

## L'INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA SULLA PRESTAZIONE SISMICA DEI SISTEMI DI PROTEZIONE A MASSA ACCORDATA (TMD): UN AGGRAVIO O UN'OCCASIONE?

Davide Noè Gorini

*Università di Trento*

*davidenoe.gorini@unitn.it*

Pasquale Roberto Marrazzo

*University of Salerno*

*pasqualemarrazzo@email.com*

Elide Nastri

*University of Salerno*

*enastri@unisa.it*

Rosario Montuori

*University of Salerno*

*r.montuori@unisa.it*

### Sommario

I sistemi di protezione a massa accordata, noti come *Tuned Mass Dampers* (TMD), stanno trovando un crescente sviluppo e applicazione nel controllo della risposta di edifici e ponti nei confronti dell'azione sismica e del vento. Un TMD è concepito per mitigare le vibrazioni strutturali mediante il suo accordamento alle caratteristiche di risonanza della struttura. Tuttavia, l'interazione dell'opera con il terreno può compromettere l'efficacia del TMD a causa di fattori trascurati nella progettazione corrente, quali l'allungamento dei periodi di vibrazione, l'insorgere di modi di deformazione roto-traslazionali accoppiati e gli effetti inerziali nel sistema di fondazione. Pertanto, il presente studio propone un approccio di progetto integrato (*SSI-Informed*) che sfrutta l'interazione con il terreno di fondazione per esaltare la capacità di mitigazione delle vibrazioni del dispositivo. Il metodo *SSI-Informed* è derivato mediante un'analisi numerica estensiva, condotta utilizzando un modello numerico semplificato (SimilSDOF) nell'ambito di un inquadramento adimensionale del problema dinamico. Sono individuati i casi in cui la prestazione del TMD è influenzata dall'interazione terreno-struttura in modo trascurabile, moderato e prevalente. Per ogni caso, sono identificate le configurazioni del dispositivo che minimizzano gli effetti indotti dal sisma sull'opera sfruttando un bilanciamento ottimale tra le caratteristiche inerziali e dissipative del complesso terreno-struttura. Il marcato miglioramento della prestazione ottenuto con il progetto *SSI-Informed* è verificato attraverso l'utilizzo massivo del SimilSDOF e mediante modelli numerici avanzati.

### 1. Inquadramento

Nella forma più elementare, un TMD è costituito da una massa,  $m_{TMD}$ , collegata alla struttura tramite una molla lineare e uno smorzatore: la massa può scorrere relativamente alla struttura in direzione orizzontale. Den Hartog (1956) ricavò delle soluzioni per le proprietà di TMD convenzionali atte a

minimizzare le vibrazioni nella struttura in elevazione indotta dall'azione del sisma o del vento, idealizzando quest'ultima come un sistema a un grado di libertà (SDOF) con comportamento lineare. Il criterio di Den Hartog è tutt'ora un caposaldo per la progettazione dei TMD.

Una strategia efficace per migliorare la prestazione di un TMD consiste nell'aumentare il rapporto di massa  $G_1 = m_{\text{TMD}}/m_{\text{str}}$  tra la massa del TMD e quella della struttura in elevazione. Tuttavia, per i dispositivi convenzionali  $G_1$  non eccede il 3-5% a causa di vincoli costruttivi. Al fine di poter sfruttare valori maggiori di  $G_1$ , il TMD può essere inteso come una sopraelevazione sismo-resistente connessa al sistema strutturale principale tramite dispositivi di varia natura, soluzione nota come TMD a elevato rapporto di massa (LM-TMD). De Angelis et al. (2012) e Marrazzo et al. (2023) hanno esteso il criterio di Den Hartog (1956) al caso dei LM-TMD, sempre trascurando l'interazione dello SDOF col terreno. Per converso, crescono le dimostrazioni numeriche e sperimentali che l'interazione terreno-struttura può ridurre o compromettere l'efficacia dei TMD, in alcuni casi rendendo quest'ultimo addirittura un componente dannoso che amplifica gli effetti del sisma nell'opera. L'interazione terreno-struttura può infatti i) allungare i periodi di vibrazione, ii) far insorgere modi di deformazione combinati roto-traslazionali del sistema strutturale e iii) in alcuni casi aumentare la domanda di spostamento e duttilità per le membrature (Wu et al., 1999; Ghosh et al., 2004; Farshidianfar, 2013; Gorini e Chisari, 2022; Gorini et al., 2025a).

