

## ANALISI NUMERICA DELL'EFFICACIA DEI MURI SACRIFICIALI PER LA RIDUZIONE DEGLI SPOSTAMENTI INDOTTI DA SCAVI PROFONDI.

F. Pintus<sup>(1)</sup>, G. Tropeano<sup>(2)</sup>, E. Erbì<sup>(3)</sup>, F.M. Soccodato<sup>(4)</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale ed Architettura, Università di Cagliari.*

<sup>(1)</sup> [supunk@gmail.com](mailto:supunk@gmail.com); <sup>(2)</sup> [giuseppe.tropeano@unica.it](mailto:giuseppe.tropeano@unica.it); <sup>(3)</sup> [erbisio@gmail.com](mailto:erbisio@gmail.com); <sup>(4)</sup> [soccodato@unica.it](mailto:soccodato@unica.it)

### Sommario

In questa nota si presentano i principali risultati di uno studio parametrico finalizzato al confronto dell'efficacia di diversi tipi di pareti sacrificiali, *cross-wall* (CW) e *buttress-wall* (BW), nel ridurre il campo di spostamenti indotto da scavi profondi. Nelle analisi sono stati presi in considerazione diversi interassi e diverse geometrie di pareti sacrificiali. Il profilo del terreno è costituito da un potente deposito di terreno argilloso sovrastato da uno strato di terreno a grana grossa, e può essere considerato tipico della zona centrale di Roma. Il comportamento del terreno è stato modellato con una legame costitutivo elastico-plastico incrudente. Sia il diaframma sia le pareti sacrificiali sono state modellate con elementi solidi, così come gli elementi all'interfaccia terreno-parete e parete-parete. I risultati ottenuti dalle analisi numeriche consentono di mettere in relazione il valore di riduzione dello spostamento con i principali parametri geometrici dei muri sacrificiali.

### 1. Introduzione

In contesti urbanizzati, il progetto di scavi profondi richiede come parametro di *performance* la minimizzazione degli spostamenti indotti a tergo dell'opera con l'obiettivo di mitigare gli effetti indotti sulle costruzioni e strutture circostanti.

È ben noto che i cedimenti prodotti da scavi sono strettamente collegati alle deformazioni dei diaframmi che costituiscono le paratie di sostegno (Mana & Clough 1981, Clough & O'Rourke 1990, Ou et al. 1996); pertanto, i cedimenti del terreno possono essere ridotti limitando le inflessioni delle paratie attraverso opportune tecniche di scavo e/o opportuni collegamenti strutturali (puntoni). Le prestazioni di uno scavo eseguito con la modalità *top-down* possono essere ulteriormente migliorate utilizzando pareti sacrificiali, per tutta la larghezza dello scavo, *cross-wall* (CW), o a contrafforte, *buttress-wall* (BW), costruite all'interno dell'area di scavo e progressivamente demolite durante le fasi di escavazione. L'uso di CW e BW è una tecnica costruttiva sempre più comune in ambiente urbano (Ou et al. 2011). Le due tecniche costruttive differiscono nel meccanismo attivato per limitare gli spostamenti della parete. I CW collegano due paratie opposte e la loro efficacia dipende principalmente dalla rigidezza assiale, dall'interasse e dalla lunghezza d'infissione (Callisto, 2011). I BW non si estendono fino alla paratia opposta, e la loro efficacia è controllata principalmente dalla resistenza mobilitata sulla superficie laterale di contatto terreno-BW: sono economicamente convenienti, ma i dati di monitoraggio evidenziano una efficacia ridotta rispetto a quella dei CW (Ou et al. 2006).

In questo lavoro sono presentati i principali risultati di analisi numeriche tridimensionali (3D) mirate alla valutazione dell'influenza dei principali fattori geometrici, come l'interasse dei CW e BW, l'altezza e la lunghezza, sulla loro efficacia nel ridurre gli spostamenti della paratia. Nella nota sono dapprima illustrati la geometria dello scavo, il profilo del terreno e gli approcci di modellazione; successivamente, sono presentati e discussi i principali risultati numerici ottenuti.

## 2. Modello di sottosuolo e modellazione numerica

Le analisi numeriche effettuate si riferiscono ad un scavo di larghezza  $B = 30$  m; la lunghezza delle paratie è pari a  $L = 40$  m e la profondità finale dello scavo pari a 28 m.

