di rigidezza tra strati contigui di terreno	Tipo D o peggiori  Presenza di elevati contrasti di rigidezza tra strati contigui di terreno
<b>CONDIZIONI DA VERIFICARSI SIMULTANEA MENTE</b>	2/3	3/3	3/3 ?
	(*) la descrizione delle classi I e II corrisponde a quella delle classi IV e III nelle altre due norme		

Tabella 1. Indicazioni in materia di interazione cinematica fornite dalle norme.

### *Profilo del terreno*

Il terreno gioca sicuramente il ruolo più importante nello sviluppo di momenti cinematici importanti. Verrà mostrato, attraverso semplici calcoli, che una serie di scenari nei quali l'interazione cinematica non può essere trascurata non rispettano le condizioni indicate dalle norme.

### Caso 1: terreno a grana fina sovraconsolidato

Il profilo di coesione non drenata di un terreno a grana fina sovra consolidato può essere schematizzato come lineare, tendente al caso costante all'aumentare del grado di sovraconsolidazione. Per un palo impedito di ruotare alla testa immerso in tali terreni, la curvatura alla testa può essere ragionevolmente assunta pari alla curvatura del terreno in superficie (Di Laora, 2009), che in condizioni monodimensionali e nel caso di rigidezza costante, assume la forma:

$$(1/R)_s = \frac{a_s}{V_s^2} = \frac{a_s \rho_s}{G_s} \quad (1)$$

dove  $a_s$  ( $= a_r S$ ) è l'accelerazione del terreno in superficie,  $\rho_s$ ,  $G_s$  e  $V_s$  sono la densità, il modulo di taglio e la velocità delle onde di taglio nel terreno.

Con tale assunzione, il momento cinematico alla testa del palo è dato da:

$$M_{kin} = E_p I_p \frac{a_s}{V_s^2} \quad (2)$$

Di contro, il momento inerziale è proporzionale alla massa portata dal palo. Un palo ben

progettato per carichi assiali porta una massa approssimativamente uguale a:

$$m_p = \frac{\pi d L \alpha c_u}{F g} \quad (3)$$

dove  $d$  e  $L$  sono diametro e lunghezza del palo,  $\alpha c_u$  è la tensione tangenziale limite media lungo la superficie laterale,  $F$  un fattore di sicurezza e  $g$  l'accelerazione di gravità. L'espressione (3) è derivata trascurando la resistenza alla base del palo e riducendo la resistenza risultante per un fattore globale di sicurezza  $F$ . Sulla base di un modello alla Winkler, è possibile mostrare che il momento in testa al palo è quindi uguale a:

$$M_{in} = m_p a_s S_a 0.3 d \left( E_p / E_s \right)^{0.25} \quad (4)$$

dove  $S_a$  è l'accelerazione spettrale corrispondente al periodo della struttura,  $E_p$  e  $E_s$  sono i moduli di Young del palo e del terreno. Dividendo le due espressioni (2) e (4), dato che  $E_s = 3G_s$ , si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{M_{kin}}{M_{in}} &\cong 0.15 \frac{F}{\alpha} \frac{1}{S_a} E_p^{0.75} d^2 L^{-1} E_s^{-0.75} \gamma_s c_u^{-1} = \\ &= 0.15 \frac{F}{\alpha} \frac{1}{S_a} \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0.75} \left( \frac{L}{d} \right)^{-1} \left( \frac{c_u}{\gamma_s d} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

Inoltre, la coesione non drenata può essere legata al grado di sovraconsolidazione del terreno, tramite la relazione (Robertson, 2010):

$$c_u \cong 0.25 (\gamma_s - \gamma_w) \frac{L}{2} OCR^{0.8} \quad (6)$$

dove  $\gamma_w$  è il peso specifico dell'acqua. Assumendo  $\gamma_s = 2 \gamma_w$ , l'equazione (5) può essere riscritta come:

$$\frac{M_{kin}}{M_{in}} \cong \chi \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0.75} \left( \frac{L}{d} \right)^{-2} OCR^{-0.8} \quad (7)$$

Il fattore  $\chi$  tipicamente assume valori da 4 a 10; l'equazione (7) è raffigurata in Fig. 1 al variare della snellezza del palo per diversi valori di  $\chi$ . Chiaramente, pali snelli soffrono maggiormente per interazione inerziale, dato che l'interazione cinematica è insensibile alla lunghezza del palo, mentre quella inerziale è all'incirca proporzionale alla lunghezza stessa. I grafici sono presentati per due diversi valori di OCR; è evidente che il rapporto momento cinematico/inerziale diminuisce con il grado di sovraconsolidazione per la maggiore entità dei momenti inerziali.