Nel seguito, effetti salienti dell'interazione dinamica terreno-struttura-TMD sono messi in luce mediante un caso di studio di riferimento. Sulla base dei risultati ottenuti, viene messo a punto uno schema interpretativo semplificato tramite cui viene ricavato un criterio progettuale che esalta la prestazione dei TMD sfruttando i caratteri distintivi dell'interazione terreno-struttura.

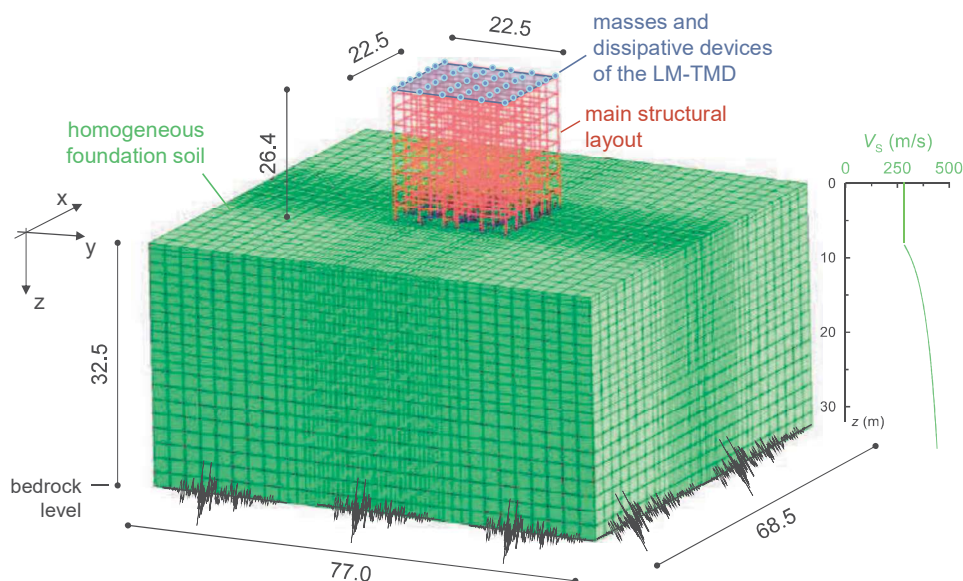


Fig 1. Discretizzazione agli Elementi Finiti del caso di studio (Gorini et al., 2025a).

## 2. Interazione dinamica terreno-struttura-TMD: un caso studio

L'interazione non-lineare e dipendente dalla frequenza di un TMD progettato secondo criteri convenzionali (trascurando l'interazione col terreno) e il complesso terreno-struttura viene discussa nel seguito tramite analisi dinamiche non lineari condotte sul modello numerico di Figura 1, sviluppato in ambiente OpenSees (McKenna et al., 2010). I dettagli della modellazione sono riportati in Gorini et al. (2025a), per cui segue una presentazione di sintesi delle caratteristiche del sistema.

Il modello simula un edificio situato nella zona ad alta sismicità dello Stretto di Messina. Il sottosuolo è costituito da un deposito di Ghiaie di Messina avente il profilo della velocità delle onde di taglio a piccole deformazioni illustrato in Figura 1 e angolo di resistenza al taglio di  $38^\circ$  (Gorini, 2019; Gorini e Callisto, 2020). Il comportamento del terreno è descritto da un legame costitutivo incrudente calibrato

su dati sperimentali. L'edificio consiste in una struttura in calcestruzzo armato risalente agli anni '70, ovvero progettata nel rispetto di un quadro normativo privo di specifiche nei confronti dell'azione sismica. Le membrature strutturali sono riprodotte mediante elementi *trave* aventi sezioni a fibre con comportamento elasto-plastico incrudente. Il TMD è modellato semplicemente come delle masse poste in sommità a ogni colonna e collegate all'edificio tramite una combinazione di isolatori elastomerici e ad attrito. In questo modo è stato possibile variare agevolmente la configurazione del TMD esplorando un intervallo ampio del rapporto di massa  $G_1=5-30\%$ .

L'efficienza  $\eta=(\text{MID}_{\text{NoTMD}}-\text{MID}_{\text{TMD}})/\text{MID}_{\text{NoTMD}}$  del TMD è qui intesa come la riduzione del massimo *drift* di interpiano (MID) prodotta dalla presenza del TMD, rispetto al caso senza TMD. In Figura 2,  $\eta$  è messa in relazione al rapporto di massa per diverse intensità del moto sismico di input,  $\text{IM} = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ , corrispondenti agli Stati Limite di Operatività, Danno, Salvaguardia della Vita e Collasso.

