

## INFLUENZA DELL'ETEROGENEITÀ STRATIGRAFICA SULLA RISPOSTA DINAMICA DI TORRI IN MURATURA

Aldo Fabio D'Oria\*, Gaetano Elia, Annamaria di Lernia, Giuseppina Uva

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica - Politecnico di Bari*

*\*[aldofabio.doria@poliba.it](mailto:aldofabio.doria@poliba.it)*

### Sommario

La nota si focalizza sulla modellazione numerica dell'interazione terreno-struttura in campo dinamico di una torre in muratura poggiante su depositi deformabili classificabili come depositi di classe C secondo le NTC18. L'eterogeneità stratigrafica è introdotta nelle simulazioni implementando quattro diversi profili di velocità delle onde di taglio. Le analisi dinamiche sono condotte utilizzando un approccio diretto, modellando sia la struttura che il terreno in ambiente 3D ed assumendo un comportamento visco-elastico per entrambi, allo scopo di indagare gli effetti indotti dall'eterogeneità stratigrafica del deposito sulla risposta dinamica strutturale in fase elastica. I risultati evidenziano evidenti scostamenti rispetto alla condizione di base fissa, fornendo anche alcune relazioni pratiche utili a prevederne l'entità.

### 1. Introduzione

Le strutture in muratura rappresentano una considerevole parte del patrimonio costruito italiano, essendo diffuse capillarmente su tutto il territorio nazionale. Tra queste vi sono le torri che, sotto forma di strutture di difesa nei castelli di epoca medievale o di torri campanarie, sono presenti in diversi centri storici. Come noto, le strutture in muratura, in generale, risultano particolarmente propense al danneggiamento e soggette a crolli parziali o totali in seguito ad eventi sismici, spesso a causa delle caratteristiche scadenti dei materiali nonché della configurazione geometrica e della modalità costruttiva adoperata.

Recentemente sono stati condotti diversi studi tesi a valutare la vulnerabilità strutturale delle torri murarie. Tuttavia, non di rado viene assunta una condizione di base fissa al piede della struttura (Milani, 2019; Valente & Milani, 2018; Castellazzi et al., 2018), trascurando così l'effetto della deformabilità del terreno che può modificare notevolmente il comportamento dinamico della torre. Tra i pochi lavori disponibili in letteratura in cui il substrato fondale viene preso in considerazione (Mortezaei & Motaghi, 2016; de Silva, 2018; de Silva et al., 2020) vi sono gli studi di Casolo et al. (2017) condotti su una torre in muratura ideale, le cui caratteristiche geometriche e meccaniche sintetizzano quelle di una serie di strutture reali sparse nel Nord Italia (Tab. 1), poggiante su un deposito omogeneo. A partire da questo lavoro, la presente nota si propone di indagare l'effetto che l'eterogeneità stratigrafica determina sulla risposta dinamica della torre in questione, esaminando anche il comportamento della struttura in elevazione in corrispondenza dei modi superiori al primo. Ciò al fine di superare le classiche formulazioni analitiche proposte per sistemi ad un grado di libertà (Maravas et al., 2014; Wolf, 1985; Veletsos & Nair, 1975) che, invece, considerano il solo primo modo di vibrare della struttura.

Nel seguito vengono illustrati i criteri secondo i quali è stata introdotta l'eterogeneità del terreno ed i principali risultati ottenuti dalle analisi dinamiche di interazione condotte secondo un approccio diretto, modellando tridimensionalmente sia la torre che il deposito di fondazione (Fig. 1a).

*Tabella 1. Caratteristiche geometriche e proprietà meccaniche della torre esaminata*

Altezza (m)	Sezione di base (m)	Fondazione (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$ (-)
27	5.3 x 5.3	6.8 x 6.8 x 2.5	1900	3500	0.1

