

## INTERAZIONE DINAMICA TRA FONDAZIONI SUPERFICIALI RAVVICINATE

E. Zeolla

*Università degli Studi del Sannio, Benevento*  
*ezeolla@unisannio.it*

F. de Silva

*Università Federico II, Napoli*  
*Filomena.desilva@unina.it*

S. Sica

*Università degli Studi del Sannio, Benevento*  
*stefsica@unisannio.it*

### Sommario

Nel progetto di edifici in zona sismica raramente si tiene conto dell'interazione tra edifici limitrofi. Le costruzioni, anche se sconnesse strutturalmente, possono però interagire attraverso il terreno di fondazione, in virtù della continuità dello stesso. La nota descrive i risultati di uno studio numerico 3D finalizzato a quantificare gli effetti di interazione tra fondazioni superficiali vicine sotto azioni sia statiche sia dinamiche. In campo dinamico, in particolare, si sono valutate le modifiche che la funzione di impedenza di una fondazione rettangolare rigida subisce in presenza di una seconda fondazione posta a differente distanza dalla prima. I risultati dello studio parametrico mostrano che alle basse frequenze la fondazione in gruppo manifesta sempre una riduzione dei termini di rigidezza della funzione di impedenza mentre alle alte frequenze si possono avere incrementi o decrementi di rigidezza e/o smorzamento rispetto al caso di fondazione singola, in funzione del grado di libertà considerato (traslazionale o rotazionale), della distanza relativa fondazione-fondazione e dello spessore dello strato sofficie presente nel sottosuolo.

### 1. Introduzione

La presenza di costruzioni vicine non viene quasi mai considerata nella prassi progettuale corrente neanche in contesti altamente urbanizzati, come le moderne città metropolitane da un lato o i più antichi centri storici dall'altra. È ben noto, però, che attraverso il terreno di fondazione può generarsi una interazione tra strutture limitrofe non solo in campo statico ma anche in campo dinamico. Sotto sollecitazioni di natura dinamica, infatti, una fondazione che oscilla diffonde un campo d'onda che si propaga nel sottosuolo e rappresenta un disturbo per una fondazione vicina e viceversa. Si generano, infatti, fenomeni multipli di interferenza (costruttiva e/o distruttiva), che possono modificare sensibilmente la risposta della fondazione in gruppo rispetto alla risposta della stessa fondazione considerata isolata. I primi lavori sull'interazione dinamica tra fondazioni adiacenti sono riconducibili a Wartburton et al. (1971), Chang-Liang (1974) e Roesset & Gonzales (1977). Successivamente, Qian e Beskos (1995), tramite un approccio numerico di tipo b.e.m. (*boundary element method*), hanno evidenziato che per alcune frequenze di oscillazione non sempre è conservativo trascurare gli effetti di interazione tra fondazioni ravvicinate come, invece, era stato erroneamente scritto nella vecchia normativa ATC-3 (1984).

I problemi ordinari di interazione terreno-struttura (SSI) sono tipicamente risolti tramite l'approccio delle sottostrutture, andando a definire dapprima le funzioni di impedenza che quantificano l'interazione tra la struttura di fondazione e il terreno su cui essa è poggiata (Gazetas, 1983, 1991). Le funzioni di impedenza  $\bar{K}_{ij}$  sono state esplicitate come la somma di una parte reale, che rappresenta la rigidezza dinamica, e di una parte immaginaria, che tiene conto dello smorzamento del sistema:

$$\bar{K}_{ij} = k_{ij}(a_0)K_{ij} + i\omega(a_0)C_{ij} \quad (1)$$

dove:

- i pedici  $i, j$  indicano che  $\bar{K}_{ij}$  collega la componente  $i$  del vettore dei carichi trasmessi dalla fondazione al terreno alla componente  $j$  del vettore spostamento;
- la rigidezza a bassa frequenza,  $K_{ij}$ , e il coefficiente di smorzamento,  $C_{ij}$ , dipendono dal modulo di rigidezza a taglio del terreno,  $G$ , e dal coefficiente di Poisson,  $\nu$ , oltre che dalla dimensione caratteristica della fondazione,  $B$ ;
- i coefficienti dinamici  $k_{ij}(a_0)$  e  $c_{ij}(a_0)$ , dipendono dalla frequenza di vibrazione,  $\omega$ , dalla dimensione caratteristica della fondazione,  $B$ , e dalla velocità delle onde di taglio,  $V_s$ , attraverso la frequenza adimensionale,  $a_0 = \omega B/V_s$ .