La Figura 1a e b mostra la pianta e la sezione trasversale dello schema di scavo oggetto di questo studio, con l'indicazione dei principali parametri geometrici. Il profilo del terreno è tipico della zona centrale di Roma, ed è costituito da 10 m di spessore di terreno di riporto a grana grossa (MG), sovrastante un potente (50 m) deposito di terreno argilloso (Ag); più in profondità si rinvengono strati di ghiaie e argille sovraconsolidate di elevata rigidezza. La distribuzione della pressione interstiziale è sostanzialmente idrostatica, con livello della superficie freatica a circa 10 m dal piano campagna.

Si è assunta una tecnica di scavo di tipo *top-down* in cui i solai sono realizzati dopo ogni fase di scavo (4 m); la massima altezza libera,  $a$ , in ogni fase di scavo, è pari a 8 m.

Le analisi numeriche sono state condotte con il codice agli elementi finiti *PLAXIS 3D Foundation* (Plaxis BV, 2006). La Figura 1c mostra un tipico reticolo di calcolo usato in questo studio.

DATA l'elevata rigidezza dei depositi più profondi, il contorno inferiore del modello numerico è posto alla profondità di 60 m. In accordo con le linee guida proposte dal Finno & Robosky (2005) e Ou & Shiao (1998), il contorno laterale a tergo della paratia è stato esteso oltre i limiti dello scavo per una lunghezza pari a 5 volte la profondità di fondo scavo al fine di ridurre gli effetti di bordo. Sui bordi laterali sono stati imposti condizioni di spostamento orizzontale impedito.

Il comportamento del terreno è stato modellato con un legame costitutivo elasto-plastico incrudente (Schanz et al. 1999), disponibile nelle librerie del codice agli elementi finiti utilizzato in questo studio i cui parametri sono riportati nelle Tabella 1. La taratura dei parametri del modello è stata effettuata a partire dalla caratterizzazione geotecnica di un sito reale nella città di Roma (Rampello et al. 2012). La rigidezza elastica,  $E_{ur}$ , è stata posta pari alla rigidezza a piccole deformazioni misurata attraverso prove *cross-hole*, *bender elements* e di colonna risonante. Sono stati utilizzati elevati valori dei rapporti  $E_{ur}/E_{50}$  e  $E_{ur}/E_{oed}$  per simulare la non linearità del comportamento del terreno osservata nelle prove di laboratorio. La dilatazione è stata fissata pari a zero.

Tabella 1. Parametri dei terreni coinvolti nel modello geotecnico dello scavo considerato in questo studio.

Soil	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kPa]	$\varphi'$ [°]	OCR	$K_0$ [-]	$\nu'$ [-]	$E_{ur}^{\text{ref}}$ [MPa]	$m$ [-]	$E_{ur}^{\text{ref}}/E_{50}^{\text{ref}}$	$E_{oed}^{\text{ref}}/E_{50}^{\text{ref}}$
MG	18.5	15	28	2.0	0.50	0.2	240	0.5	10	1.0
Ag	18.2	20	25	1.3	0.58	0.2	160	0.6	10	1.0

