



## STUDIO DELLA RISPOSTA DI EDIFICI A TELAIO SOGGETTI A SCAVO DI GALLERIE: EVIDENZE DA PROVE IN CENTRIFUGA DI TIPO IBRIDO

Chiara Spaggiari

*Sapienza Università di Roma*  
*chiara.spaggiari@uniroma1.it*

Chuanjin Tang

*University of Nottingham*  
*chiuajin.tang@nottingham.ac.uk*

Alec M. Marshall

*University of Nottingham*  
*alec.marshall@nottingham.ac.uk*

Daniela Boldini

*Sapienza Università di Roma*  
*daniela.boldini@uniroma1.it*

### Sommario

La previsione accurata degli effetti indotti dalle attività di costruzione in sotterraneo sugli edifici è di primaria importanza, soprattutto nel contesto dell'estensione delle attuali linee di trasporto verso zone di più recente urbanizzazione, tipicamente caratterizzate da edifici multipiano in calcestruzzo armato. Sebbene lo studio della risposta degli edifici a telaio sia già stato approfondito attraverso simulazioni numeriche e prove sperimentali in centrifuga geotecnica, ad oggi resta la necessità di indagare con maggiore attenzione il ruolo giocato dai muri di tamponamento. Il presente contributo illustra i risultati di due prove realizzate presso l'Università di Nottingham per lo studio dell'interazione terreno-struttura-galleria utilizzando una modellazione di tipo ibrido che prevede lo svolgimento in maniera accoppiata e simultanea della prova in centrifuga e dell'analisi numerica. Infatti, la modellazione centrifuga-numerica ibrida permette di condividere in tempo reale dati in termini di forze e spostamenti tra il modello numerico, che comprende l'edificio, e il modello fisico in centrifuga, che racchiude il terreno, le fondazioni e la galleria. In maniera innovativa le prove ibride sono in grado di combinare i vantaggi di entrambi gli approcci di analisi, permettendo una modellazione realistica degli edifici a telaio dotati di muri di tamponamento in muratura e poggianti su fondazioni superficiali.

### 1. Introduzione

La modellazione centrifuga-numerica accoppiata (CCNM, *coupled centrifuge-numerical modelling*) rappresenta un sofisticato esempio di modellazione ibrida applicata alle prove in centrifuga geotecnica. Essa si pone come obiettivo quello di incorporare i vantaggi delle prove in centrifuga tipo convenzionale, che permettono di riprodurre fedelmente le condizioni di stato di sforzo tipiche dei problemi di interazione terreno-galleria-struttura, e di combinarli con quelli della modellazione numerica avanzata. In tal modo risulta possibile considerare strutture caratterizzate da geometrie e materiali più realistici. La tecnica è stata sviluppata presso il *Nottingham Centre for Geomechanics* (NCG) dell'Università di Nottingham ed è stata inizialmente utilizzata per analizzare la risposta di edifici a telaio elastici con fondazione su pali soggetti allo scavo di una galleria in condizioni piane (Idinyang et al. 2019). Recentemente, il metodo CCNM è stato migliorato per studiare il comportamento della facciata di un

edificio in muratura in 2D dotato di aperture poggiate su una fondazione continua (Tang et al. 2024). L'ultimo sviluppo della tecnica CCNM ha riguardato l'applicazione della metodologia a semplici strutture intelaiate in 2D dotate di fondazioni superficiali separate con sviluppo parallelo all'asse della galleria (Spaggiari et al. 2024). Infine, in questa nota viene discussa l'estensione alla modellazione numerica 3D che, pur mantenendo una condizione di deformazione piana in centrifuga, permette di riprodurre più fedelmente lo stato di tensione piano che caratterizza i compagni interni al telaio.

L'articolo presenta i risultati di due prove in centrifuga di tipo ibrido svolte considerando in un caso un edificio a telaio formato dal solo scheletro in calcestruzzo armato e in un altro caso lo stesso edificio ma dotato anche di muri di tamponamento in muratura, allo scopo di evidenziarne le differenze nella risposta strutturale indotta dallo scavo di una galleria.