Malgrado negli anni siano state proposte numerose soluzioni in forma chiusa che contemplano le situazioni più disparate in merito alla forma e all'ammorsamento della fondazione, alla tipologia di sottosuolo (omogeneo o stratificato) e alla rigidezza flessionale dell'elemento di fondazione (Pitilakis & Karatzetzou, 2015), in letteratura finora si è sempre fatto riferimento al caso di fondazione "solitaria", cioè senza altre costruzioni nelle sue vicinanze.

Al fine di estendere il metodo delle sottostrutture anche alla risoluzione pratica di problemi ben più complessi di interazione mutua SSSI, in tale nota viene proposta una procedura innovativa per il calcolo della matrice di impedenza "modificata" per la fondazione target (*master*) nel caso in cui quest'ultima risenta della presenza di una seconda fondazione, posta a una certa distanza da essa (Fig. 1). In particolare, le componenti della matrice d'impedenza della fondazione in gruppo sono state messe a confronto con i termini della stessa fondazione considerata agente da sola sullo stesso sottosuolo (semispazio elastico o strato soffice su semispazio).

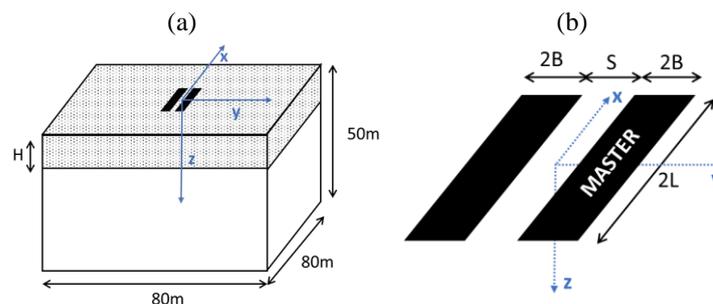


Fig. 1. Modello analizzato (a) e gruppo di due fondazioni (b).

## 2. Rigidezza statica di una fondazione rettangolare in gruppo

In questa sezione si illustrano i risultati di uno studio parametrico relativo ad un sistema di due fondazioni rigide rettangolari (2 m di larghezza e 10 m di lunghezza), poste sulla superficie di un semispazio ideale o di un deposito stratificato corrispondente allo schema di strato soffice su semispazio (Fig. 1).

Lo studio parametrico è stato condotto facendo variare la distanza,  $S$ , tra le due fondazioni ( $S=0,5 \div 4$  m) e lo spessore  $H$  dello strato sofficie ( $H= 3 \div 10$  m). La velocità delle onde di taglio del semispazio è stata fissata pari a 54 m/s; per il deposito stratificato lo strato superiore ha una  $V_s$  di 54 m/s mentre quello inferiore è stato caratterizzato da una  $V_s$  di 100 m/s. Le fondazioni sono state sollecitate tramite un campo armonico di velocità, con frequenza variabile nell'intervallo 1÷13 Hz. Le tensioni prodotte al contatto terreno-fondazione sono state opportunamente integrate per ottenere le forze (momenti) risultanti che, divisi per gli spostamenti (rotazioni), sono stati usati per calcolare le diverse componenti dell'impedenza in funzione della frequenza di oscillazione. Per ricavare la rigidità statica ( $f \rightarrow 0$ ) dell'insieme fondazione-terreno, la stessa procedura è stata applicata imponendo una velocità costante ai nodi della fondazione. Per ulteriori dettagli sulla procedura utilizzata si può fare riferimento a Zeolla et al. (2021, 2022).

In figura 2 sono riportate le rigidità statiche associate alla traslazione lungo  $z$ ,  $y$  e  $x$  e alla rotazione intorno a  $x$  e  $y$ , calcolate per diversi valori della distanza fondazione-fondazione,  $S$ , e dello spessore  $H$  dello strato deformabile. Nei diagrammi i valori di  $S$  e  $H$  sono stati adimensionalizzati rispetto alla semilarghezza della fondazione,  $B$ , mentre le rigidità sono state divise per il modulo di taglio,  $G$ , e la semilarghezza,  $B$ . Per lo strato su semispazio, nell'adimensionalizzazione dei termini di rigidità è stato adottato il modulo di taglio dello strato superiore più sofficie. Dai grafici si osserva che in presenza di una seconda fondazione tutte le componenti di rigidità della fondazione *master* sono inferiori ai valori corrispondenti alla fondazione isolata (indicatori rossi), fatta eccezione per la rotazione intorno all'asse  $x$ . In questo caso, infatti, si osservano due comportamenti a seconda del verso di rotazione delle due fondazioni (concorde o discorde). Quando il verso di rotazione è concorde, la seconda fondazione esercita una sorta di vincolo su quella *master*, che di conseguenza subisce un aumento della sua rigidità rotazionale. Se il verso è discorde, invece, si osserva una riduzione come riscontrato per gli altri gradi di libertà. L'interazione mutua attraverso il terreno sottostante diminuisce all'aumentare della distanza tra le due fondazioni. Come atteso, le fondazioni sia in configurazione singola sia affiancata denotano un comportamento più rigido quando sono poggiate sul mezzo stratificato che sul semispazio elastico omogeneo (Gazetas, 1983).