Risulta evidente che la capacità del TMD di contenere le vibrazioni strutturali aumenta con il rapporto di massa. Inoltre, un rapporto di massa maggiore tende a ridurre gli effetti sfavorevoli indotti dall'interazione della struttura col terreno. Questi effetti però mutano fortemente con l'intensità del moto sismico. In particolare, quando l'interazione terreno-struttura viene trascurata, l'efficienza del TMD risulta moderatamente influenzata dall'intensità della forzante sismica. Al contrario, nel modello completo la risposta del TMD è molto più sensibile all'intensità della forzante, evidenziando il ruolo cruciale dell'interazione col terreno. Quando l'intensità del sisma è tale da mobilitare una risposta marcatamente non-lineare nel terreno di fondazione, l'efficienza del TMD si riduce significativamente e, nel caso di bassi  $G_1$ , il dispositivo può addirittura amplificare le vibrazioni strutturali a causa della sua interazione dinamica con modi di deformazione controllati dal *rocking* in fondazione. D'altro canto, la presenza di un rapporto di massa elevato del TMD contrasta parzialmente questo effetto dannoso. Sulla base di questi risultati, nel seguito si introduce un criterio progettuale per i TMD, denominato *SSI-informed*, pensato per sfruttare i punti cardine della risposta dinamica complessiva.

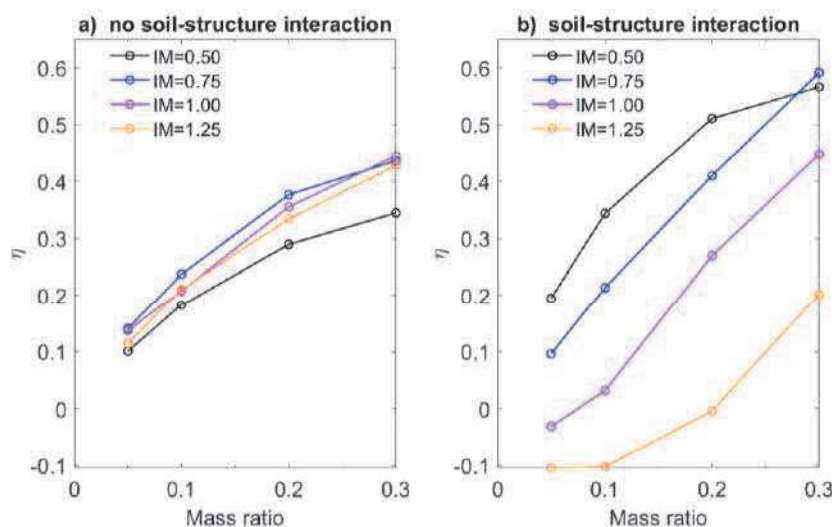


Fig 2. Efficienza del TMD in funzione del suo rapporto di massa, a) trascurando l'interazione terreno-struttura e b) considerando la risposta del modello completo di Fig. 1.

### 3. Progettazione *SSI-informed* dei TMD

Il metodo di progetto *SSI-informed* è stato ricavato mediante un uso estensivo del modello interpretativo SimilSDOF (Gorini e Chisari, 2022) raffigurato in Figura 3, sviluppato per analizzare in modo agevole aspetti distintivi dell'interazione dinamica terreno-struttura-TMD. Si è fatto riferimento all'inquadramento adimensionale del problema dinamico proposto da Gorini e Chisari (2022), che hanno ricavato i parametri dominanti l'interazione tra un TMD e l'insieme terreno-struttura in campo lineare: oltre ai parametri considerati nella progettazione tradizionale, sono stati identificati come gruppi dominanti la rigidezza relativa terreno-struttura, la snellezza della struttura, il rapporto di forma della

fondazione e il raggio d'inerzia globale normalizzato della struttura in elevazione.

