

# La mitigazione degli effetti indotti dallo scavo di gallerie mediante l'uso di barriere preinstallate: il caso della linea C della metropolitana di Roma

L. Masini<sup>1</sup>, S. Rampello<sup>1</sup>, L. Fantera<sup>1,3</sup>, E. Romani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Università di Roma La Sapienza*

<sup>2</sup> *Metro C s.c.p.a*

<sup>3</sup> *Attualmente: Technip Italy Direzione Lavori S.p.A.*

**SOMMARIO:** La rete di trasporti pubblici della città di Roma è attualmente in via di potenziamento con la costruzione della terza linea della metropolitana, la linea C. Questa sottopassa il centro storico della città con significative interferenze con monumenti ed edifici esistenti di inestimabile valore storico e artistico. Ciò ha determinato l'adozione di particolari misure di salvaguardia per prevenire danni ai manufatti più vulnerabili. A tale scopo, per verificare l'efficienza di barriere preinstallate per la riduzione degli effetti indotti dallo scavo di gallerie, è stato predisposto un campo prova con una barriera costituita da una fila di pali accostati nel tratto di linea tra le stazioni di Amba Aradam e San Giovanni, vicino a una sezione di monitoraggio di campo libero. In questa nota sono mostrati i dati di monitoraggio registrati nella sezione di campo libero e in quella in cui è presente la barriera. Le misure in sito sono state quindi interpretate con un'analisi a ritroso svolta con il metodo degli elementi finiti, utilizzando tre procedure 2D di simulazione dello scavo della galleria.

**Keywords:** scavo di gallerie, monitoraggio, analisi numeriche, barriere preinstallate, tecniche di mitigazione

## 1 DESCRIZIONE DEL SITO

Nell'ottobre 2002, la società *Metro C S.C.p.A.* è stata incaricata dal Comune di Roma di costruire la nuova linea C della metropolitana. La terza linea della Capitale contribuirà alla decongestione del traffico nel centro della città, facilitando il collegamento con la periferia sud-orientale. La parte più orientale del tracciato è stata recentemente completata fino alla stazione di San Giovanni (maggio 2018) che collega la linea C con la linea A esistente. La parte centrale del tracciato è attualmente in costruzione nella zona del centro storico della città e ha dovuto affrontare diversi problemi legati alla presenza lungo il percorso di ritrovamenti archeologici e monumenti storici di inestimabile valore culturale. Ciò ha contribuito all'adozione di un vasto programma di monitoraggio per valutare gli effetti della costruzione della Linea C sul patrimonio storico e l'adozione di tecniche avanzate di mitigazione di potenziali effetti dannosi indotti sui manufatti limitrofi.

Nello specifico, sono stati implementati interventi di protezione attiva e passiva: i primi riducono gli spostamenti che si sviluppano nel terreno contestualmente allo scavo delle gallerie, come la tecnica delle iniezioni di compensazione (ad esempio: Mair

R., 2008; Masini et al., 2012, 2014), adottata nelle vicinanze della stazione Amba Aradam, mentre i secondi sono eseguiti prima del passaggio delle gallerie e possono migliorare le proprietà del terreno (Masini et al., 2019) oppure riducono la propagazione degli spostamenti indotti dallo scavo della galleria, modificando in modo favorevole il profilo dei cedimenti osservati in condizioni di campo libero (Rampello et al., 2019). Questo secondo tipo di intervento, a cui si ricorre quando la galleria è ubicata a lato della struttura e in adiacenza ad essa, è tipicamente costituito da barriere passive installate prima delle operazioni di scavo, tra la galleria e la struttura, agendo da schermo alla trasmissione del campo di spostamenti indotto nel terreno (Bilotta E., 2008; Bilotta E. e Strallebrass S.E., 2009; Bilotta E. e Russo G., 2011; Fantera et al., 2016; Rampello et al., 2019; Losacco et al., 2019). Per valutare l'efficacia di questa tecnica di mitigazione, è stato predisposto un campo prova caratterizzato dalla presenza di una barriera costituita da una fila di pali accostati parallela all'asse delle gallerie nel tratto di linea compreso tra le stazioni di Amba Aradam e di San Giovanni, a breve distanza ( $\approx 25$  m) dalle antiche Mura Aureliane (III secolo d.C.). Il campo prova (Fig. 1), denominato *sito AMA*, è caratterizzato dall'assenza