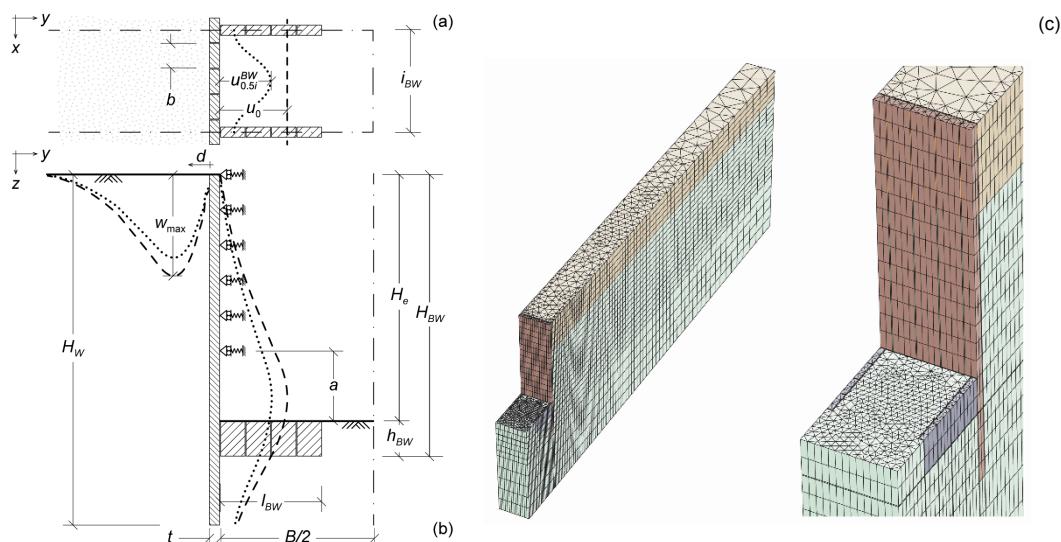


Figura 1. Schema geometrico dello scavo: pianta (a) e sezione (b). Tipico esempio di griglia di calcolo del modello 3D considerato in questo studio.

Ulteriori informazioni sulla calibrazione del modello sono descritte da e Rampello et al (2012). Le paratie, i CW e i BW sono costituiti da pannelli rettangolari ( $2.5 \times 1.0$  m), modellati con elementi solidi elasticamente isotropi con modulo di Young  $E = 30$  GPa. Lo stesso valore di rigidezza è stato assunto per i solai (spessore di 20 cm), che fungono da livelli di contrasto, modellati come elementi *shell* anisotropi (comportamento a membrana). Per tutti gli elementi strutturali si è assunto il valore del coefficiente di Poisson  $\nu = 0.2$ .

I contatti terreno-paratia e pannello-pannello (interfacce) sono stati modellati introducendo elementi solidi dello spessore di 10 cm, caratterizzati dallo stesso modello costitutivo adottato per il terreno con parametri di resistenza ridotti di un fattore pari a 0.7, per tener conto degli effetti dovuti al limite tecnologico della messa in opera dei pannelli che raramente sono in grado di garantire un contatto rigido tra pannelli adiacenti, in particolare per pannelli profondi.

L'efficacia dei CW e dei BW è stata valutata variando l'interasse ( $i_{CW}$  o  $i_{BW} = 5.0, 7.5$  e  $10$  m), la lunghezza di infissione a scavo eseguito ( $h_{CW}$  o  $h_{BW} = 2, 4, 8$  e  $12$  m), e, solo per i BW, la lunghezza dell'inclusione ( $l_{BW} = 2.5, 5$  e  $10$  m). Le analisi sono state eseguite in tensioni efficaci, assumendo condizioni non drenate per lo strato di argilla Ag. Le fasi dell'analisi sono le seguenti:

1. condizioni iniziali (stato tensionale geostatico);
2. attivazione delle paratie e dei CW (o BW);
3. fase di scavo di 4 m;
4. installazione del solaio alla quota raggiunta alla precedente fase di scavo;
5. ripetizione delle fasi 3) e 4) fino alla profondità finale di scavo (pari a 28 m).

### 3. Risultati

L'efficacia dei CW e dei BW è stata valutata confrontando i campi di spostamento ottenuti nelle diverse configurazioni analizzate. La Figura 2 mostra il profilo di cedimento,  $w$ , in superficie a tergo della paratia (Fig. 2a) e la sua inflessione orizzontale,  $u$  (Fig. 2b), per l'analisi di riferimento in condizione di deformazione piana, 2D (No CW) e quella tipicamente osservata in presenza di CW (con interasse  $i_{BW} = 7.5$  m, e ammorsamento  $h_{BW} = 4$  m). In quest'ultimo caso, gli spostamenti si riferiscono ad un punto 1 situato a  $i_{BW}/2$  in corrispondenza del quale si verificano i massimi spostamenti orizzontali della paratia (vedi Fig. 1a).

In assenza di CW, l'inflessione e i cedimenti sono caratterizzati da forme e valori massimi in accordo

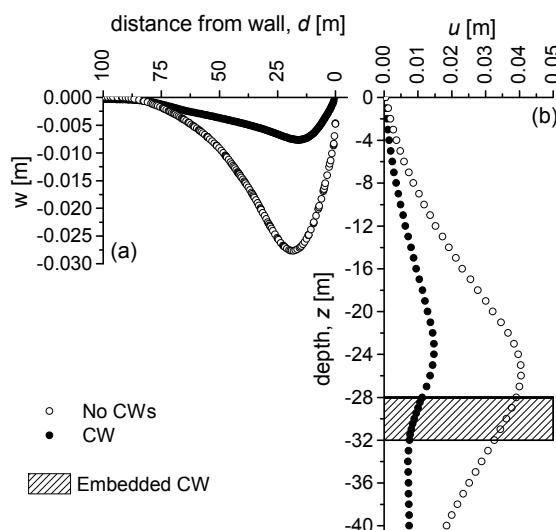


Figura 2. Risultati tipici delle analisi: a) cedimenti del piano campagna a tergo della paratia; b) inflessione della paratia.