## 2. Descrizione del problema

Lo studio ha riguardato un edificio a telaio a 6 campate posizionato centralmente rispetto all'asse della galleria (Fig. 1). Le due configurazioni analizzate presentano la struttura come formata dal solo telaio oppure dotata anche dei muri tamponamento.

Il modello strutturale è implementato in 3D in Abaqus® alla scala del prototipo, mentre la parte del problema riprodotta in centrifuga geotecnica, in scala ridotta, comprende il terreno, un modello di galleria e il sistema di fondazioni. Le prove sono state svolte a un'accelerazione di gravità pari a 68g, coerentemente con le precedenti prove in centrifuga di tipo convenzionale (Xu et al. 2021).

Alla scala del modello, la galleria ha un diametro  $D_t$  di 90 mm ed è collocata a una profondità  $z_t$  di 162 mm sotto la superficie del terreno, corrispondente a uno scenario di scavo a basse profondità caratterizzato da un rapporto copertura su diametro  $C/D_t$  pari a 1.3.

Il confine tra il dominio del modello numerico e quello in centrifuga è demarcato dalla linea rossa tratteggiata di Figura 1a. Le informazioni trasmesse attraverso questo confine vengono gestite durante le prove da un'interfaccia di scambio dati in LabView, che controlla il trasferimento e l'elaborazione dei dati tra la parte superiore delle fondazioni (centrifuga) e i nodi alla base del modello numerico. Durante la modellazione di tipo ibrido, i dati scambiati tra i due domini sono i cedimenti, registrati alle fondazioni per ogni incremento di volume perso, che vengono opportunamente scalati prima di essere trasferiti e applicati alla base della struttura a telaio, e le forze, calcolate nell'analisi Abaqus e quindi scalate e riapplicate alle fondazioni (Fig. 2). Attualmente la modellazione centrifuga-numerica permette il controllo delle forze e degli spostamenti solo lungo la direzione verticale.

### 2.1 Modello in centrifuga

Il terreno utilizzato è una sabbia silicea a grana fine (Leighton Buzzard Fraction E) con densità relativa pari a  $I_d = 90\%$ , diametro medio di 0.14 mm e un indice dei vuoti minimo e massimo pari a 0.61 e 1.01 (Lanzano et al. 2016). Al fine di garantire uniformità delle condizioni del campione, racchiuso all'interno di un contenitore dalle dimensioni interne pari a 500 mm × 700 mm × 150 mm, è stato adottato un metodo di pluviazione di tipo automatico.

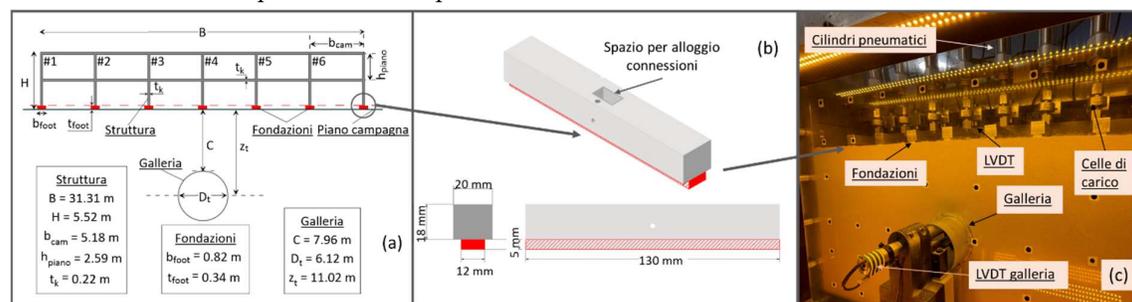


Fig 1. Il problema di interazione terreno-struttura-galleria alla scala del prototipo (a); schema delle fondazioni alla scala del modello (b); vista delle sette fondazioni e della strumentazione in centrifuga (c).