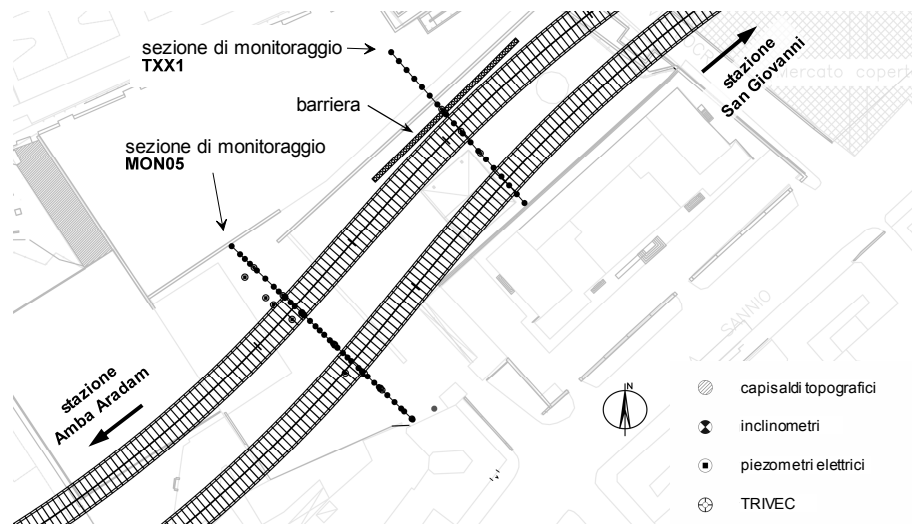


Figura 1 – Vista in pianta del tracciato della Linea C in corrispondenza del campo prova AMA e delle sezioni di monitoraggio

di strutture preesistenti nelle vicinanze e pertanto è rappresentativo delle condizioni di campo libero. Le due sezioni strumentate sono state installate perpendicolarmente all'asse della galleria, una all'esterno della barriera, per misurare l'effetto delle operazioni di scavo in condizioni di campo libero, l'altra in corrispondenza della mezzeria, per valutare l'efficacia della barriera protettiva. La strumentazione di monitoraggio è composta da capisaldi per la livellazione di precisione installati al piano campagna, tubi inclinometrici e Trivec, questi ultimi in grado di misurare le tre componenti di spostamento, a intervalli di profondità di 0.5 m. Nel seguito si farà riferimento alle sole misure di livellazione topografica sui capisaldi installati a piano campagna.

La successione stratigrafica dei terreni è costituita

da uno strato superficiale di Riporti antropici (R), prevalentemente a grana grossa, che poggia su un deposito leggermente sovraconsolidato di limi sabbiosi, dello spessore di circa 13 m; al di sotto di esso si trova uno strato di ghiaie sabbiose addensate, spesse circa 12 m, limitato inferiormente dal deposito pliocenico delle Argille Vaticane, consistente, sovraconsolidato, e di notevole spessore (Fig. 2). Nella figura sono anche mostrati i profili di resistenza alla punta  $q_c$  ottenuti dalle prove penetrometriche statiche e quelli del modulo di taglio iniziale  $G_0$ , calcolato a partire dai valori della velocità di propagazione delle onde di taglio misurate in prove Cross-Hole. Il profilo del carico idraulico, determinato da misure piezometriche, è compatibile con un moto di filtrazione stazionario diretto verso il basso, con perdite di carico concentrate nello strato di limi argillosi.

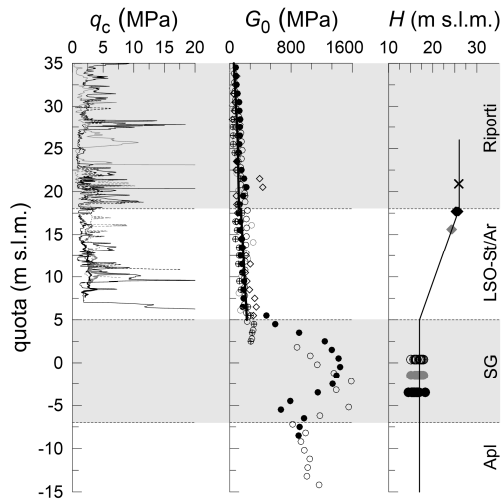


Figura 2 – Modello geotecnico

## 2 ANALISI NUMERICHE 3D

L'analisi a ritroso dei cedimenti osservati al termine dello scavo della galleria dispari, la più vicina alle mura Aureliane, è stata eseguita mediante analisi numeriche agli elementi finiti eseguite con il codice di calcolo Plaxis (Brinkgreve et al., 2014). La barriera discontinua di pali è stata simulata adottando un modello numerico tridimensionale, mentre si è fatto riferimento al caso di galleria completamente passata, ottenendo così il campo di spostamenti indotto dallo scavo della galleria in condizioni di deformazione piana. La geometria di riferimento del modello è schematicamente rappresentata nella Fig. 3. La galleria dispari è stata scavata a una profondità dal piano campagna  $z_0 = 25$  m all'interno dello strato di limo sabbioso utilizzando una TBM di tipo EPB, con un diametro esterno  $D_t = 6.7$  m e un rapporto coper-

