

VALIDAZIONE E UTILIZZO DI UN MACRO-ELEMENTO TERMODINAMICO MULTI-ASSIALE PER SPALLE DA PONTE

Davide Noè Gorini

Sapienza Università di Roma
davideno.gorini@uniroma1.it

Luigi Callisto

Sapienza Università di Roma
luigi.callisto@uniroma1.it

Sommario

Si propone un macro-elemento multi-assiale per descrivere l'interazione spalla-terreno nel modello strutturale di ponte mediante analisi dinamiche non lineari a basso onere di calcolo. La relazione forza-spostamento del macro-elemento è ricavata mediante un approccio termodinamico e include degli aspetti caratterizzanti la risposta delle spalle, quali la non-linearità costitutiva e l'accoppiamento direzionale. In un'analisi dinamica, la dipendenza dalla frequenza del comportamento d'insieme viene simulata combinando il macro-elemento con le masse partecipanti del duo spalla-terreno. La calibrazione del modello richiede la sola valutazione della capacità ultima e della risposta a piccoli spostamenti del sistema geotecnico. Il macro-elemento, implementato in OpenSees, è validato con riferimento ai risultati di una modellazione accoppiata avanzata.

1. La risposta dinamica delle spalle nell'analisi strutturale

Le spalle di un ponte sono sollecitate sia dalle azioni trasmesse dall'impalcato che dal terreno, con un significativo scambio di forze di inerzia in condizioni sismiche dovuto alla considerevole massa di terreno coinvolta. La conseguente amplificazione dinamica della risposta chiama in gioco il comportamento non-lineare, producendo effetti permanenti in grado di alterare significativamente la prestazione del ponte. Le forze trasmesse dalla spalla al ponte sono però limitate dalla capacità ultima del sistema spalla-terreno, che dipende fortemente dalla direzione del carico (Gorini et al. 2020).

L'analisi dinamica non-lineare sta diventando una via preferenziale per la valutazione sismica delle opere che esibiscono un comportamento altamente non-lineare. In questo contesto, l'approccio con macro-elementi (Roscoe e Schofield 1956) rappresenta una promettente prospettiva per simulare realisticamente gli aspetti salienti dell'interazione terreno-struttura nell'analisi strutturale, mantenendo una gestibile domanda di calcolo. Tuttavia, questo approccio è ad oggi principalmente rivolto alle fondazioni superficiali rendendolo inutilizzabile nell'analisi dei ponti.

In questo studio si propone un macro-elemento multi-assiale per simulare la peculiare risposta non-lineare e inerziale dei sistemi spalla-terreno. Il macro-elemento rappresenta la generalizzazione del modello uni-assiale sviluppato da Gorini et al. (2022a). Una descrizione esaustiva del macro-elemento è fornita in Gorini et al. (2022b), mentre la presente nota vuole offrire uno sguardo all'implementazione, validazione e utilizzo del macro-elemento.

1.1 L'approccio TIM

Il macro-elemento del sistema spalla-terreno fa parte di una nuova classe di modelli per lo studio dell'interazione dinamica terreno-struttura (*approccio TIM*, Gorini et al. 2022c). In quest'ambito, macro-elementi inerziali termodinamici (modelli TIM) vengono utilizzati per simulare la risposta multi-assiale dei sistemi geotecnici nella valutazione sismica delle strutture, tenendo conto delle caratteristiche non-lineari e dipendenti dalla frequenza. Il generico TIM consiste in una relazione tra le forze generalizzate scambiate al contatto terreno-struttura e i corrispondenti spostamenti e rotazioni. La legge costitutiva è derivata nell'ambito della plasticità multi-superficie con incrudimento cinematico utilizzando un approccio termodinamico, noto come iper-plasticità (Collins e Houlsby 1997), in base a cui la risposta incrementale si ottiene derivando due funzioni potenziali (funzioni energia e dissipazione), nelle ipotesi di validità del principio di ortogonalità (Ziegler 1977), additività delle componenti elastiche e plastiche degli spostamenti e associatività del flusso plastico.