a quanto indicato in letteratura (ad es. Mana & Clough, 1981; Hsieh e Ou, 1998): infatti, il cedimento massimo in superficie,  $w_{\max}$ , è di circa  $0.01 H_e$  e la massima inflessione della paratia,  $u_{\max}$ , è di circa  $1.6 w_{\max}$ . La presenza delle pareti sacrificali (CW) riduce significativamente il campo di spostamento misurato nell'analisi 2D di riferimento. Per il caso illustrato in Figura 2, il fattore di riduzione risulta circa pari a 3 e 4 per  $u_{\max}$  e  $w_{\max}$ , rispettivamente.

A parità di geometria, l'efficacia dei *butress-wall* (BW) dovrebbe essere inferiore a quella relativa a CW. Tuttavia, i risultati mostrati in Figura 3a e b ( $l_{BW} = 5$  m, pari a 2 pannelli) mostrano che i BW non sono in grado di modificare l'inflessione della paratia e, di conseguenza, i cedimenti del terreno: l'efficacia dei BW è molto ridotta. L'analisi effettuata aumentando l'ammorsamento dei BW fino al fondo della paratia (Fig. 3c e d) fornisce risultati molto simili a quelli appena descritti, evidenziando così un effetto marginale di questi parametri se si considerano BW corti.

Il parametro che quantifica l'efficacia,  $\eta$ , dei CW e BW nella riduzione dello spostamento può essere espresso come rapporto tra la massima inflessione della paratia tra due CW o BW e la massima inflessione della paratia in assenza di muri sacrificali (analisi di riferimento 2D).

Gli effetti dei parametri geometrici (infissione, interasse e lunghezza) sull'efficacia sono riportati nella Figura 4a, che sinteticamente, riassume i risultati dello studio parametrico effettuato.

Per CW ( $l_{BW}/0.5B = 1.0$ ), è evidente che una piccola profondità di infissione (pochi metri) al di sotto del fondo scavo è sufficiente a limitare notevolmente l'inflessione della paratia: per i valori dell'intervallo considerato in questo studio, l'efficacia dei CW è molto elevata ( $\eta = 0.3 \div 0.6$ ). L'efficacia dei BW aumenta all'aumentare dell'infissione, della lunghezza e con la riduzione dell'interasse. Tuttavia, l'efficacia dei BW è minore rispetto a quella dei CW per la maggior parte delle configurazioni geometriche analizzate, anche nei casi in cui il volume complessivo dei BW risulta essere maggiore di quello dei CW.

I risultati delle analisi confermano che i *cross wall*, per effetto della loro elevata rigidità assiale, induce per ciascuna sezione della paratia occupata dai CW, una sorta di "effetto di spigolo" che riduce significativamente l'inflessione della paratia (Ou & Shieh, 1998; Finno et al. 2007). D'altra parte, la *performance* dei BW è legata alla mobilitazione della resistenza del terreno (resistenza al taglio lungo le superfici dei BW e resistenza passiva di fronte al BW) che risulta essere poco efficace. In particolare, per mobilitare la resistenza passiva di fronte al BW è necessaria una notevole deformazione del terreno, mentre per parte della resistenza laterale disponibile risulta mobilitata dal sollevamento dei pannelli del BW indotto dallo scavo.