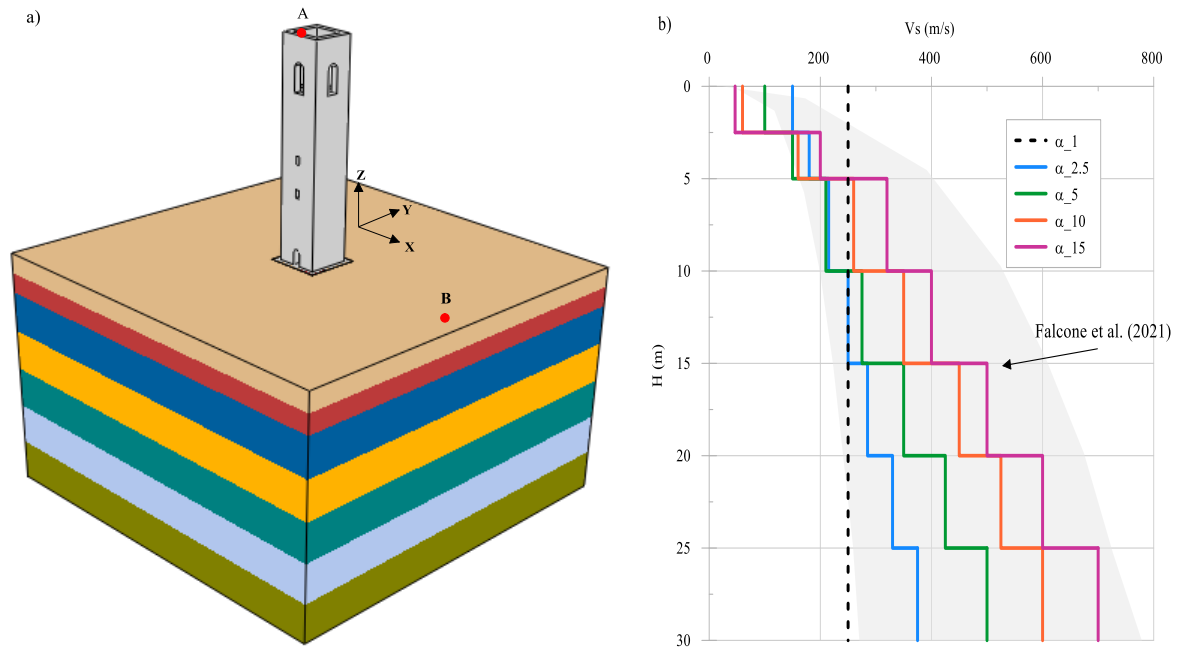


Fig. 1. (a) Modello 3D di interazione terreno-struttura adottato ed indicazione dei punti di controllo A e B; (b) profili stratigrafici definiti a partire dalle indicazioni fornite da Falcone et al. (2021).

## 2. Caratterizzazione dei profili stratigrafici

I profili stratigrafici, per un totale di quattro, sono stati definiti in maniera tale da potersi considerare rappresentativi di condizioni reali riscontrabili sul territorio italiano. A tal fine si è fatto riferimento al fuso di variazione della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  con la profondità fornito da Falcone et al. (2021) per descrivere successioni litologiche costituite da argilla e sabbia. Ciascun deposito è stato assunto profondo 30 m e suddiviso in strati aventi medesimo spessore (2.5 m i primi due e 5 m i successivi). Inoltre, i quattro profili (Fig. 1b) sono accomunati dallo stesso valore della velocità equivalente delle onde di taglio ( $V_{s,eq}$ ) pari a 250 m/s, tale da classificarli come depositi di classe C ( $180 < V_{s,eq} < 360$  m/s) secondo le NTC18 (Consiglio dei Ministri, 2018).

Per quantificare il livello di eterogeneità caratteristico di ciascuna sequenza stratigrafica è stato preso in considerazione il parametro  $\alpha$  (Vinale & Simonelli, 1983), definito come:

$$\alpha = \frac{V_H}{V_0} \quad (1)$$

dove  $V_H$  rappresenta il valore di  $V_s$  alla base del deposito e  $V_0$  quello in sommità. Sono stati, quindi, considerati quattro profili stratigrafici caratterizzati, rispettivamente, da valori di  $\alpha$  pari a 2.5, 5, 10 e 15, con l'obiettivo di coprire un'ampia gamma di gradi di eterogeneità rispetto alla condizione omogenea equivalente ( $\alpha=1$ ).