2. Macro-elemento termodinamico inerziale per spalle da ponte

Il macro-elemento, denominato SAME, rappresenta una relazione non-lineare che lega le forze di interazione Q_i ($i=1,2,3$ indica rispettivamente la direzione longitudinale, trasversale e verticale del ponte), scambiate al contatto spalla-impalcato, ai corrispondenti spostamenti q_j mediante una matrice di rigidità tangente, H_{ij} . Quest'ultima si ottiene derivando le funzioni potenziali, che incorporano tre caratteristiche essenziali: non-linearità, dipendenza dalla direzione del carico ed evoluzione della risposta attraverso una legge di indurimento cinematico energeticamente compatibile. Il macro-elemento simula la risposta della spalla e del volume di terreno che interagisce con essa. Per brevità, si limita la trattazione al caso delle spalle semi-integrali, dove la trasmissione del momento in testa alla spalla può essere ragionevolmente trascurata.

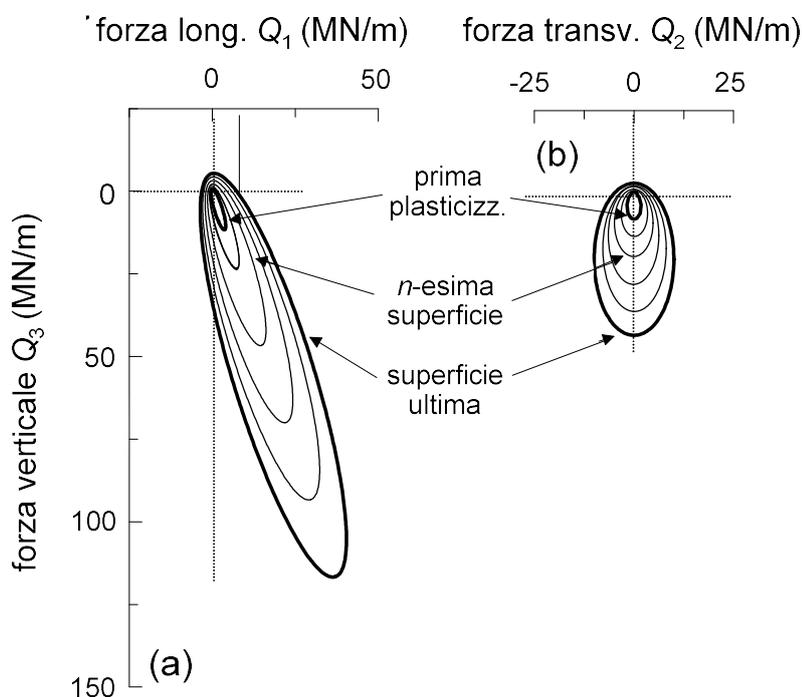


Figura 1: Configurazione iniziale del dominio plastico del macro-elemento per il sistema spalla-terreno di riferimento (Fig. 2): proiezioni delle superfici di plasticizzazione nei piani a) Q_1 - Q_3 e b) Q_2 - Q_3 .

2.1 Dominio plastico

Il dominio plastico del SAME è costituito da N superfici di plasticizzazione. La risposta plastica si

attiva a partire dalla superficie di prima plasticizzazione ($n=1$) ed è delimitata da una superficie limite ultima ($n=N$), che rappresenta le combinazioni delle forze Q_i che attivano meccanismi plastici globali del sistema spalla-terreno. La superficie ultima è descritta dalla forma ellissoidica roto-traslata proposta da Gorini et al. (2020), mostrata in Figura 1 relativamente alla spalla con fondazione superficiale di Figura 2 (Gorini et al. 2022b) presa a riferimento per la successiva validazione del macro-elemento. Le superfici di plasticizzazione interne sono assunte omotetiche al luogo ultimo (Fig. 1) ed evolvono durante la fase plastica secondo una legge di indurimento cinematico.