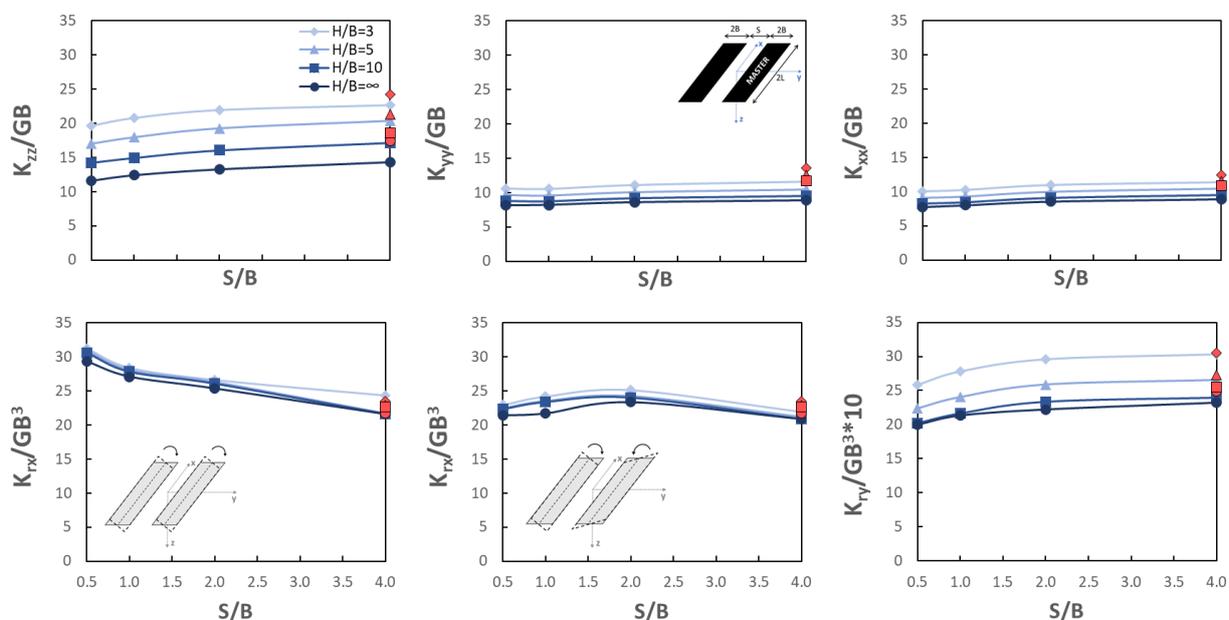


Fig. 2. Componenti di rigidità a bassa frequenza della fondazione *master* su semispazio e su strato su semispazio, al variare di  $S/B$ .

## 2.1 Coefficienti di interazione in campo statico

Dai risultati illustrati nella sezione precedente, sono stati ricavati dei coefficienti di interazione di tipo operativo, che consentono di modificare i termini di rigidezza della fondazione singola per tener conto della presenza della fondazione vicina:

$$\alpha_{ij} = (K_{ij, \text{singola}} - K_{ij, \text{coppia}}) / K_{ij, \text{singola}} \quad (2)$$

dove  $K_{ij, \text{singola}}$  e  $K_{ij, \text{coppia}}$  sono le componenti di rigidezza della fondazione principale nel caso in cui sia da sola o in gruppo. In figura 3 si riporta l'andamento dei coefficienti di interazione con il rapporto S/B. L'interazione mutua fondazione-fondazione si riduce all'aumentare del rapporto S/B. I coefficienti  $\alpha$  sono più bassi per il mezzo stratificato e convergono verso la soluzione del semispazio ( $H/B=\infty$ ) all'aumentare del rapporto H/B. Come già osservato per le rigidezze rotazionali (Fig. 2), anche i coefficienti di interazione relativi alla rotazione intorno a x, mostrati in figura 3, risultano essere meno sensibili al rapporto H/B.