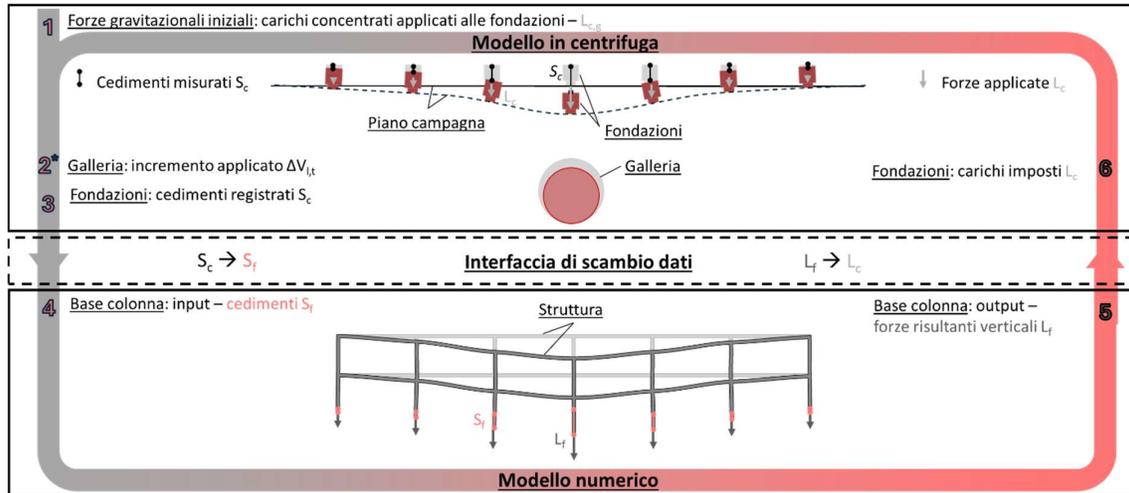


Fig 2. Diagramma del metodo CCNM.

Il modello di galleria di tipo meccanico a contorno rigido è in grado di simulare il campo eccentrico degli spostamenti generati dallo scavo attraverso il controllo del contorno del cavo come funzione del volume perso in galleria  $V_{i,t}$  (valore massimo di 3.5% per incrementi di  $\approx 0.1\%$ ) (Song e Marshall 2020). Le sette fondazioni poggiano al piano campagna e si sviluppano lungo la direzione parallela alla galleria per 130 mm alla scala del modello (Fig. 1b-c). Esse hanno una larghezza di 12 mm e uno spessore di 5 mm e sono realizzate in alluminio (modulo di Young pari a 70 GPa, simile per ordine di grandezza a quello del c.a.). La connessione tra le fondazioni e il sistema di trasmissione dei carichi è resa possibile dalla parte superiore dei blocchi di alluminio, dove avviene anche la misurazione degli spostamenti verticali (in grigio in Fig. 1b). Inoltre, l'elevata rigidità di tale porzione permette l'applicazione uniforme dei carichi alla superficie, così garantendo una condizione di deformazione piana. I carichi in fondazione sono trasmessi da un sistema di sette cilindri pneumatici, un collettore e otto regolatori pneumatici compatti. Ogni cilindro è dotato di una camera superiore e una inferiore: la prima corrisponde a un valore comune di pressione controllato dal collettore, mentre nella seconda la pressione dell'aria è governata dai regolari in maniera indipendente per trasmettere il carico desiderato. La misurazione degli spostamenti verticali avviene nella parte superiore dei blocchi di fondazioni tramite LVDT con corsa pari a 10 mm, mentre i carichi sono misurati con celle di carico da 500 N.

## 2.2 Modello numerico

La modellazione numerica è svolta con il codice agli elementi finiti Abaqus/CAE (Smith, 2020), descrivendo telaio e pannelli in ambiente 3D con elementi solidi quadratici a integrazione ridotta denominati C3D20R (Fig. 3).