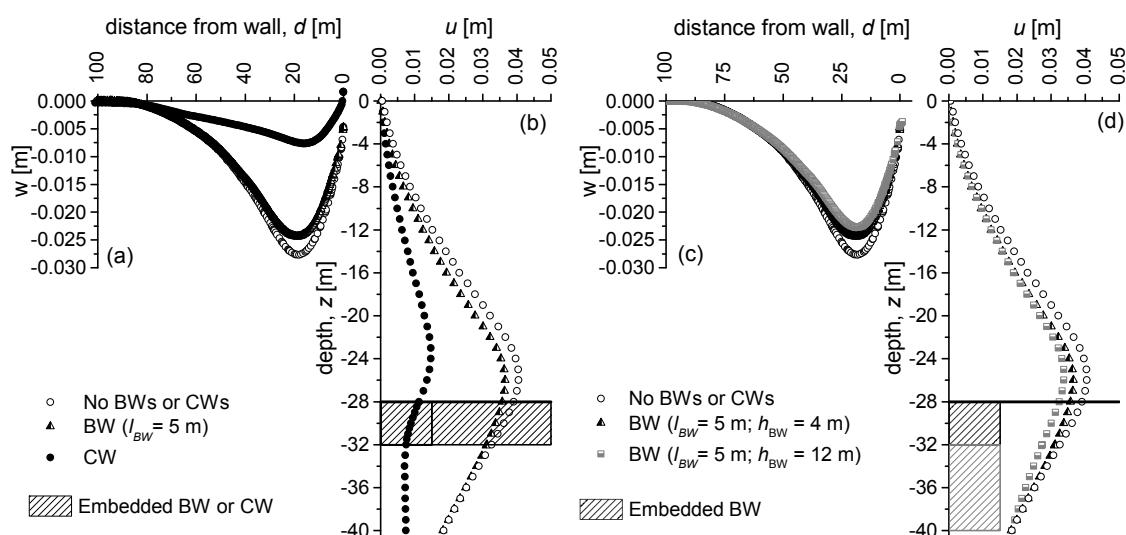
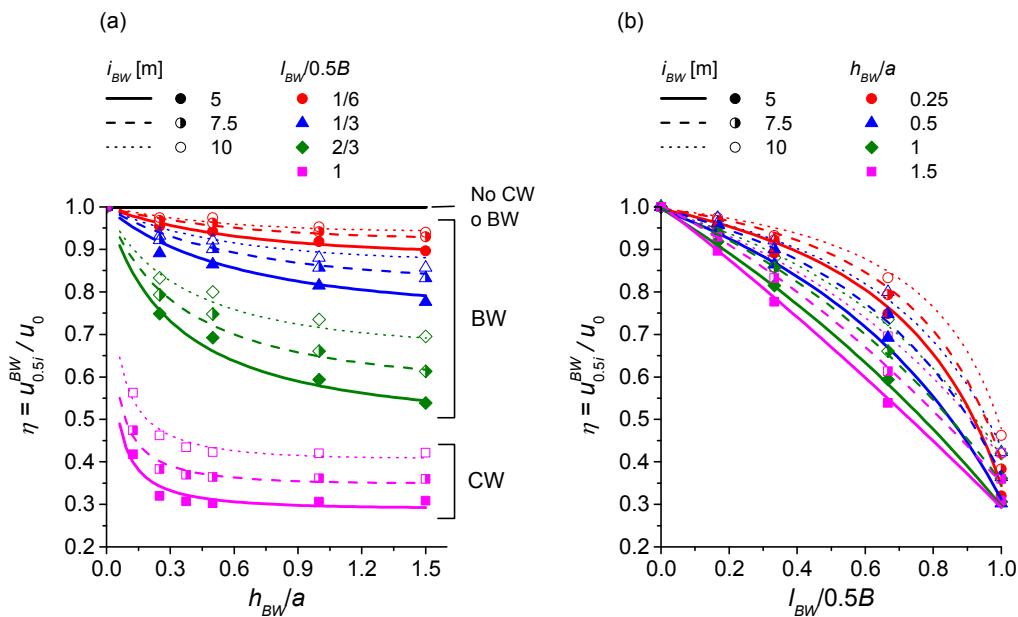


Figura 3. Confronto tra l'efficacia dei muri sacrificali CW e BW in termini di: a-d) cedimento in superficie e b-d) inflessione della paratia.



Nella Figura 4b, l'efficacia delle pareti sacrificali è rappresentata in funzione della loro lunghezza normalizzata. Per un'infissione dei BW relativamente elevata ( $h_{BW}/a \geq 1.0$ ) il rapporto tra l'efficacia e la lunghezza normalizzata è quasi lineare e indipendente dai valori dell'interasse. Tale dipendenza diventa via via non lineare per BW con infissione minore all'aumentare della lunghezza del muro sacrificale verso la condizione di CW: in questo caso è chiaramente evidente l'effetto della variazione del meccanismo di trasferimento del carico terreno-parete: da quella caratterizzante i BW a quella associata al CW.