## 3. Effetto dell'eterogeneità sulla risposta dinamica del sistema torre-terreno

### 3.1 Descrizione del modello tridimensionale torre-terreno

La torre, la sua fondazione ed il deposito sono stati assemblati all'interno di un unico modello 3D utilizzando il codice agli elementi finiti ABAQUS (2014), come mostrato in Fig. 1a. La condizione al contorno adottata lungo i bordi verticali del dominio del terreno è di tipo *tied-nodes*. Tale condizione è stata implementata tramite una relazione di tipo *master-slave* tra i nodi in corrispondenza dei suddetti bordi, permettendo di legare lo spostamento del set di nodi di controllo (*master*) allo spostamento dei nodi di accoppiamento (*slave*) posti specularmente sul lato opposto. Contestualmente, lungo i bordi

verticali sono stati bloccati gli spostamenti in direzione verticale e le rotazioni. L'estensione del modello è stata posta pari a 50 m, al fine di evitare la riflessione delle onde in corrispondenza dei contorni. L'interfaccia tra fondazione e deposito è stata definita mediante una legge di interazione di tipo *penalty* in direzione tangenziale ed una di tipo *hard contact* per il comportamento in direzione normale, allo scopo di evitare la compenetrazione tra le superfici di contatto. Sia la torre che il terreno sono caratterizzati da un legame visco-elastico lineare, in cui lo smorzamento di tipo viscoso è stato introdotto attraverso la formulazione di Rayleigh, assumendo un valore di target pari al 5% in entrambi i casi. Alla base del deposito è stato applicato direttamente l'input accelerometrico, nell'ipotesi di *bedrock* rigido, considerando il segnale registrato dalla stazione di Mirandola (MO) durante il terremoto dell'Emilia-Romagna del 2012, caratterizzato da un'accelerazione massima di 0.22g. In Fig. 1a sono anche riportati i due punti di controllo delle analisi, selezionati, rispettivamente, in sommità della torre (punto A) e sulla superficie del deposito (punto B) ad una distanza dalla struttura tale da essere rappresentativo della risposta di campo libero. Maggiori dettagli sul caso di studio in esame sono riportati da D'Oria et al. (2022).

### 3.2 Analisi dinamiche del sistema torre-terreno

I risultati delle analisi sono presentati in Fig. 2 in termini di funzioni di amplificazione, definite come rapporto tra gli spettri di Fourier dei segnali registrati rispettivamente nei punti A e B di Fig. 1a. Al fine di realizzare un confronto con la condizione a base fissa, le frequenze di risonanza ( $f_0$ ) nel caso di struttura poggianti su substrato rigido sono state utilizzate come riferimento per la normalizzazione delle curve relative ai modelli con substrato deformabile ( $f_{SSI}$ ). Attraverso la Fig. 2 è possibile evidenziare i tipici effetti dovuti all'interazione dinamica terreno-struttura rispetto all'ipotesi di spostamenti impediti al piede: i) la riduzione delle frequenze di risonanza del sistema, che tende a divenire più marcata al crescere del rapporto di eterogeneità; ii) l'aumento dello smorzamento del sistema all'aumentare di  $\alpha$ , che comporta una crescente attenuazione dei picchi di amplificazione.