Per indagare l'importanza relativa tra i due momenti alla luce delle classi di sottosuolo definite dalle norme, la coesione non drenata può essere posta in funzione della rigidezza del terreno. Adottando poi, come suggerito dall'Eurocodice, un modulo di rigidezza del terreno 3 volte inferiore a quello iniziale, si può scrivere che:

$$\frac{M_{kin}}{M_{in}} \cong 300 \frac{1}{S_a} d^2 L^{-1} E_p^{0.75} \rho_s^{-0.75} g V_s^{-3.5} \quad (8)$$

L'espressione (8) è diagrammata in Fig. 2, in funzione della velocità delle onde di taglio nel terreno (omogeneo). Si noti che esistono situazioni in cui i momenti cinematici sono importanti, e nessuna delle condizioni indicate dalle norme è rispettata.

Caso 2: terreno a grana fina normalconsolidato

Per insufficienza di spazio, vengono mostrati solo equazioni e diagrammi analoghi a quelli precedenti, riferiti ad un terreno la cui rigidezza varia proporzionalmente con la profondità, come può accadere in terreni a grana fina normalconsolidati. Il rapporto tra momento cinematico e inerziale è dato da:

$$\frac{M_{kin}}{M_{in}} \cong \psi \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0.6} \left( \frac{L}{d} \right)^{-2} \quad (9)$$

o, in termini di velocità  $V_{s,30}$ :

$$\frac{M_{kin}}{M_{in}} \cong 11000 \frac{I}{S_a} d^{1.4} L^{-2} E_p^{0.6} \rho_s^{-0.6} g V_{s,30}^{-3.2} \quad (10)$$

Le espressioni (9) e (10) sono rappresentate nelle Figg. 3 and 4. Si nota che rispetto al caso precedente i momenti cinematici sono maggiori; ciò è dovuto al fatto che, a parità di  $V_{s,30}$ , i terreni più superficiali (che influenzano il comportamento del palo) sono in questo caso meno rigidi.

**Considerazioni conclusive**

L'articolo rappresenta un tentativo di discussione sulle indicazioni delle norme italiane ed europee in materia di interazione cinematica. Dallo studio sembra emergere che alcune delle condizioni da verificarsi, affinché il progettista sia invitato a tener conto degli effetti cinematici, siano discutibili, quali ad esempio la classe di importanza e la sismicità; di contro un nuovo parametro, che ha notevole influenza sul rapporto tra momenti cinematico e inerziale, sembra essere la snellezza: pali tozzi sembrano soffrire particolarmente le azioni di natura cinematica.

Aldilà delle evidenti limitazioni dello studio presentato, emerge che una norma razionale dovrebbe tenere in conto in maniera più completa certi aspetti.

**Riferimenti bibliografici**

- BS EN 1998-5, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 5: Foundations, Retaining Structures, Geotechnical Aspects. CEN, Brussels (2004).
- BS ENV 1998-5, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 5: Foundations, Retaining Structures, Geotechnical Aspects. CEN, Brussels (1994).
- Di Laora, R., 2009. Seismic soil-structure interaction for pile supported systems, *Ph.D. Thesis*, University of Napoli "Federico II".
- D.M. 14.1.2008 del Ministero delle Infrastrutture, Nuove norme tecniche per le costruzioni, S.O. n. 30
- G. Gazetas, G. Mylonakis, Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues, *Geotech. Earthq. Engng & Soil Dynamics III* (1998), vol. 2, pp. 1119-1174.
- Mizuno, H., 1987. Pile damage during earthquakes in Japan, In *Dynamic response of pile foundations* (ed. T. Nogami), *ASCE Special Publication*, 53-78.