La struttura a telaio e i tompagni in muratura sono schematizzati mediante legge elastico lineare, adottando i seguenti parametri: unità di peso di volume  $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ , modulo di Young  $E = 53.8 \text{ GPa}$ , e coefficiente di Poisson  $\nu = 0.334$  per lo scheletro in c.a. (Boldini et al. 2021a) e unità di peso di volume  $\gamma = 13 \text{ kN/m}^3$ , modulo di Young  $E = 4.0 \text{ GPa}$ , e coefficiente di Poisson  $\nu = 0.2$  per i pannelli in muratura (Boldini et al. 2021b, Spaggiari et al., 2023).

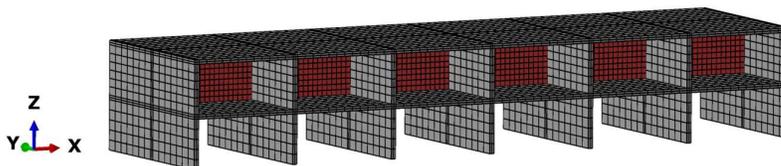


Fig 3. Modello numerico 3D della struttura a telaio con tompagni in muratura.

Il telaio ha uno spessore pari a 8.8 m, mentre i pannelli di 0.25 m sono collocati all'interno del telaio in posizione centrale. Nel presente modello i muri di tamponamento e il telaio in c.a. sono vincolati tra loro attraverso connessioni di tipo *tie* tra superfici.

### 2.3 Svolgimento delle prove

Inizialmente, le fondazioni vengono posizionate sulla superficie del terreno a 1g applicando un piccolo carico pari a 8 N per favorire un contatto uniforme. Successivamente, la centrifuga geotecnica viene portata a un valore di accelerazione di gravità pari a 68g (corrispondente a 193 rotazioni al minuto) e vengono effettuati 2 cicli di stabilizzazione (consistenti nella riduzione delle rotazioni al minuto corrispondenti a 10g per poi tornare al valore di 68g). Una volta applicati i carichi gravitazionali  $L_{c,g}$  alla scala del modello alle fondazioni (depurati del peso della parte superiore del blocco), la centrifuga viene lasciata in funzione per circa 30 minuti per garantire una migliore omogeneità del terreno in termini di spostamenti iniziali. Poi, viene attivato il primo incremento di volume perso (pari a  $\Delta V_{1,t} \approx 0.1 - 0.2\%$ ), che genera il corrispondente campo di spostamenti nel terreno e nelle fondazioni. In seguito, gli spostamenti verticali  $S_c$ , registrati dagli LVDT, vengono trasmessi all'interfaccia LabView e dopo essere stati convertiti alla scala del prototipo  $S_f$ , sono imposti ai nodi alla base del modello numerico. I cedimenti generano una nuova configurazione deformata del telaio e redistribuzione dei carichi all'interno della struttura. Le nuove forze risultanti verticali  $L_f$ , calcolate dal modello numerico, vengono poi trasferite, scalate a  $L_c$ , ad ogni fondazione in centrifuga (Fig. 2).

Il trasferimento dei carichi e degli spostamenti avviene solo al raggiungimento di una condizione di equilibrio tra i due domini che deve essere costantemente verificata durante tutta l'esecuzione della prova e in particolare prima di poter procedere a un nuovo incremento di volume perso.

Inoltre, un importante protocollo di trasferimento dei dati riguarda l'imposizione di una soglia minima alla forza verticale scambiata in fondazione per evitarne il sollevamento (i.e. -95 N, corrispondente a una carico nominale applicato alle fondazioni di 4 N in centrifuga). L'applicazione di tale piccolo carico garantisce il contatto tra terreno e fondazioni durante tutta la prova, così impedendo l'effettiva formazione del tipico meccanismo di apertura. Questo accorgimento si è reso necessario per prevenire disallineamenti delle fondazioni in seguito a eventuali sollevamenti delle stesse.