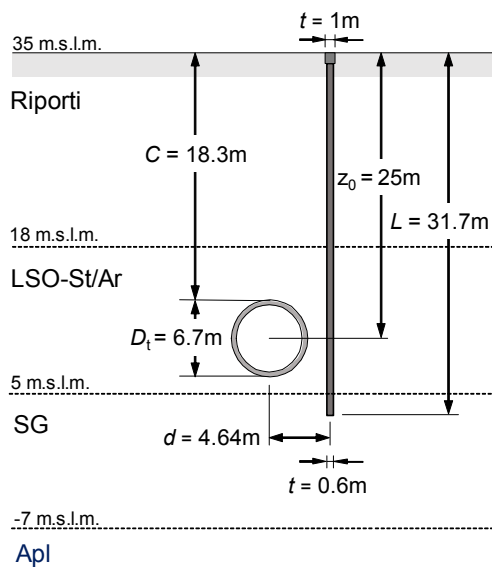


Figura 3 – Schema geometrico di riferimento

tura-diametro  $C / D_t = 2.73$  ( $C = 18.3$  m). La distanza della barriera dall'asse della galleria è  $d = 4.64$  m ( $d = 0.69 \cdot D_t$ ). La barriera è formata da una linea di 48 pali trivellati di diametro  $D_p = 0.6$  m e lunghezza  $L = 31.7$  m ( $L = z_0 + D_t$ ), installati a interasse  $s = 0.9$  m ( $s = 1.5 \cdot D_p$ ).

La Fig. 4 mostra il reticolo di calcolo 3D adottato nelle analisi; esso ha un'estensione in direzione parallela all'asse della galleria di 1,8 m, includendo la presenza di un palo intero più due metà.

Il comportamento meccanico del terreno è stato descritto utilizzando il modello *Hardening soil (HS)*,

per il terreno di riporto, la ghiaia sabbiosa (SG) e il deposito di argilla pliocenica (Apl), mentre il comportamento meccanico dello strato di limo sabbioso (LSO-St/Ar) è stato descritto mediante il modello *Hardening Soil with small strain stiffness (HSsmall)*, (Benz et al., 2009; Schanz et al., 1999). In entrambi i modelli il terreno è assimilato a un mezzo elastoplastico con incrudimento isotropo e criterio di resistenza di Mohr-Coulomb. In aggiunta alle caratteristiche di *Hardening Soil*, il modello *HSsmall* descrive il comportamento isteretico para-elastico del terreno a piccole deformazioni mediante l'introduzione di un modulo di taglio iniziale  $G_0$  e di una curva di decadimento del rapporto  $G_s/G_0$  con la deformazione di taglio  $\gamma$ , dove  $G_s$  è il modulo di taglio secante. I parametri di resistenza e rigidità dei terreni sono stati calibrati sui risultati di prove triassiali, eseguite utilizzando trasduttori locali di deformazione assiale, e di prove di colonna risonante, mentre il profilo del modulo di taglio a piccole deformazioni è stato calibrato sulle prove Cross-Hole. I campioni indisturbati sono stati prelevati dallo strato di limo sabbioso (LSO-St/Ar) e sono stati sottoposti a prove di laboratorio dopo essere stati consolidati a un valore della pressione di cella pari alla tensione media efficace in sito. La Fig. 5 mostra i risultati di tre prove di compressione triassiale drenate standard e quattro prove triassiali drenate eseguite a controllo del percorso di carico: due prove di compressione in scarico ( $\sigma'_a = \text{cost}$ ,  $\delta\sigma'_r < 0$ ), che riproducono il percorso di carico di elementi di terreno posti alla profondità dell'asse della galleria (zona A, Fig. 5b) e due prove di estensione in scarico ( $\delta\sigma'_a < 0$ ,  $\sigma'_r = \text{cost}$ ), che riproducono il percorso tensionale di elementi di terreno in corrispondenza della corona e dell'arco rovescio della galleria (zona B,