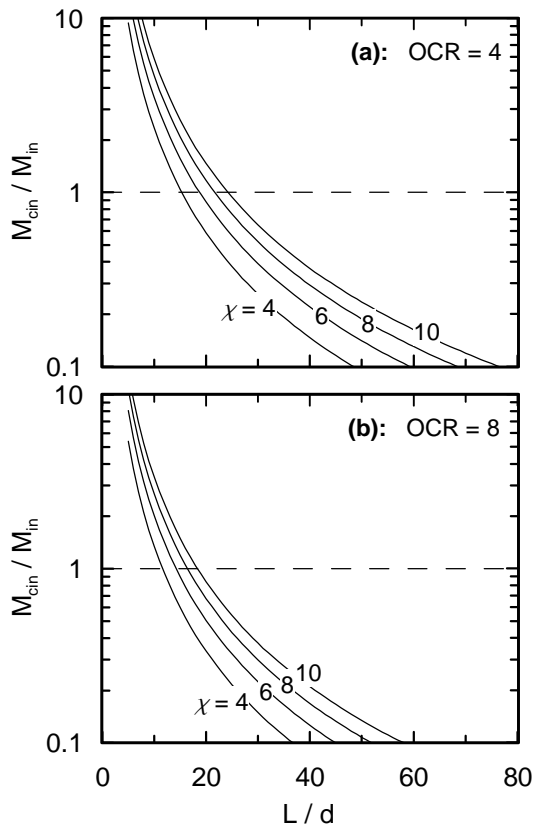


Figura 1. Rapporto tra momento cinematico e inerziale al variare della snellezza  $L/d$  ( $E_p/E_s = 1000$ )

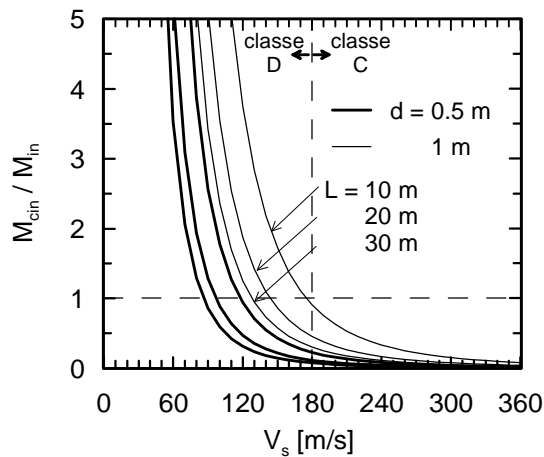


Figura 2. Rapporto tra momento cinematico e inerziale al variare di  $V_s$  ( $E_p = 30 \text{ GPa}$ ,  $\rho_s = 2 \text{ Mg/m}^3$ ,  $S_a = 1$ )

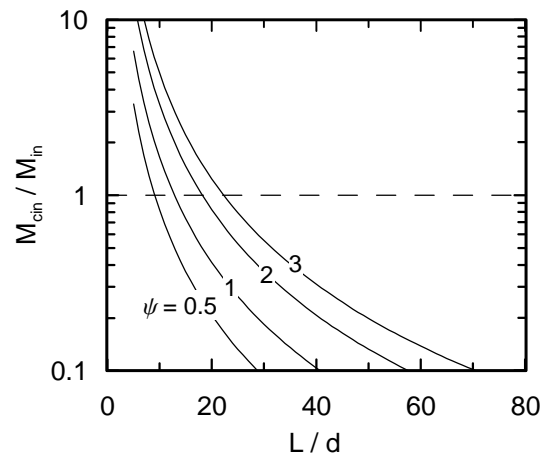


Figura 3. Rapporto tra momento cinematico e inerziale al variare della snellezza  $L/d$  ( $E_p/E_{sd} = 1000$ )

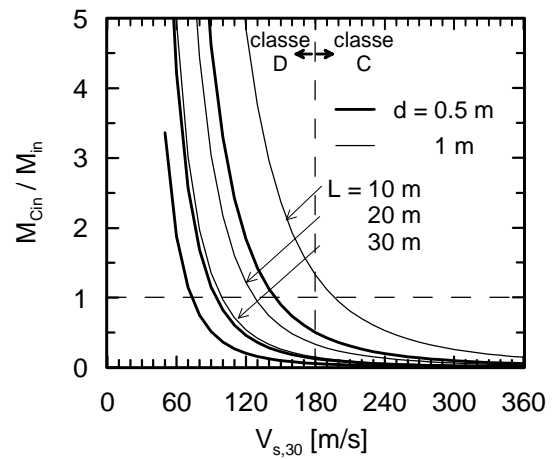


Figura 4. Rapporto tra momento cinematico e inerziale al variare di  $V_{s,30}$  ( $E_p = 30 \text{ GPa}$ ,  $\rho_s = 2 \text{ Mg/m}^3$ ,  $S_a = 1$ )