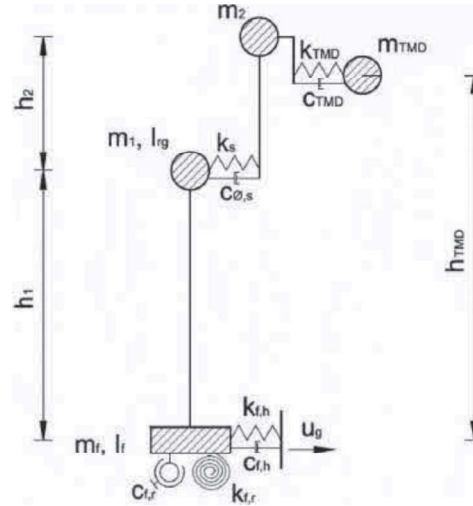


Fig 3. Modello interpretativo SimilSDOF per l'interazione dinamica terreno-struttura-TMD (Gorini e Chisari, 2022).

Nel presente studio il SimilSDOF, implementato in OpenSees, è stato utilizzato per lo svolgimento di un'analisi parametrica in cui si è considerata un'ampia variabilità dei parametri dominanti. Si sono identificate le configurazioni di ottimo del TMD, corrispondenti alla minimizzazione del *drift* strutturale indotto dalla forzante sismica. Sono state pertanto derivate delle correlazioni analitiche di progetto tra le proprietà di ottimo del TMD e i parametri dominanti l'interazione del sistema strutturale con il terreno. Si rimanda a Gorini et al. (2025b) per una descrizione completa della formulazione matematica e della procedura di progetto. A titolo di esempio, la Figura 4 mostra il peculiare andamento della frequenza adimensionale di ottimo del TMD,  $G_{2,opt}$ , predetta dal modello analitico *SSI-informed* in funzione della rigidezza relativa terreno-struttura,  $G_6$ , e della snellezza della struttura in elevazione,  $G_7$ . Risulta evidente l'ottimo accordo tra la previsione e il dato numerico.

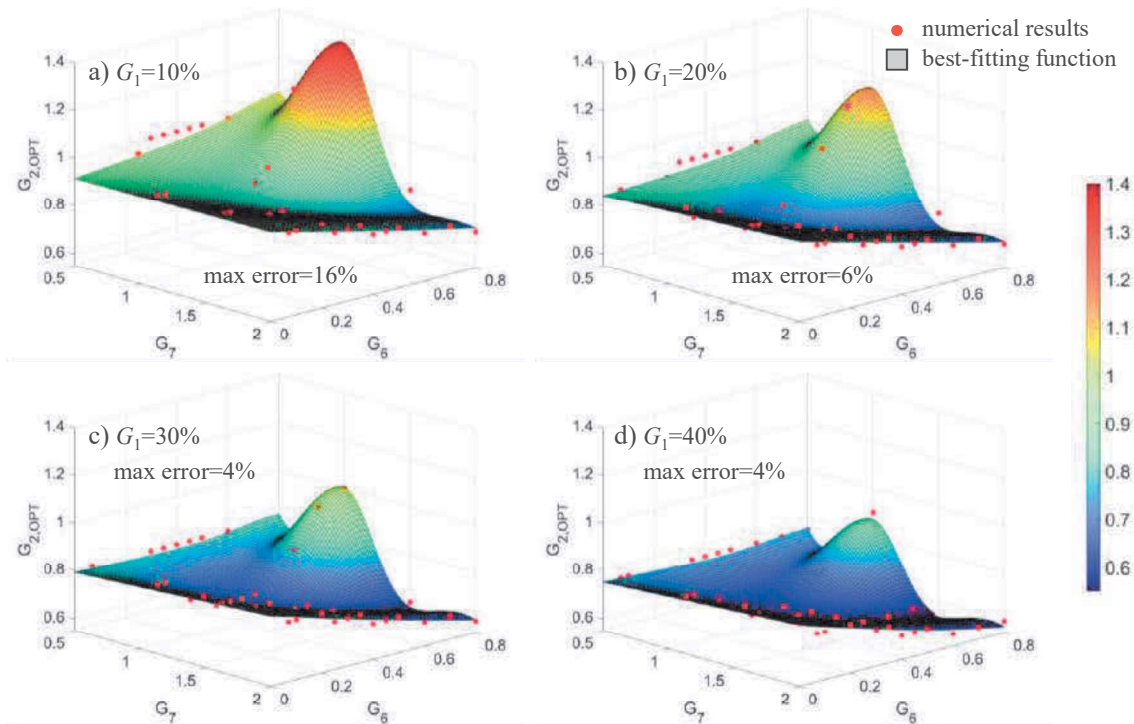


Fig 4. Confronto tra il modello analitico SSI-Informed (superfici) per la valutazione della frequenza

adimensionale di ottimo del TMD,  $G_{2,opt}$ , e i risultati numerici (punti), rappresentati in funzione della rigidezza relativa struttura-terreno,  $G_6$ , e del rapporto di snellezza della struttura,  $G_7$ , per rapporti di massa del TMD  $G_1=10-40\%$  (Gorini et al., 2025b).