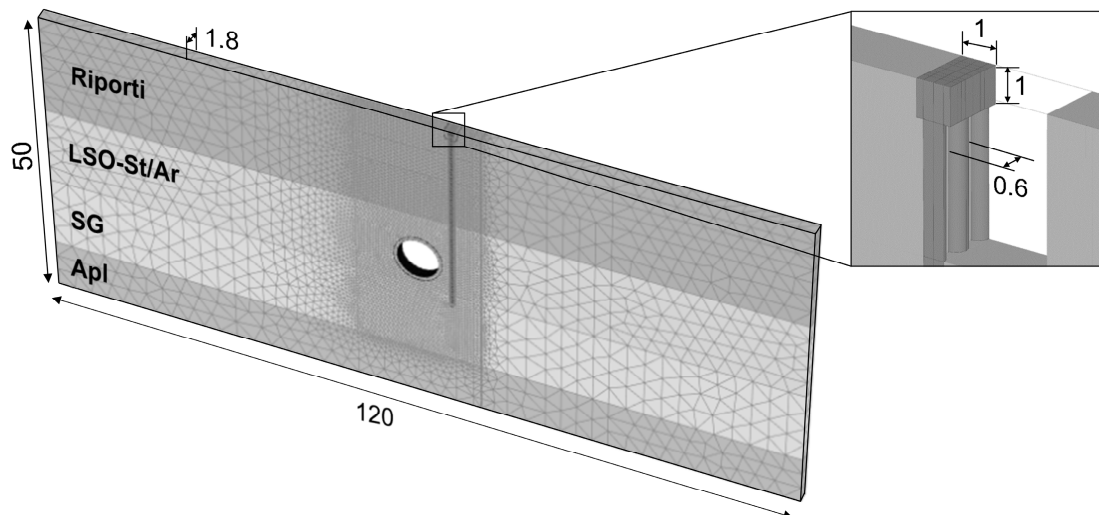


Figura 4 – Reticolo tridimensionale agli elementi finiti adottato nelle analisi

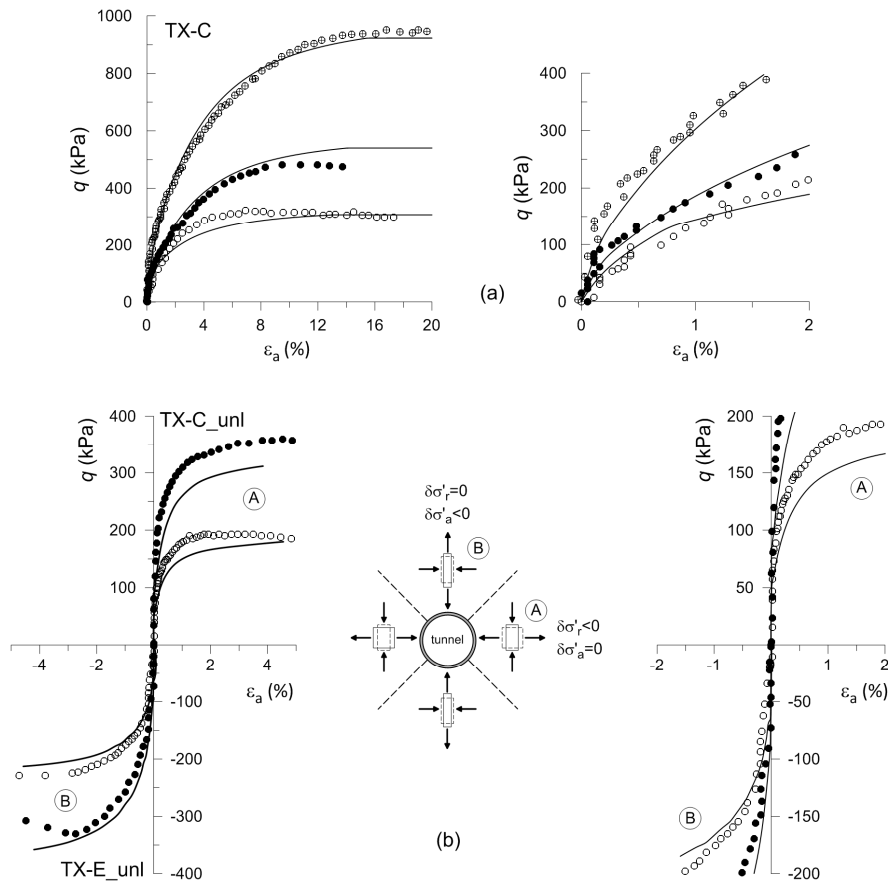


Figura 5 – Prove triassiali con trasduttori locali di deformazione e confronto con le previsioni del modello *HSmall*

Tabella 1. Parametri di resistenza, rigidità e stato iniziale

terreno	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$c'$ kPa	$\phi'$	OCR	$k_0$	$G_0^{ref}$ MPa	$\gamma_{0.7}$ %	$E_{ur}^{ref}$ MPa	$E_{50}^{ref}$ MPa	$E_{oed}^{ref}$ MPa	$m$
Riporti	17	5	34	3.5	-	-	-	240	24	24	1.0
LSO-St/Ar	19.5	28	27	1.3	0.615	125	$3.5 \cdot 10^{-4}$	150	8.21	5.52	0.8
SG	20	0.1	40	7.5	-	-	-	900	90	90	0.4
Apl	20.9	41.3	25.7	2.5	0.840	-	-	450	22.5	22.5	0.9

Fig. 5b). I risultati delle simulazioni mostrano un buon accordo tra le curve tensioni-deformazioni osservate e calcolate utilizzando i parametri elencati nella Tabella 1 in un intervallo di deformazione 0.1%-1%, tipico degli scavi meccanizzati di gallerie.