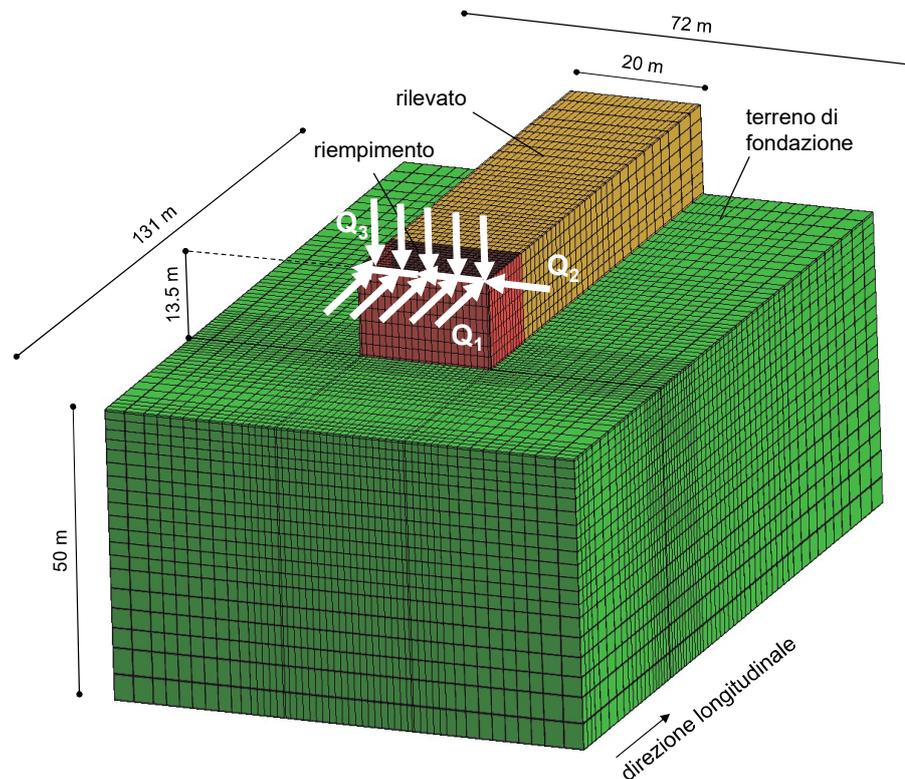


Figura 2: Modello di interazione spalla-terreno di riferimento (modello CC) implementato in OpenSees.

2.2 Effetti inerziali

In condizioni dinamiche, la risposta della spalla si amplifica in corrispondenza dei periodi di vibrazione del sistema geotecnico, controllati dagli importanti effetti inerziali che si sviluppano nel terreno circostante. Nell'approccio TIM, questi effetti sono simulati combinando il SAME con le masse modali del sistema spalla-terreno nei tre gradi di libertà del macro-elemento. In un'analisi dinamica, queste masse interagiscono con i flussi plastici istantaneamente attivati e, poiché la rigidità tangente del macro-elemento si riduce all'aumentare del livello di mobilitazione della resistenza, i periodi naturali del sistema si allungano per effetto del comportamento non lineare.

2.3 Calibrazione

La calibrazione del SAME richiede la definizione della superficie ultima, della matrice di rigidità iniziale e delle masse partecipanti del sistema spalla-terreno. In virtù dell'omoteticità delle superfici di plasticizzazione, il dominio plastico viene ricavato sulla base della sola superficie ultima. Quest'ultima viene identificata mediante la stima della forza verticale limite verso il basso, $Q_3^{(+,1D)}$, trasmessa dall'impalcato alla spalla e l'orientazione dell'ellissoide δ , che varia tra 14° e 16° per le spalle a sedia. La forza $Q_3^{(+,1D)}$ può essere calcolata attraverso le classiche soluzioni utilizzate per fondazioni soggette a carichi eccentrici e inclinati (per le fondazioni su pali, vedere Gorini e Callisto 2021).

La rigidezza elastica del macro-elemento, controllata dalla matrice $H_{ij}^{(0)}$, e le masse modali del sistema spalla-terreno, m_i , vengono identificate per riprodurre la desiderata dipendenza dalla frequenza. Studi precedenti hanno mostrato che, per ciascuna direzione del moto, le spalle con fondazioni superficiali mostrano una marcata risposta mono-modale (Gorini et al. 2021) che può essere simulata introducendo la massa che partecipa alla risposta dinamica a piccoli spostamenti. Le caratteristiche modali del sistema geotecnico possono essere valutate mediante le soluzioni analitiche proposte da Gorini et al. (2021), da cui si possono ricavare le rigidezze $H_{ij}^{(0)}$. Per il caso di riferimento (Fig. 2), i periodi modali sono pari a 0,47 s, 0,67 s e 0,29 s nelle direzioni longitudinale, trasversale e verticale.

2.4 Implementazione in OpenSees e utilizzo nell'analisi strutturale

Il macro-elemento è disponibile in OpenSees (McKenna et al. 2010) come un materiale multi-assiale scritto secondo il linguaggio di programmazione C++. Il materiale può essere assegnato a un elemento finito zero-dimensionale, *ZeroLengthND*, disponibile in OpenSees, che stabilisce una relazione multi-assiale tra due nodi sovrapposti. In condizioni statiche, il nodo terminale del SAME, opposto al nodo di collegamento con l'impalcato, è vincolato. Nella successiva fase dinamica, il vincolo viene rimosso per consentire l'applicazione del moto sismico; la dipendenza dalla frequenza viene riprodotta assegnando le masse m_i al nodo di contatto tra l'impalcato e il macro-elemento.