#### 4. Progettazione *SSI-informed* vs progettazione tradizionale

Il criterio di progettazione *SSI-informed* dei TMD è stato validato in due fasi. In primo luogo, è stata verificata la capacità del metodo proposto di condurre a una prestazione strutturale di ottimo utilizzando il SimilSDOF (Fase 1). Successivamente, l'efficacia della progettazione *SSI-informed* è stata validata con riferimento al caso di riferimento di Figura 1 (Fase 2). Nel seguito si introducono i risultati della Fase 1, mentre si rimanda a Gorini et al. (2025b) per una visione completa del processo di validazione. Nella Fase 1 è stata effettuata una valutazione comparativa tra la progettazione *SSI-informed* e i due noti criteri proposti da Den Hartog (1956) e Marrazzo et al. (2024), che trascurano l'interazione col sistema di fondazione. La risposta dinamica di un'ampia varietà di casi terreno-struttura è stata analizzata mediante simulazioni dinamiche nel dominio del tempo con il SimilSDOF, prendendo in considerazione molteplici scenari sismici. Per ogni sistema terreno-struttura si è considerato un TMD con rapporto di massa  $G_1=5-30\%$ .

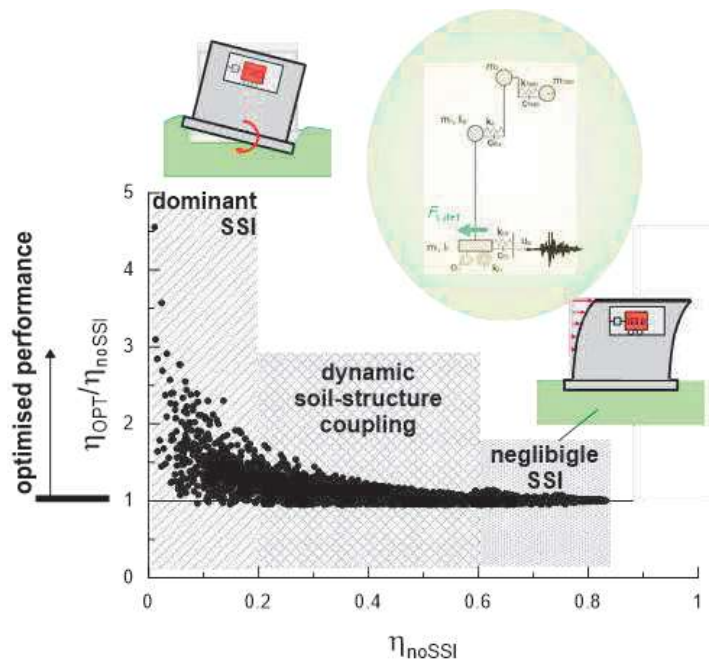


Fig 5. Valutazione comparativa dell'efficienza di TMD, con basso e elevato rapporto di massa, considerando una progettazione *SSI-informed* ( $\eta_{OPT}$ ) e tradizionale ( $\eta_{noSSI}$ ) (Gorini et al., 2025b).

I risultati dello studio parametrico sono rappresentati in Figura 5 come rapporto  $\eta_{OPT}/\eta_{DH}$  tra l'efficienza del TMD ottenuta con il criterio di progetto *SSI-informed* e quella associata alla progettazione convenzionale. Si possono identificare tre regioni: Regione 1 corrispondente a un'interazione terreno-struttura trascurabile; Regione 2 in cui vi è un accoppiamento significativo tra la risposta dinamica della struttura e del sistema terreno-fondazione; Regione 3 in cui la risposta è dominata dal terreno. Nella Regione 1, un TMD progettato secondo il metodo *SSI-informed* conduce a una prestazione molto simile a quella associata a una progettazione convenzionale che, come atteso, risulta essere l'ottimo quando l'interazione con il terreno di fondazione produce effetti trascurabili. Invece, nella Regione 2 la progettazione convenzionale porta a una prestazione del TMD molto meno efficiente, mentre l'approccio *SSI-informed* evita tale *disaccordamento* ed esalta la capacità del dispositivo di mitigare gli effetti del sisma (il rapporto di efficienza aumenta sensibilmente). Nella Regione 3 la progettazione convenzionale diventa inefficace, mentre la strategia che sfrutta l'interazione terreno-struttura risulta essere in grado di migliorare sostanzialmente la prestazione sismica della struttura in elevazione in virtù

di un conveniente accordamento del TMD ai modi di deformazione combinati roto-traslazionali del sistema complessivo.