Le analisi sono state eseguite in termini di tensioni efficaci, assumendo un comportamento non drenato per l'argilla pliocenica e un comportamento drenato per i terreni che interagiscono con la galleria, caratterizzati da permeabilità medio-elevata.

Il comportamento degli elementi strutturali è stato assimilato a quello di un mezzo elastico lineare con coefficiente di Poisson  $\nu = 0.15$  e peso dell'unità di volume  $\gamma = 25$  kN/m<sup>3</sup>. Per i pali si è assunto un modulo di Young  $E = 31$  GPa. Il rivestimento della galleria, spesso 0.3 m, è stato modellato con elementi piastra caratterizzati da una rigidità assiale

$EA = 9.3 \cdot 10^6$  kN/m e rigidità flessionale  $EI = 6.98 \cdot 10^4$  kNm<sup>2</sup>/m.

Per il contatto terreno-struttura sono stati utilizzati elementi interfaccia privi di coesione, con angolo di resistenza al taglio ridotto di un coefficiente  $R_{int} = 0.7$  rispetto a quello del terreno adiacente.

### 3 SIMULAZIONE DELLO SCAVO DELLA GALLERIA

La simulazione dello scavo della galleria in condizioni di deformazione piana è stata eseguita utilizzando tre approcci: 1) un approccio tradizionale basato sul metodo del rilascio tensionale, in cui le forze nodali che agiscono al contorno della galleria vengono ridotte di un fattore  $\lambda$  (metodo  $\lambda$ ); 2) un ap-

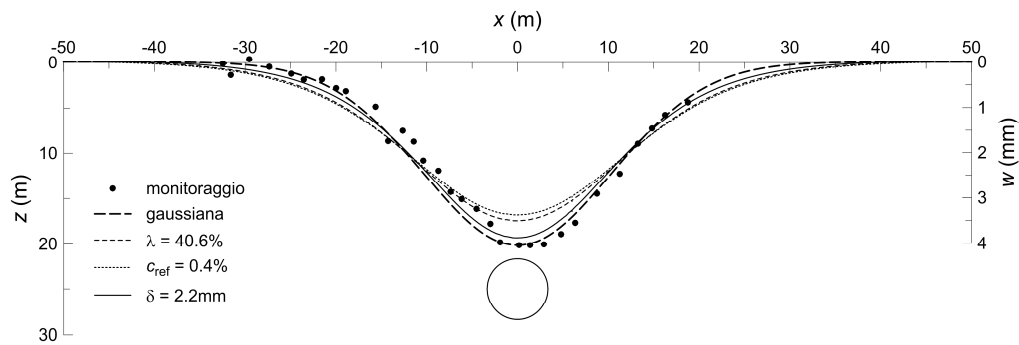


Figura 6 – Conca di subsidenza osservata in assenza della barriera e confronto con le previsioni numeriche

proccio basato sulle deformazioni, in cui viene applicata una contrazione radiale  $c_{ref}$  al cavo (metodo  $c_{ref}$ ); 3) un approccio basato sugli spostamenti, in cui una distribuzione di spostamenti verticali viene applicata temporaneamente al contorno della galleria (metodo  $\delta$ ). In tutti gli approcci si inizializza dapprima lo stato tensionale efficace, riproducendo le condizioni stazionarie di moto di filtrazione verso il basso. Nelle successive fasi di calcolo viene simulato lo scavo: nel metodo  $\lambda$ , gli elementi di terreno all'interno della galleria vengono rimossi e le forze nodali che agiscono al contorno del cavo vengono parzialmente rilasciate di un fattore  $\lambda$ ; successivamente, viene attivato il rivestimento e le forze nodali residue  $(1-\lambda)$  vengono trasferite al rivestimento. Nel metodo  $c_{ref}$ , si applica una contrazione radiale  $c_{ref}$  agli elementi del rivestimento, attivati contestualmente alla disattivazione del terreno nella galleria; la contrazione è pari a un'aliquota dell'area della sezione trasversale iniziale del cavo. Infine, nel metodo  $\delta$ , adottato per le analisi di interazione lineamentoni (Rampello et al., 2012), si rimuove il terreno nella galleria e si applica una distribuzione di spostamenti verticali ellittica, completamente descritta dallo spostamento verticale  $\delta$  in corona, alla sola metà superiore del cavo. Nella fase successiva, viene attivato il rivestimento e viene rimossa la condizione sugli spostamenti, in modo che le forze nodali valutate nella fase precedente possano essere trasferite al rivestimento.

Nelle analisi con la barriera, la fila di pali e la trave di coronamento, di sezione  $1 \times 1 \text{ m}^2$ , vengono attivate dopo l'inizializzazione dello stato tensionale efficace, prima dello scavo della galleria.