Nell'approccio TIM, il sottosuolo viene idealmente suddiviso in due regioni: il *near field*, inteso come il volume di terreno che interagisce con la struttura, e il *far field*, non influenzato dalla presenza della struttura. Il macro-elemento simula il comportamento del *near field*, mentre la propagazione delle onde sismiche nel *far field* viene studiata attraverso un'analisi di risposta sismica locale nelle condizioni di campo libero. Il moto sismico calcolato al contorno inferiore del *near field* (profondità efficace, vedere Gorini et al. 2022b), viene imposto al nodo terminale del SAME, opposto al nodo di collegamento con l'impalcato, per eseguire analisi dinamiche non-lineari sul modello globale di ponte.

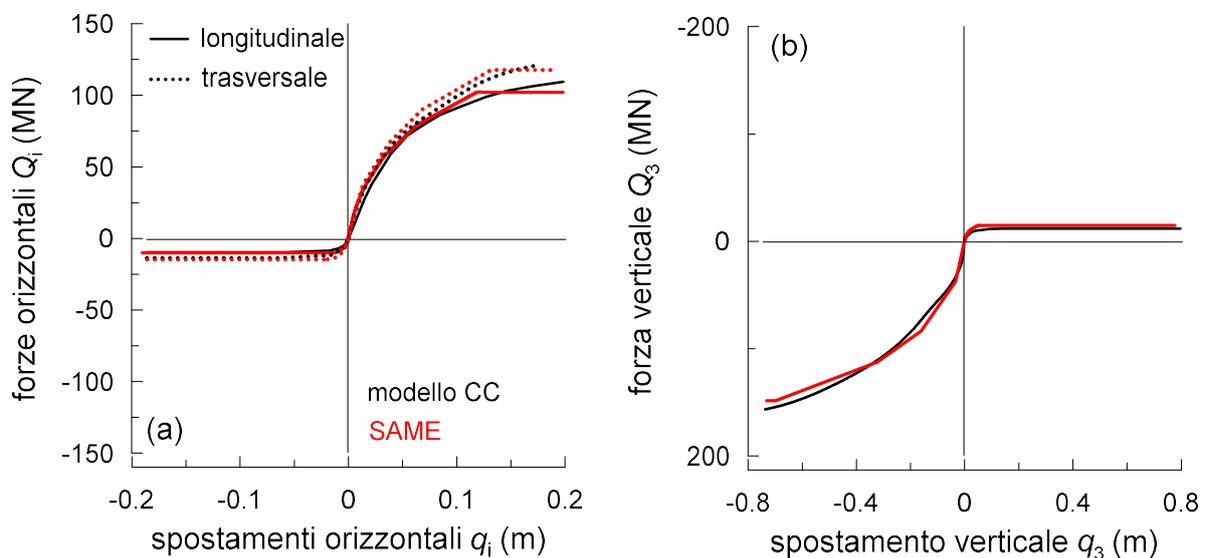


Figura 3: Confronto tra le risposte tri-assiali monotone del modello CC e del SAME: cicli forza-spostamento a) nel piano orizzontale e b) in direzione verticale.

3. Validazione

3.1 Condizioni di carico monotone

La risposta del macroelemento è stata testata su numerosi percorsi di carico, confrontandola con la risposta della spalla nel modello accoppiato di Figura 2, chiamato modello CC. In condizioni di carico monotone, i modelli SAME e CC sono stati sottoposti a una serie di analisi statiche incrementali a

controllo di forza. Col fine di simulare le azioni trasmesse dall'impalcato, nel modello CC sono state applicate forze di ampiezza progressivamente crescente in testa al muro centrale, calcolando lo spostamento risultante. Utilizzando il macro-elemento, le suddette condizioni sono state riprodotte applicando la forza risultante a un nodo e mantenendo fisso l'altro. A titolo di esempio, la Figura 3 confronta la risposta dei due modelli perturbati dalle tre componenti del carico, assumendo dei rapporti $Q_3/Q_1=1.5$ e $Q_2/Q_1=1$. Per il SAME si sono considerate cinque superfici di plasticizzazione: esso riproduce abbastanza fedelmente la risposta del modello avanzato lungo l'intero percorso di carico, evidenziando la forte asimmetria nella risposta della spalla.