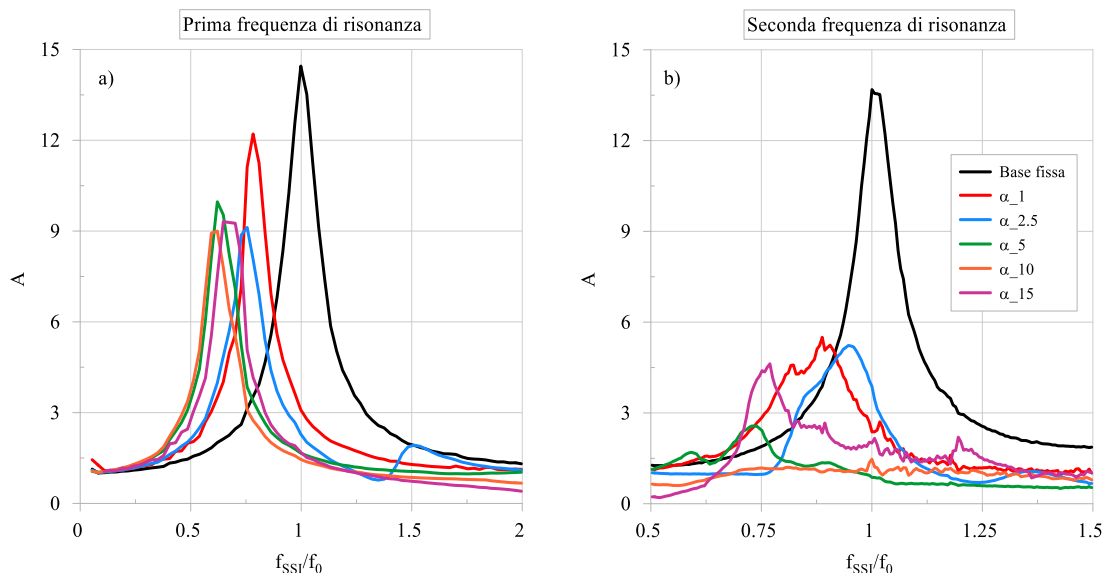


Fig. 2. Funzioni di amplificazione della torre su base deformabile normalizzate, rispettivamente, per la prima (a) e per la seconda (b) frequenza di risonanza della struttura su base fissa.

La Fig. 3 riporta i periodi di vibrazione della struttura su suolo deformabile ( $T_{SSI}$ ) normalizzati rispetto ai corrispettivi valori su base fissa ( $T_0$ ), in funzione del parametro di eterogeneità  $\alpha$ . In particolare, il primo periodo di oscillazione  $T_{SSI-1}$  aumenta molto più rispetto al secondo  $T_{SSI-2}$  per ciascun rapporto di eterogeneità considerato, partendo da un valore di circa 1.28 nel caso omogeneo ( $\alpha=1$ ) per poi crescere sino al massimo di 1.63 per  $\alpha=10$ , oltre il quale sembra iniziare a decrescere. La curva che si

riferisce al  $T_{SSI-2}$  è invece caratterizzata da un andamento più irregolare, con rapporto  $T_{SSI}/T_0$  variabile tra 1.13 ed 1.36. I risultati suggeriscono, quindi, come gli effetti d'iterazione possano essere particolarmente significativi, comportando un'elongazione dei periodi fortemente dipendente dalle caratteristiche stratigrafiche del deposito di fondazione. Ciò dovrebbe essere tenuto in debita considerazione ai fini di un'adeguata valutazione della risposta dinamica della struttura in elevazione.

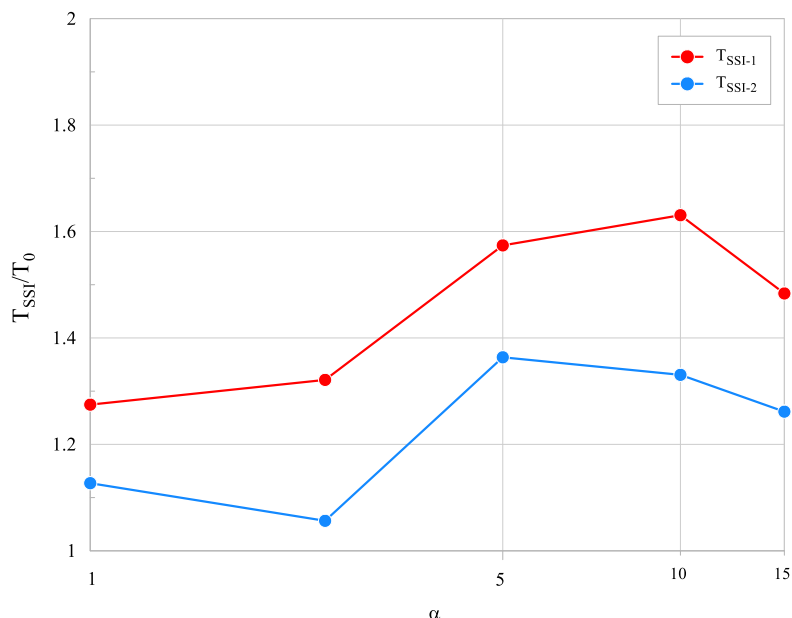


Fig. 3. Andamento del primo ( $T_{SSI-1}$ ) e del secondo ( $T_{SSI-2}$ ) periodo di vibrazione della struttura su base deformabile normalizzati per i corrispettivi valori su base fissa ( $T_0$ ) al variare del rapporto di eterogeneità.