#### 4 RISULTATI DELLE ANALISI E CONFRONTO CON I DATI DI MONITORAGGIO

La Fig. 6 mostra il confronto tra i cedimenti misurati mediante livellazione topografica di precisione lungo la sezione di monitoraggio di campo libero dopo il passaggio della prima TBM, e quelli calcolati in

assenza della barriera, alla fine dello scavo della galleria. I parametri  $\lambda$ ,  $c_{ref}$  e  $\delta$  sono stati calibrati nelle tre analisi per riprodurre la perdita di volume misurata  $V_L$ . La curva gaussiana che approssima la conca di subsidenza osservata è caratterizzata da un cedimento massimo  $w_{max} = 4 \text{ mm}$ , un parametro di ampiezza  $K = 0.398$  e una perdita di volume  $V_L = 0.3\%$ . A parità di perdita di volume, i profili di cedimento calcolati con i tre metodi di simulazione sono caratterizzati da spostamenti massimi e larghezze delle conche di subsidenza diversi. Il metodo  $c_{ref}$  e il metodo  $\lambda$  sottostimano il massimo cedimento rispettivamente del 17% ( $w_{max} = 3.4 \text{ mm}$ ) e del 14% ( $w_{max} = 3.5 \text{ mm}$ ), con conche più ampie di quella osservata. Il migliore accordo si ottiene con il metodo  $\delta$ , che fornisce una buona stima del massimo cedimento ( $w_{max} = 3.9 \text{ mm}$ ) e una larghezza quasi coincidente della curva di subsidenza. Questo risultato conferma la capacità del metodo  $\delta$  di riprodurre i profili di cedimento osservati a piano campagna in condizioni di campo libero.

In presenza della barriera protettiva, i dati di monitoraggio mostrano una riduzione del massimo cedimento e della perdita di volume pari rispettivamente al 22% ( $w_{max} = 3.1 \text{ mm}$ ) e al 27% ( $V_L = 0.22\%$ ), con una riduzione del cedimento appena dietro la barriera ( $x/D = D_i$ ) del 56%, confermando che una barriera preinstallata, seppur discontinua, è in grado di ridurre sensibilmente gli spostamenti indotti dallo scavo di una galleria.

Per confrontare il profilo dei cedimenti osservato e quello calcolato in presenza della fila di pali, le analisi sono state ripetute utilizzando gli stessi valori dei parametri  $\lambda$ ,  $c_{ref}$  e  $\delta$  adottati in condizioni di campo libero, assumendo così che i parametri operativi della macchina di scavo siano gli stessi in condizioni di campo libero e in presenza della barriera. Tale assunzione è compatibile con la procedura tipicamente adottata per la gestione dei parametri della TBM i quali, in condizioni di regime, vengono modificati solo se intervengono variazioni significative nelle condizioni di scavo o quando vengono superati i valori soglia di alcuni indicatori.

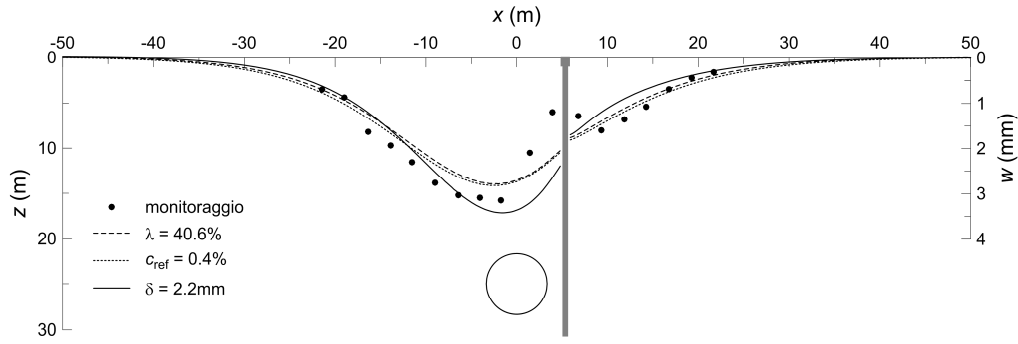


Figura 7 – Conca di subsidenza osservata in presenza della barriera e confronto con le previsioni numeriche