## 5. Conclusioni

Il presente studio evidenzia come l'interazione terreno-struttura possa essere vista come un'opportunità per potenziare le strategie di protezione delle opere nei confronti dell'azione sismica, tramite un opportuno bilanciamento delle caratteristiche inerziali e dissipative nell'intero sistema terreno-struttura-dispositivo. In quest'ottica la prestazione del TMD viene ottimizzata in funzione dei parametri adimensionali che governano il comportamento dinamico complessivo, quali la rigidità relativa terreno-struttura, che controlla il grado di accoppiamento dinamico tra i sotto-sistemi, e parametri legati alla distribuzione di massa nell'assetto strutturale, i quali influenzano il contributo del *rocking* in fondazione.

Si è dimostrato che, rispetto a criteri attualmente in uso, la progettazione *SSI-informed* dei TMD non solo è in grado di prevenire effetti dannosi ma anche di migliorare significativamente la prestazione strutturale. Questo *modus* sta venendo attualmente impiegato per sviluppare differenti sistemi di protezione delle opere dalle forzanti naturali che sfruttino esplicitamente l'interazione col sistema di fondazione, col fine di individuare soluzioni progettuali più robuste ed efficienti.

## Bibliografia

- Den Hartog J.P. (1956). Mechanical vibrations. McGraw Hill, New York.
- Farshidianfar A., Soheili S. (2013) "Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil-structure interaction". Soil Dyn Earthq Eng. 51(1), 14-22.
- Ghosh A., Basu B. (2004). "Effect of soil interaction on the performance of tuned mass dampers for seismic applications". J Sound Vib. 274(3-5), 1079-1090.
- Gorini D.N. (2019). "Soil-structure interaction for bridge abutments: two complementary macro-elements". PhD thesis, Sapienza University of Rome. <https://iris.uniroma1.it/handle/11573/1260972>.
- Gorini D.N., Callisto L., Whittle A.J., Sessa, S. (2023). "A multiaxial inertial macroelement for bridge abutments". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 47(5), pp. 793-816.
- Gorini D.N., Callisto L. (2019). "A coupled study of soil-abutment-superstructure interaction". IN: Springer Lecture Notes in Civil Engineering. "Geotechnical Research for Land Protection and Development" (CNRIG2019), 565-574.
- Gorini D.N., Callisto L. (2020). "A coupled study of soil-abutment-superstructure interaction". Springer Lecture Notes in Civil Engineering "Geotechnical Research for Land Protection and Development" (CNRIG2019), vol. 40, 565-574.
- Gorini D.N., Chisari C. (2022). "Impact of soil-structure interaction on the effectiveness of Tuned Mass Dampers". Earthq. Eng. Struct. Dyn., 51, 1501-1521.
- Gorini D.N., Marrazzo P.R., Nastri E., Montuori R. (2025). "An SSI-Informed Design for Tuned Mass Dampers with Small-to-Large Mass Ratios". Sottomesso per la pubblicazione su Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- Gorini D.N., Marrazzo P.R., Nastri E., Montuori R. (2025). "Effectiveness of an innovative seismic resilient superelevation in an archetype, existing soil-structure system". Bull. Earthq. Eng., 23, 1677-1705.
- Gorini D.N. (2019). "Soil-structure interaction for bridge abutments: two complementary macro-elements", PhD thesis, Sapienza University of Rome, Italy, <https://iris.uniroma1.it/handle/11573/1260972>.
- McKenna F., Scott M.H., Fenves G.L. (2010). "OpenSees. Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition". J. Comput. Eng., 24, 95-107.
- Wu J., Chen G., Lou M. (1999). "Seismic effectiveness of tuned mass dampers considering soil-structure interaction". Earthq Eng Struct Dyn. 28(11), 1219-1233.
- Yang Z., Elgamal A., Parra E. (2003). "Computational Model for Cyclic Mobility and Associated Shear Deformation". J. Geotech. Geoenv. Eng., 129, 1119-1127.