### 3.3 Analisi modali del sistema torre-terreno

Congiuntamente alle analisi dinamiche nel dominio del tempo appena descritte, sono state realizzate delle analisi modali al fine di indagare l'effetto della deformabilità del deposito sulle forme modali strutturali. In Tab. 2 è riportato un raffronto tra le frequenze di risonanza ottenute dalle due tipologie di analisi (dinamica e modale) che evidenzia la sostanziale coerenza tra i risultati. La discrepanza, espressa in termini percentuali, è in generale trascurabile per ogni profilo stratigrafico e si attesta intorno a valori di poco superiori al 3%. Inoltre, si precisa che, limitatamente al caso omogeneo, è stato dapprima verificato che le simulazioni numeriche restituiscano risultati in linea con le previsioni della formulazione analitica proposta da Veletsos & Nair (1975) per sistemi ad un grado di libertà.

Tabella 2. Raffronto tra le frequenze di risonanza ottenute da analisi modale (Mod) ed analisi dinamica (Din)

	$\alpha = 1$			$\alpha = 2.5$			$\alpha = 5$			$\alpha = 10$			$\alpha = 15$		
	Mod (Hz)	Din (Hz)	$\epsilon$ (%)	Mod (Hz)	Din (Hz)	$\epsilon$ (%)	Mod (Hz)	Din (Hz)	$\epsilon$ (%)	Mod (Hz)	Din (Hz)	$\epsilon$ (%)	Mod (Hz)	Din (Hz)	$\epsilon$ (%)
f1	1.43	1.42	0.70	1.31	1.35	-3.05	1.15	1.16	-0.87	1.12	1.11	0.89	1.22	1.22	0
f2	7.41	7.32	1.21	7.67	7.81	-1.83	6.28	6.05	3.66	6.22	6.20	0.32	6.52	6.54	-0.31

Le Fig. 4 e 5 mostrano, rispettivamente, il primo ed il secondo modo di vibrare in direzione x della torre. Si può osservare come l'effetto dell'interazione col terreno sia minimo, se non pressoché trascurabile, per la prima forma modale (Fig. 4) che rimane inalterata rispetto alla condizione a base fissa. La situazione, invece, cambia quando si passa ad analizzare l'andamento della seconda forma modale (Fig. 5). L'effetto dell'interazione col deposito appare più evidente dal momento che sembrano subentrare componenti torsionali e longitudinali (direzione y) che modificano la deformata strutturale.