#### 4. Conclusioni

In questa nota sono stati presentati e discussi i principali risultati di analisi numeriche in condizioni 3D, finalizzate a evidenziare gli effetti della lunghezza, dell'interasse e dell'infissione delle pareti sacrificali di tipo *buttress wall* sulle loro prestazioni nel ridurre gli spostamenti del terreno indotti da scavi profondi.

Le analisi sono state effettuate utilizzando un modello costitutivo avanzato in grado di riprodurre la significativa non linearità del comportamento del terreno.

I risultati delle analisi confermano, per un dato insieme di parametri geometrici, che i CW sono significativamente più efficaci dei BW. Ciò è dovuto al diverso meccanismo di trasferimento dei carichi dal terreno alla paratia che caratterizzano i CW e i BW.

Quando la larghezza dello scavo non è elevata, è certamente più efficace l'utilizzo di CW con grandi interassi rispetto a BW, anche con piccoli interassi. Per scavi di grande ampiezza planimetrica in cui possono essere adottati solo BW, i risultati ottenuti in questo studio possono essere utili per una valutazione preliminare della più efficace disposizione geometrica di questo tipo di pareti sacrificali.

#### Bibliografia

- Callisto (2011). "Inclusioni strutturali per la riduzione degli spostamenti indotti da scavi profondi". In Proc. XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica – Innovazione Iecnologica nell'ingegneria Geotecnica, 22-24 giugno 2011, Napoli, Edizioni AGI, vol. 1: 51-62.
- Clough, G.W. & O'Rourke, T.D. (1990). "Construction induced movements of in situ walls". In Proc. Design and performance of earth retaining structures, GSP 25: 430-470. ASCE, Ithaca, NY,

- Erbi, E. & Soccodato, F.M. (2012a). "A 3D numerical study of deep excavation in clayey soils". *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (Ed. Viggiani, G.), 505-513. CRC press, London, UK.
- Erbi, E. & Soccodato, F.M. (2012b). "Numerical analysis of crosswalls effectiveness in reducing wall deflections associated to deep excavations". *New developments in soil mechanics and geotechnical engineering* (Eds. Atalar C., Çinicioglu F., Das B.M., Sağlamer A. & Toğrol E.). 133-139. Near East University, Nicosia, TRNC.
- Finno, R.J., Blackburn, J.T., & Roboski J.F. (2007). "Tree-Dimensional Effects for supported excavations in clay", *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, 133 (1), 30-36.
- Finno, R.J. & Roboski, J.F. (2005). "Three-Dimensional responses of a Tied-Back Excavation through clay", *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, 131 (3), 273-282.
- Hsieh, P.G., & Ou, C.H. (1998). "Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation", *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 1004-1017.
- Mana, A.I. & Clough, G.W. (1981). "Prediction of movements for braced cuts in clay", *Journal Geotechnical Engineering Division*, ASCE 107 (6), 759-777.
- Ou, C.Y., Chiou, D.C. & Wu, T.S. 1996. "Three-Dimensional finite element analysis of deep excavations", *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (5), 337-345.
- Ou, C.Y. & Shiau, B.Y. (1998). "Analysis of the corner effect on excavation behaviours", *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 532-540.
- Ou, C.Y., Lin, Y.L. & Hsieh, P.G. (2006). "A case record of an excavation with cross walls and buttress walls", *Journal GeoEngineering*, 1 (2), 579-586.
- Ou, C.Y., Hsieh, P.G. & Lin, Y.L. (2011). "Performance of excavation with cross walls", *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*. ASCE 137 (1), 94-104.
- Plaxis 3D Foundation, version 1.6, Plaxis user manual, Delft University of Technology & Plaxis bv The Netherlands. Netherlands, 2006.
- Rampello, S., Callisto, L., Viggiani, G., Soccodato, F.M. (2012). "Evaluating the effects of tunnelling on historical buildings: the example of a new subway in Rome". *Geomechanics and tunnelling*, 5 (3): 275-299.
- Schanz, T., Vermeer, P.A. & Bonnier P.G. (1999). "Formulation and verification of the Hardening-Soil Model", In: *R.B.J. Brinkgreve, Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. 281-290. Balkema, Rotterdam.