### 3. Risultati delle prove in centrifuga ibride

La Figura 4 mostra gli spostamenti alla base della struttura ottenuti per il solo telaio e il telaio con tompagni per  $V_{1,t} = 2.0\%$  alla scala del prototipo. Dal confronto dei risultati con i dati ottenuti per condizioni di campo libero da Tang et al. (2024), si evince come il contributo della struttura in termini di rigidezza e peso modifichi la conca di subsidenza riducendo i cedimenti differenziali, tendenza che risulta ancora più marcata nel caso di presenza dei muri di tamponamento. Anche gli spostamenti orizzontali risultano estremamente ridotti rispetto a quelli ottenuti a piano campagna per condizioni di campo libero. Al fine di validare la nuova modellazione in 3D, sono presentati anche i risultati ottenuti da una precedente prova in centrifuga realizzata con solo telaio in 2D, da cui si può osservare un buon accordo in termini di spostamenti verticali e orizzontali con il corrispondente caso in 3D. La differenza tra i cedimenti verticali della struttura a telaio e quella dotata di muri di tamponamento può trovare spiegazione nella diversa rigidezza dei due edifici (soprattutto nella parte destra della struttura), nonostante un evidente problema di mancata simmetria nella prova con tompagni, che verrà effettuata nuovamente nelle prossime settimane.

In Figura 5 sono rappresentati i risultati in termini di reazioni vincolari scambiate alla base del telaio  $L_c$  (alla scala del modello) per alcuni valori di  $V_{1,t}$ . Al procedere dello scavo si nota come, nel caso di solo telaio, la colonna centrale di questo subisca una progressiva diminuzione del carico sopportato che va mano a mano a gravare sulle colonne più esterne (Fig. 5a). Tale processo di redistribuzione dei carichi risulta ancora più accentuato nella struttura dotata di tompagni (Fig. 5b), dove gli elementi in muratura

svolgono un importante ruolo di connessione e irrigidimento del telaio stesso. Inoltre, per valori di  $V_{l,t}$  superiori a 1.5%, la struttura con tompagni raggiunge il limite nominale di carico imposto alle fondazioni, corrispondente a una condizione di separazione tra terreno e fondazione.

In Figura 6 sono raffigurate le configurazioni deformate della sola struttura a telaio (Fig. 6a-d) e del telaio dotato di tamponature (Fig. 6e-h), insieme al parametro di distorsione angolare  $\beta$ , per diversi valori di volume perso rappresentato facendo riferimento alle categorie di danno di Boscadin e Cording (1989). Il parametro  $\beta$  è stato calcolato in due modi: nel primo caso considerando solo i cedimenti verticali (quadrato) e nel secondo aggiungendo il contributo degli spostamenti orizzontali (triangolo), utilizzando la formula proposta da Son e Cording (2005). Nonostante alcune asimmetrie, dovute agli spostamenti misurati, è possibile osservare come l'influenza dei tompagni riduca notevolmente il danno indotto sulla struttura. Inoltre, si evidenzia come il contributo dato dagli spostamenti orizzontali generati nel modello numerico risulti non trascurabile nel calcolo del parametro di distorsione angolare  $\beta$ , soprattutto considerando che tali valori potrebbero essere sottostimati a causa del loro mancato controllo nell'attuale metodologia delle prove CCNM.