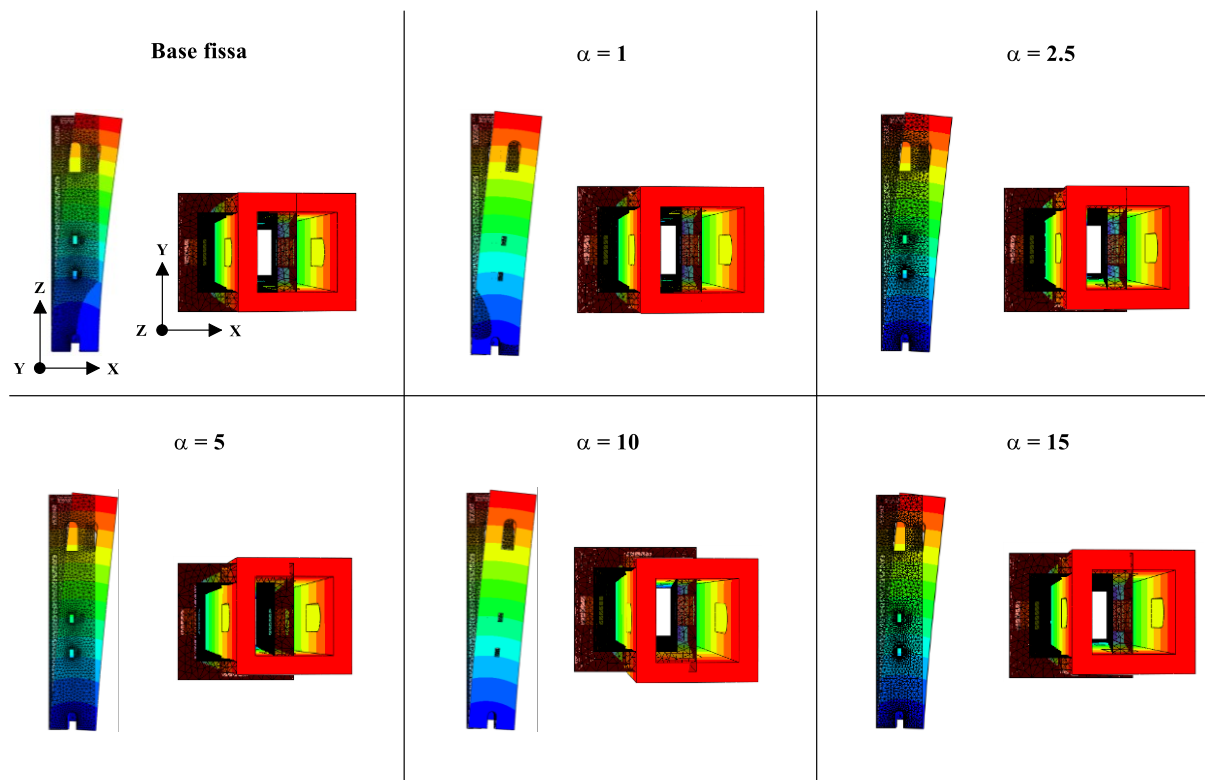


Fig. 4. Primo modo di vibrare in direzione  $x$  della struttura a base fissa e a base deformabile per ciascun rapporto di eterogeneità  $\alpha$  considerato.

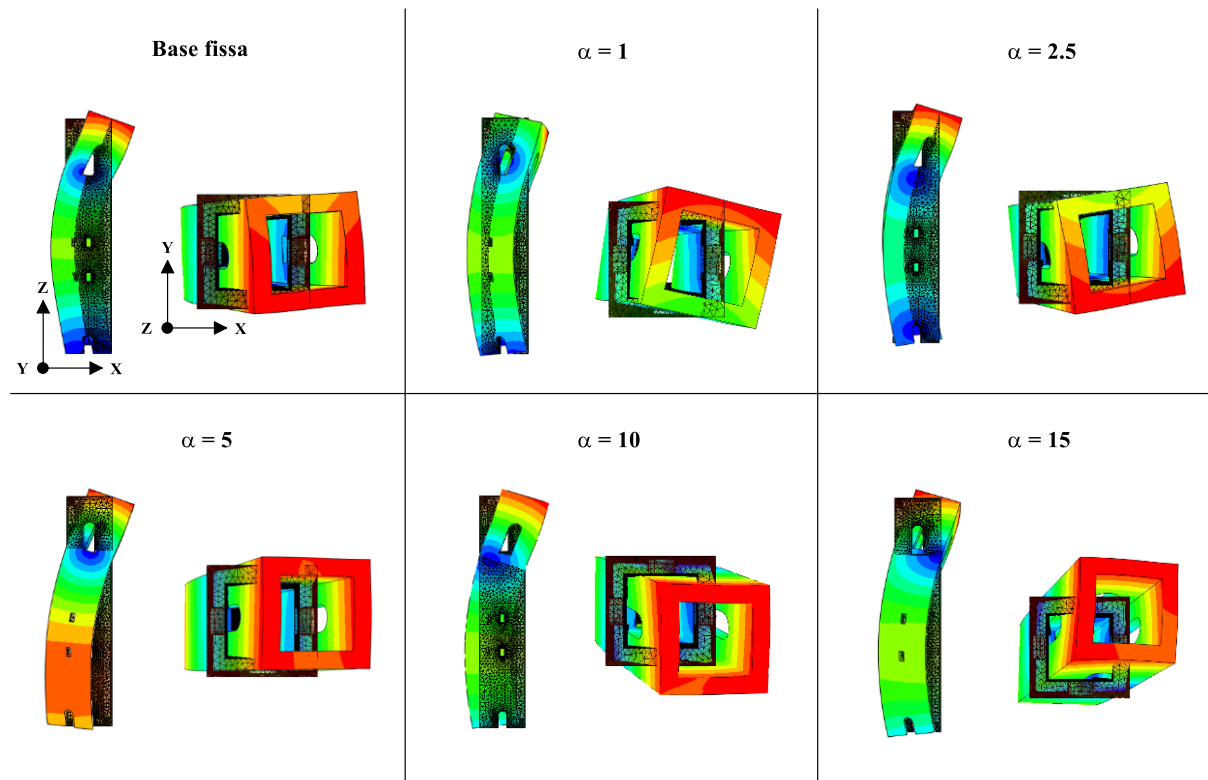


Fig. 5. Secondo modo di vibrare in direzione  $x$  della struttura a base fissa e a base deformabile per ciascun rapporto di eterogeneità  $\alpha$  considerato.