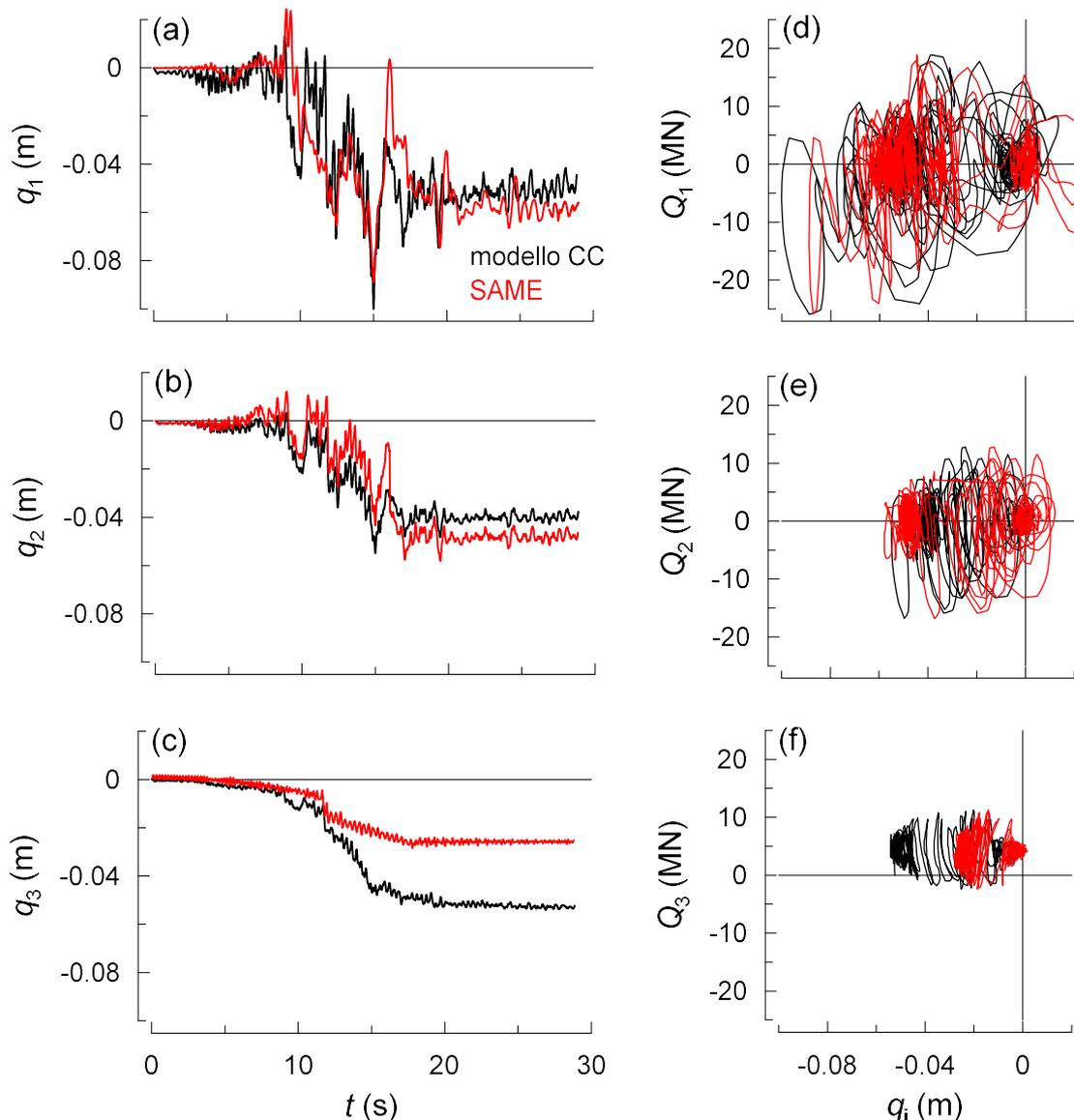


Figura 4: Confronto tra le risposte del modello CC e del SAME perturbati da una forzante tri-componente: a-c) evoluzione temporale degli spostamenti della spalla e d-f) cicli forza-spostamento.