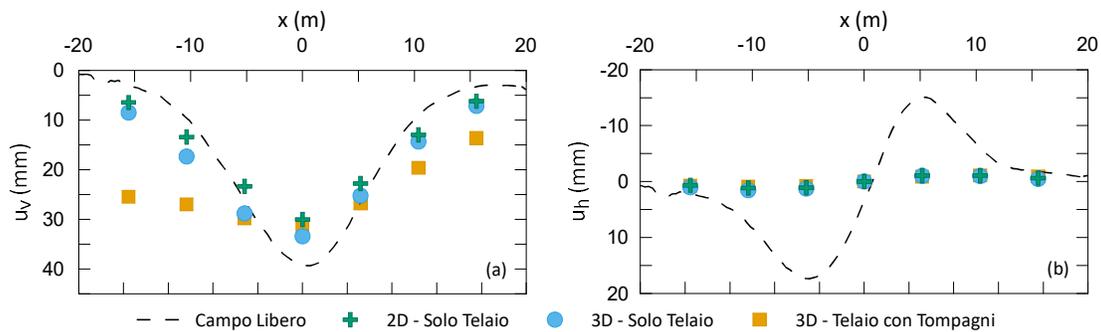


Fig 4. Risultati in termini di cedimenti (a) e spostamenti orizzontali (b) per condizioni di campo libero, solo telaio (2D), solo telaio (3D) e telaio con tompagni (3D) per  $V_{l,t} = 2\%$  alla scala del prototipo.

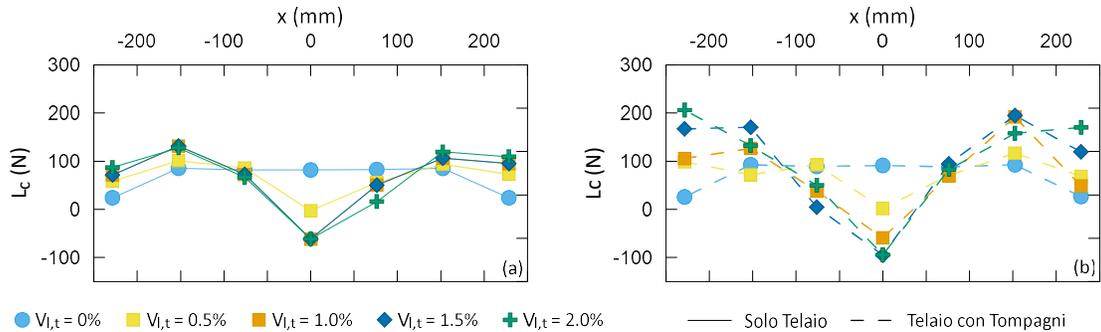


Fig 5. Forze verticali scambiate alla base del telaio con (a) e senza tompagni (b) per diversi scenari di  $V_{l,t}$  alla scala del modello.

#### 4. Conclusioni

Il presente contributo illustra l'applicazione della nuova metodologia CCNM per lo svolgimento di prove in centrifuga geotecnica di tipo ibrido su edifici intelaiati modellati in tre dimensioni e soggetti allo scavo di una galleria a basse coperture. In particolare, sono stati presentati i risultati di due prove svolte presso l'Università di Nottingham che hanno avuto come oggetto una struttura a solo telaio e un edificio intelaiato con tamponature, evidenziando come l'aggiunta di muri di tamponamento produca sostanziali variazioni nella redistribuzione dei carichi interni indotti dallo scavo e importanti riduzioni in termini di potenziale danno. Ulteriori prove ibride in centrifuga verranno realizzate considerando leggi costitutive di tipo avanzato per i pannelli e configurazioni a telaio di tipo più realistico.