#### 4. Conclusioni

Il lavoro presenta la valutazione della risposta dinamica di una torre muraria ideale, rappresentativa di alcuni campanili ubicati nelle aree sismiche del Nord Italia, evidenziando l'effetto che l'eterogeneità stratigrafica ha sul comportamento in campo elastico del sistema terreno-struttura.

I risultati numerici mostrano alcuni dei tipici effetti legati alla interazione terreno-struttura, consistenti nell'elongazione dei periodi della struttura su base deformabile e nell'incremento del rapporto di smorzamento, che risultano significativamente dipendenti dalle caratteristiche stratigrafiche del deposito di terreno. Si riscontra, inoltre, come il primo modo di vibrare del sistema non risulti sostanzialmente influenzato dai fenomeni di interazione. Al contrario, appare evidente un effetto di accoppiamento tra torre e terreno per quanto concerne il secondo modo di vibrare, tanto più significativo quanto più alto è il rapporto di eterogeneità.

Sviluppi futuri della ricerca prevedono la descrizione del comportamento elasto-plastico della muratura attraverso modelli costitutivi avanzati capaci di prevedere differenti scenari di danneggiamento della struttura in elevazione dovuti all'azione sismica al variare del rapporto di eterogeneità del deposito di fondazione.

#### Bibliografia

- ABAQUS (2014). ABAQUS documentation version 6.14. Dassault Systèmes, Providence, RI.
- Casolo S., Diana V., Uva G. (2017). "Influence of soil deformability on the seismic response of a masonry tower", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5), 1991-2014.
- Castellazzi G., D'Altri A. M., de Miranda S., Chiozzi A., Tralli A. (2018). "Numerical insights on the seismic behaviour of a non-isolated historical masonry tower", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(2), 933-961.
- Consiglio dei Ministri (2018). DM 17 gennaio 2018 in materia di "aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni". Gazzetta ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018.
- de Silva F. (2020). "Influence of soil-structure interaction on the site-specific seismic demand to masonry towers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, 106023.
- de Silva F., Pitilakis D., Ceroni F., Sica S., Silvestri F. (2018). "Experimental and numerical dynamic identification of a historic masonry bell tower accounting for different types of interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109, 235-250.
- D'Oria A. F., Elia G., di Lernia A., Uva G. (2022). "Influence of soil deposit heterogeneity on the dynamic behaviour of masonry towers", In *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III* (pp. 780-791). CRC Press.
- Falcone G., Acunzo G., Mendicelli A., Mori F., Naso G., Peronace E., ... & Moscatelli M. (2021). "Seismic amplification maps of Italy based on site-specific microzonation dataset and one-dimensional numerical approach", *Engineering Geology*, 289, 106170.
- Milani G. (2019). "Fast vulnerability evaluation of masonry towers by means of an interactive and adaptive 3D kinematic limit analysis with pre-assigned failure mechanisms", *International Journal of Architectural Heritage*, 13(7), 941-962.
- Maravas A., Mylonakis G., Karabalis D.L. (2014). "Simplified discrete systems for dynamic analysis of structures on footings and piles" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61, 29-39.
- Mortezaei A., Motaghi A. (2016). "Seismic assessment of the world's tallest pure-brick tower including soil-structure interaction", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), 04016020.
- Vinale S., Simonelli A. L. (1983). "L'eterogeneità dei terreni nei fenomeni di amplificazione locale", XV Convegno Nazionale di Geotecnica, Spoleto, Vol. 1.
- Valente M., Milani G. (2018). "Effects of geometrical features on the seismic response of historical masonry towers", *Journal of Earthquake Engineering*, 22(sup1), 2-34.
- Veletsos A.S., Nair V.D. (1975). "Seismic interaction of structures on hysteretic foundations", *Journal of the Structural Division*, 101, 109-29.
- Wolf J. (1985) Dynamic soil-structure interaction. Prentice Hall, Englewood Cliff