L'efficacia della barriera preinstallata è stata valutata confrontando gli spostamenti verticali calcolati in presenza e in assenza della fila di pali. Specificamente, estendendo la definizione proposta da Bilotta et al. (2008), la riduzione dei cedimenti alla distanza  $x$  dalla barriera è stata espressa in termini di efficienza locale:

$$\eta_{loc}(x) = 1 - \frac{w_b(x)}{w_{ff}(x)} \quad (1)$$

dove  $w_b(x)$  e  $w_{ff}(x)$  sono i cedimenti calcolati rispettivamente in presenza della barriera e in condizioni di campo libero. Per valutare l'effetto globale dell'intervento di mitigazione, è stata inoltre definita un'efficienza integrale, ottenuta confrontando le aree delle conche di subsidenza calcolate in presenza e in assenza della barriera, a tergo di essa:

$$\eta_{int} = 1 - \frac{\int_{x_b}^{x_m} w_b(x) \cdot dx}{\int_{x_b}^{x_m} w_{ff}(x) \cdot dx} \quad (2)$$

dove  $x_b$  e  $x_m$  rappresentano l'ascissa corrispondente alla faccia esterna della barriera e la distanza per la quale  $w_b(x) = w_{ff}(x)$ .

Entrambe le grandezze esprimono la capacità di mitigazione dell'intervento e tendono all'unità al crescere della capacità del setto di ridurre i cedimenti indotti dallo scavo della galleria.

Nella Fig. 7 è mostrato il confronto tra il profilo dei cedimenti osservato e quello calcolato in presenza della barriera. Le conche di subsidenza calcolate sono caratterizzate da perdite di volume in buon accordo con quanto osservato: si ottiene infatti  $V_L = 22\%$ ,  $23\%$  e  $23\%$  per il metodo  $\lambda$ ,  $c_{ref}$  e  $\delta$ . Come già osservato in condizioni di campo libero, il metodo  $\delta$  fornisce una buona stima della conca di subsidenza, con un incremento del massimo cedimento dal lato della galleria di circa il 10%

( $w_{max} = 3.4$  mm) rispetto al valore misurato. Il metodo  $c_{ref}$  e il metodo  $\lambda$  sottostimano invece  $w_{max}$  di circa il 10% e mostrano una forma molto simile del profilo dei cedimenti. A tergo della fila di pali, tutte le analisi mostrano un discreto accordo con i cedimenti misurati. I tre metodi di simulazione sottostimano l'efficienza locale osservata appena dietro la barriera, a una distanza  $x = D_t$ ; il migliore accordo si ottiene utilizzando il metodo  $\delta$  ( $\eta_{loc} = 49\%$ ), mentre gli altri approcci forniscono una minore riduzione di cedimento:  $\eta_{loc} = 45\%$  e  $41\%$  rispettivamente per il metodo  $\lambda$  e il metodo  $c_{ref}$ . Viceversa, se si considera l'efficienza integrale, la stima più vicina alla conca osservata dietro la barriera ( $\eta_{int} = 46\%$ ) è fornita dal metodo  $\lambda$  ( $\eta_{int} = 45\%$ ), mentre il metodo  $c_{ref}$  e il metodo  $\delta$  forniscono rispettivamente una leggera sottostima ( $\eta_{int} = 41\%$ ) e sovrastima ( $\eta_{int} = 53\%$ ) rispetto ai dati di monitoraggio. In definitiva, considerando entrambe le condizioni di assenza e di presenza della barriera protettiva, il metodo  $\delta$  sembra fornire il miglior compromesso per una simulazione 2D del campo di spostamenti indotti a piano campagna dallo scavo della galleria.

## 5 CONCLUSIONI

Per la realizzazione della nuova linea C della metropolitana di Roma è stato allestito un campo prova sperimentale per valutare l'efficienza di una barriera costituita da una fila di pali accostati nel ridurre i cedimenti indotti dallo scavo delle gallerie di linea. A tale scopo, sono state installate due sezioni di monitoraggio, perpendicolari all'asse delle gallerie: una in condizioni di campo libero, l'altra ubicata in corrispondenza della mezzeria della barriera. I dati di monitoraggio hanno mostrato che la barriera preinstallata è stata in grado di ridurre la perdita di volume a piano campagna di circa il 27% e il cedimento subito a tergo della barriera del 56%, con una efficienza integrale del 46%. I dati di monitoraggio sono stati analizzati eseguendo analisi tridimensionali agli elementi finiti, per descrivere la geometria disconti-

nua della barriera di pali, ma facendo riferimento alla condizione di galleria interamente passata. Sono stati adottati tre approcci per simulare lo scavo della galleria, calibrati per fornire la stessa perdita di volume misurata nella sezione di monitoraggio di campo libero. I risultati hanno mostrato che l'approccio basato sull'applicazione di una distribuzione nota di spostamenti (metodo  $\delta$ ) fornisce il miglior accordo con la curva di subsidenza in condizioni di campo libero, mentre il metodo di rilascio delle forze (metodo  $\lambda$ ) e il metodo della contrazione globale (metodo  $c_{ref}$ ) sottostimano il massimo cedimento rispettivamente del 14% e 17%. Invece, in presenza della barriera tutti e tre i metodi forniscono una stima soddisfacente del volume perso stimato dai dati di monitoraggio. Tuttavia, se si considerano entrambe le condizioni di assenza e di presenza della barriera, il metodo  $\delta$  rappresenta il miglior compromesso per una simulazione 2D del campo di spostamenti indotti a piano campagna dallo scavo della galleria.