3.2 Condizioni dinamiche

La risposta ciclica del macro-elemento è stata validata in un precedente lavoro (Gorini et al. 2022a), mentre qui si mostra la validazione del SAME in condizioni dinamiche, applicando sia a quest'ultimo, nel nodo libero a cui vengono assegnate le masse m_i , che al modello CC, in testa al muro centrale, una forzante tri-componente rappresentativa delle azioni trasmesse dall'impalcato nel caso dello scenario sismico di Kobe, relativo allo stato limite di collasso dell'opera (Gorini et al. 2022b). La Figura 4

mostra la risposta in termini di evoluzione nel tempo degli spostamenti della testa della spalla (Figg. 4a,b,c) e dei relativi cicli forza-spostamento (Figg. 4d,e,f). Il macro-elemento riproduce in modo soddisfacente la risposta del modello accoppiato nel piano orizzontale, sia in termini di massime ampiezze che di accumulo di spostamenti permanenti. Al contempo si osservano significativi abbassamenti permanenti della spalla, causati principalmente dall'accoppiamento direzionale della risposta plastica. L'entità di questi effetti irreversibili dipende dalle leggi di flusso adottate nelle due tecniche di modellazione, riguardo a cui recenti studi hanno dimostrato che il legame costitutivo adottato per il terreno nel modello CC sovrastima le deformazioni volumetriche prodotte dalla componente deviatorica dello stato tensionale (Gorini et al. 2022a). Altra diretta conseguenza dell'accoppiamento direzionale è lo sviluppo di spostamenti trasversali permanenti. Oltre al caso appena esposto, la prestazione della spalla in esame è stata analizzata considerando diversi scenari sismici (Gorini et al. 2022b), omissi per brevità. I risultati hanno mostrato la discreta capacità del SAME di valutare gli spostamenti massimi e residui della testa della spalla, mediamente con una leggera sottostima rispetto le previsioni del modello CC rispettivamente del 10% e 14%. La buona capacità predittiva del macro-elemento si combina con un'elevata efficienza di calcolo: le analisi sul modello accoppiato, eseguite tramite OpenSeesSP per il calcolo in parallelo, hanno richiesto un tempo medio di 7 giorni mentre la durata delle analisi sul SAME è di circa 4 minuti senza l'ausilio della partizione del calcolo.

4. Concludendo, un nuovo orizzonte per la progettazione delle opere

Col fine di contenere la complessità d'analisi e l'onere di calcolo dei modelli terreno-struttura, si è proposto un macro-elemento termodinamico inerziale per simulare l'interazione spalla-terreno nell'analisi dinamica non-lineare dei ponti. Il macro-elemento conduce a una descrizione ragionevole della risposta ottenuta con modelli numerici più avanzati e onerosi, simulando tre caratteri distintivi della risposta delle spalle: non-linearità, accoppiamento direzionale e dipendenza dalla frequenza. La semplicità della calibrazione e la disponibilità del codice in ambiente OpenSees rendono il macro-elemento uno strumento di calcolo promettente e di immediato utilizzo.

Bibliografia

- Collins I.F., Houlsby G.T. (1997). "Application of thermomechanical principles to the modeling of geotechnical materials". *Proc., R. Soc., The Royal Society, London, A*, 453, 1975-2001.
- Gorini D.N., Callisto L., Whittle A.J. (2022a). "An inertial macroelement for bridge abutments". *Geotechnique*, 72(3), 247-259, doi: <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.P.397>.
- Gorini D.N., Callisto L., Whittle A.J., Sessa S.. "A multi-axial inertial macro-element for bridge abutments". Submitted to *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*, 2022b.
- Gorini D.N., Callisto L. (2022c). "A class of thermodynamic inertial macroelements for soil-structure interaction". *Springer Series in Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 4th International Conference on: Performance based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Beijing, China.
- Gorini, D. N., Callisto, L., Whittle, A. J. (2021). "Dominant responses of bridge abutments". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 148:106723, doi: 10.1016/j.soildyn. 2021.106723.
- Gorini D.N., Callisto L. (2021). "Generalised ultimate loads for piled foundations", *Acta Geotechnica*, <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01386-4>.
- Gorini D.N., Whittle A.J., Callisto L. (2020). "Ultimate limit states of bridge abutments". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(7), doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002283.
- McKenna F., Fenves G.L., Scott M.H., Jeremic B. (2000). "Open system for earthquake engineering simulation". <http://opensees.berkeley.edu>.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N. (1956). "The stability of short pier foundations on sand". *British Welding Journal*, 343-354.
- Ziegler, H. (1977). "An introduction to thermomechanics". North Holland, Amsterdam.