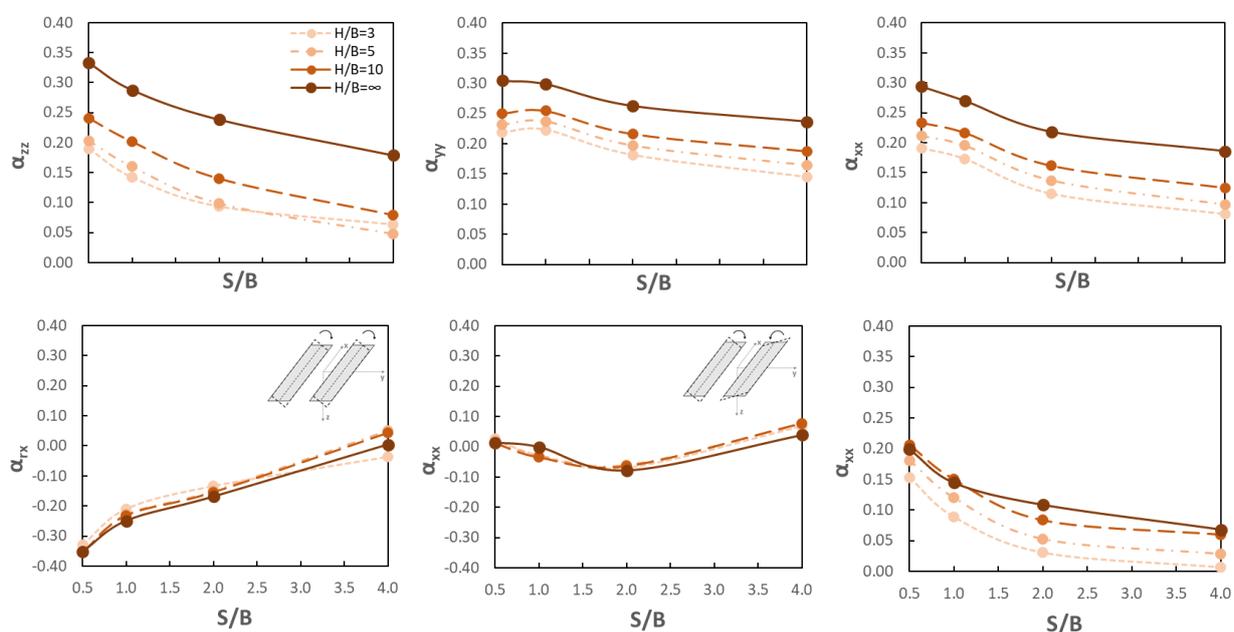


Fig. 3. Coefficienti di interazione statici al variare di S/B.