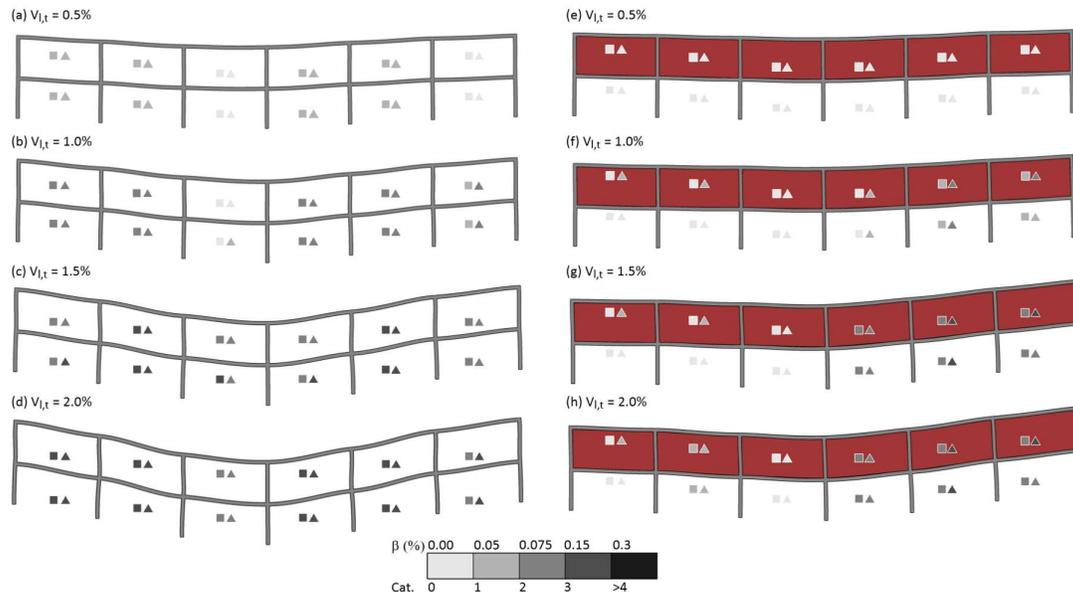


Fig 6. Configurazioni deformate delle strutture senza (a-d) e con tumpagni (e-h) per un fattore di scala = 100 e categorie di danno per  $V_{1,t} = 0.5\%$  (a,e),  $1.0\%$  (b,f),  $1.5\%$  (c,g) e  $2.0\%$  (d,h). Il parametro di distorsione  $\beta$  è calcolato considerando solo i cedimenti (quadrato) oppure includendo gli spostamenti orizzontali (triangolo).

## Bibliografia

- Boldini D., Losacco N., Franza A., DeJong M. J., Xu J., Marshall A.M. (2021a). “Tunnelling-Induced Deformation of Bare Frame Structures on Sand: Numerical Study of Building Deformations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(11): 04041116.
- Boldini D., Losacco N., Franza A., Miraei S.M. (2021b). “Numerical modelling of framed structures with masonry infills affected by tunnelling-induced deformation and damage”, *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. of Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Cambridge, 510-516.
- Boscardin M.D., Cording E.J. (1989). “Building response to excavation-induced settlements”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 1-21.
- Idinyang S., Franza A., Heron C. M., Marshall, A. M. (2019). “Real-time data coupling for hybrid testing in a geotechnical centrifuge”, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 19(4):208–220.
- Lanzano G., Visone C., Bilotta E. Santucci de Magistris, F. (2016). “Experimental assessment of the stress–strain behaviour of Leighton Buzzard sand for the calibration of a constitutive model”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34: 991–1012.
- Son M., Cording E.J. (2005). “Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 162-177.
- Song G., Marshall A.M. (2020). “Centrifuge modelling of tunnelling induced ground displacements: pressure and displacement control tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103:103461.
- Smith M. (2020). “ABAQUS/Standard User's Manual, Version 2020”. Dassault Systèmes Simulia Corp.: Providence, RI, USA.
- Spaggiari C., Acikgoz S., Boldini D. (2023). “Modelling tunnelling-induced damage in framed structures with masonry infill walls”. *Proc. 10<sup>th</sup> Eur. Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, United Kingdom, 340.
- Spaggiari C., Tang C., Boldini D., Marshall A.M. (2024). “Response of framed buildings on separate footings to tunnelling: a hybrid modelling study”, *Proc. 5<sup>th</sup> Eur. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics*, Delft, accepted.
- Tang C., Selvaraj S., Heron C., Marshall A.M. (2024). “Coupled centrifuge-numerical modelling of shallow foundations”. *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp. of Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Macau, 404–412. DOI: 10.1201/9781003413790-48404
- Xu J., Franza A., Marshall A.M., Losacco N., Boldini D. (2021). “Tunnel-framed building interaction: comparison between raft and separate footing foundations”, *Géotechnique*, 71(7), 631-644.