## 3. Coefficienti dinamici

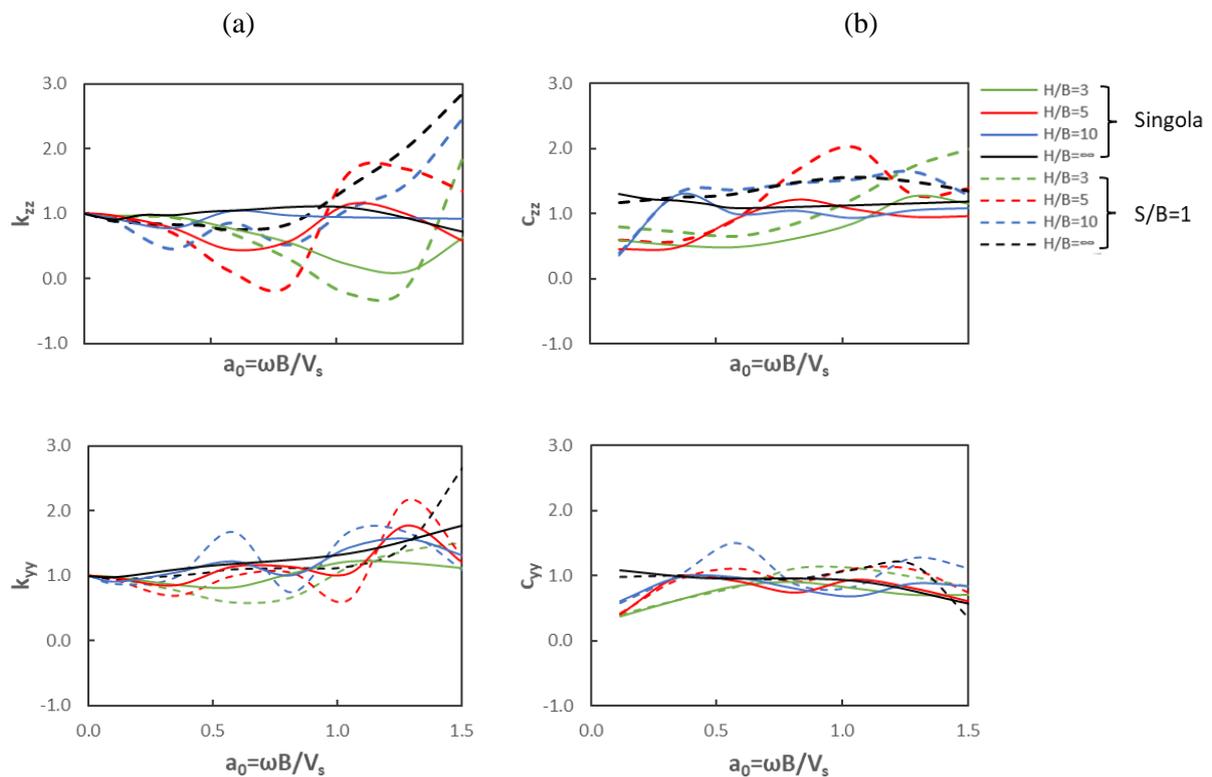
In figura 4 si riportano i coefficienti dinamici (rigidezza e smorzamento) della funzione di impedenza della fondazione principale per i modi traslazionali lungo z e y, nell'ipotesi di fondazione isolata (linee continue) o in coppia con una fondazione identica (linee tratteggiate), per le due configurazioni di sottosuolo considerate e per due differenti rapporti della distanza fondazione-fondazione ( $S/B=1$  e  $S/B=2$ ). Con riferimento al semispazio (linee nere), per bassi valori della frequenza adimensionale  $a_0$ , le impedenze della fondazione *master* in gruppo si avvicinano a quelle della fondazione singola. A frequenze più elevate si osservano differenze significative, soprattutto per il modo di vibrare in direzione verticale.

Nel caso dello strato su semispazio (linee colorate), i coefficienti della fondazione singola (linee continue) fluttuano intorno ai valori del semispazio, a causa dell'interferenza tra il campo d'onda generato dalla fondazione principale e quello riflesso all'interfaccia tra i due strati di terreno.

Il sistema composto dalla coppia di fondazioni (linee tratteggiate) esaspera questa risposta, a causa delle interferenze multiple tra le onde propagate dalle due fondazioni e quelle riflesse dallo strato più rigido. Si osserva, pertanto, un aumento delle ondulazioni sia per i coefficienti di rigidezza sia di smorzamento.

#### 4. Conclusioni

La nota riporta alcuni risultati di uno studio numerico ben più ampio sull'interazione dinamica tra due fondazioni superficiali ravvicinate poste su un semispazio ideale o su un deposito stratificato. Dai risultati ottenuti è emerso che per la fondazione in gruppo l'interazione mutua che si genera attraverso il terreno sottostante produce una riduzione della rigidezza statica della funzione di impedenza per quasi tutti i gradi di libertà della fondazione. Per distanze tra le due fondazioni più piccole, l'effetto dell'interazione è più marcato e, per quantificare la riduzione di rigidezza statica della fondazione principale in presenza della sua vicina, sono stati introdotti dei coefficienti di interazione in funzione della distanza fondazione-fondazione e dello spessore dello strato deformabile. Nel range delle basse frequenze, infine, i coefficienti dinamici di rigidezza e smorzamento della fondazione in coppia sono risultati molto prossimi a quelli della fondazione singola, mentre per frequenze di oscillazione più elevate si osservano notevoli differenze. A frequenze medio-alte non si ha un andamento univoco: in alcuni casi l'aumento del coefficiente dinamico può compensare o addirittura superare la riduzione della rigidezza statica ma in altri casi (mezzo stratificato), il coefficiente dinamico può essere molto inferiore dell'unità, con ricadute applicative importanti nello studio della risposta dinamica e sismica della sovrastruttura.



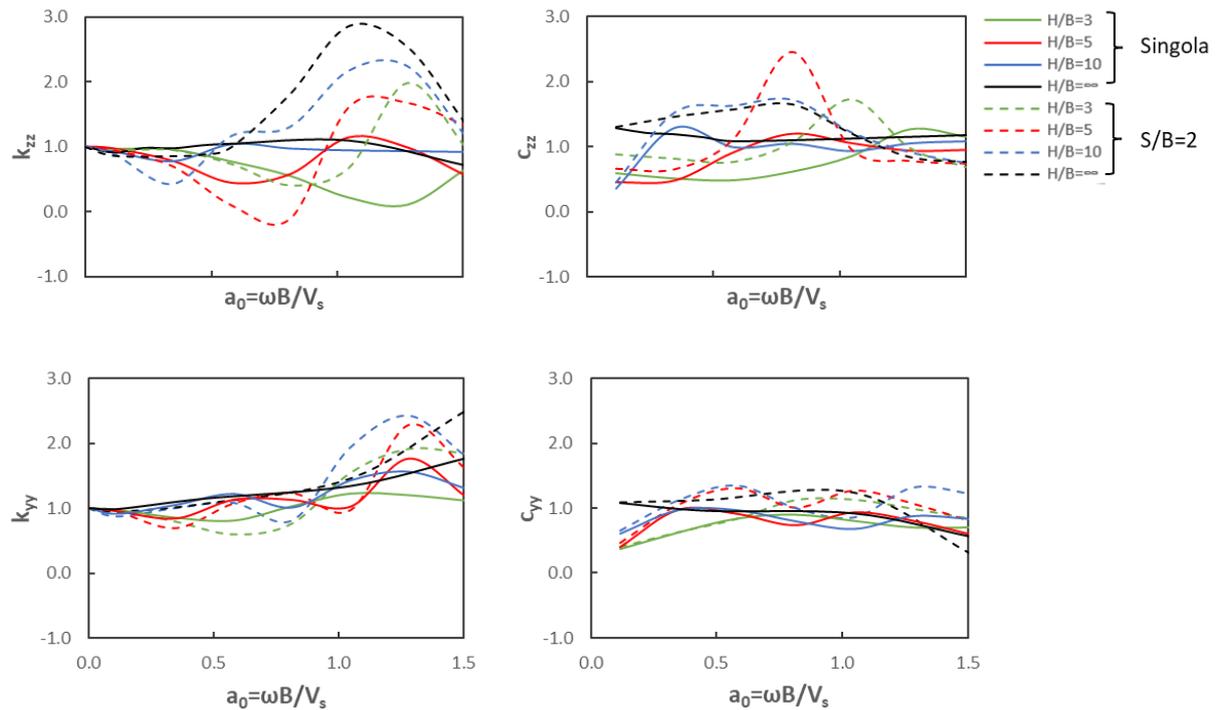


Fig. 4. Coefficienti dinamici di rigidezza (a) e smorzamento (b) per i modi traslazionali (lungo  $z$  e  $y$ ) della fondazione master (in gruppo) su semispazio o strato su semispazio per  $S/B=1$  e  $S/B=2$ .

## Riconoscimenti

Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito del programma di ricerca 2022-2024 ReLUIIS-DPC, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile, come contributo al Work Package 16 (Task 16.3).

## Bibliografia

- Gazetas G., (1983). Analysis of machine foundation vibrations: state of the art. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2: 2-42.
- Gazetas, G. (1991). Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. *Journal of geotechnical engineering*, 117(9), 1363-1381.
- Gonzalez, J.J., & Roesset, J.M. (1977). Dynamic interaction between adjacent structures. Research report, 1976-1977.
- Liang, C. (1974). Dynamic response of structures in layered soils (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Pitilakis D., Karatzetzou A., (2015). Dynamic stiffness of monumental flexible masonry foundations. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13 (1), 67-82.
- Qian, J., & Beskos, D. E. (1995). Dynamic interaction between 3-D rigid surface foundations and comparison with the ATC-3 provisions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 24(3), 419-437.
- Warburton, G. B., Richardson, J. D., & Webster, J. J. (1971). Forced vibrations of two masses on an elastic half space.
- Zeolla E., De Silva F., Sica S., (2021). Dynamic cross-interaction between two closely spaced shallow foundations. *Compdyn 2021, 8th ECCOMAS thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering*, Athens.
- Zeolla, E., Sica, S., & De Silva, F. (2022). Dynamic impedance functions for neighbouring shallow footings. In *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III* (pp. 883-892). CRC Press.