## RINGRAZIAMENTI

Il lavoro di ricerca presentato in questo documento è stato in parte finanziato dal progetto di ricerca europeo NETTUN (New Technologies for Tunnelling and Underground Works).

## BIBLIOGRAFIA

- Benz, T., Vermeer, P.A. and Schwab, R. 2009. A small-strain overlay model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 33, 25-44.
- Bilotta, E. 2008. Use of diaphragm walls to mitigate ground movements induced by tunnelling. *Géotechnique* 58 (2), 143-155.
- Bilotta, E. and Russo, G. 2011. Use of line of piles to prevent damages induced by tunnel excavation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137 (3), 254-262.
- Bilotta, E. and Stallebrass, S.E. 2009. Prediction of stresses and strains around model tunnels with adjacent embedded walls in overconsolidated clay. *Computers and Geotechnics* 36, 1049-1057.
- Brinkgreve, R.B.J., Engin, E. and Swolfs, W.M. 2014. *Plaxis 2D user manual*. Plaxis BV, Delft, The Netherlands.
- Fantera, L., Rampello, S. & Masini, L. 2016. A Mitigation Technique to Reduce Ground Settlements Induced by Tunnelling Using Diaphragm Walls. *Procedia Engineering* 158, 254-259.
- Losacco, N., Romani, E., Viggiani, G.M.B., Di Mucci, G. 2019. Embedded barriers as a mitigation measure for tunnelling induced settlements: A field trial for the line C in Rome. Proc. of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress, Naples, Italy
- Mair, R.J., 2008. 46th Rankine Lecture: tunnelling and geotechnics: new horizons. *Géotechnique* 58(9), 695-736.
- Masini, L., Rampello, S., Viggiani, G.M.B., and Soga, K. (2012). Experimental and numerical study of grout injections in silty soils. Proc. 7th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Rome, 495-503.
- Masini, L., Rampello S. and Soga, K. 2014. An approach to evaluate the efficiency of compensation grouting. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering* 140(12), 04014073.
- Masini, L., Rampello, S., Carloni, S., Romani, E. 2019. Ground response to mini-tunnelling plus ground improvement in the historical city centre of Rome. Proc. of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress, Naples, Italy.
- Masini, L., Rampello, S., Romani, E. 2020. Performance of a Deep Excavation for the New Line C of Rome Underground. *Lecture Notes in Civil Engineering* 40, 575-582. ISSN: 2366-2557
- Rampello, S., Callisto, L., Viggiani, G. and 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), 254-262.
- Rampello, S., Fantera, L., Masini, L. 2019. Efficiency of embedded barriers to mitigate tunnelling effects. *Tunnelling and Underground Space Technology* 89, 109-124. doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.027
- Schanz, T., Vermeer, P.A. and Bonnier, P.G. 1999. Hysteretic damping in a small-strain stiffness model. Proc. of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG 10, London, pp. 737-742.

## ABSTRACT

### REDUCTION OF TUNNELLING INDUCED SETTLEMENT USING PRE-INSTALLED BARRIERS: THE CASE OF LINE C OF ROME UNDERGROUND

Keywords: tunnelling, field instrumentation, numerical analyses, ground settlements, protective barriers, mitigation technique

In October 2002, Metro C S.C.p.A. was appointed the General Contractor for the construction of the new Line C of Rome underground. The third underground service of the Capital is going to relieve the traffic congestion in the city centre by easing the connection with the south-eastern suburbs. The easternmost part of the line is completed up to the recently opened San Giovanni station (May 2018), which connects Line C with the existing Line A. The central part of the route is currently under construction in the historical centre of Rome, facing several problems for the presence of archaeological artefacts and historical monuments along the route. This promoted a massive monitoring program to evaluate the effects of the construction of the line on the historical heritage and the adoption of advanced mitigation techniques of any potential detrimental effect.

When the structure lies to the side of the tunnel, passive protective barriers installed before tunnelling, between the tunnel and the structures for which damage must be prevented, may provide a favourable variation of the displacement field induced by tunnelling.

To test the efficiency of pre-installed barriers in reducing tunnelling effects, a line of bored piles was pre-installed in the stretch between Amba Aradam

and San Giovanni stations, close to a well instrumented green-field section. This paper presents the monitoring data from both the green-field section and the section where the barrier was installed. Field observations confirmed the capability of the embedded piled barrier of effectively reducing the volume loss at ground surface (27%) and the settlement closely behind the barrier (56%). Monitoring data were back-analysed performing 3D FE analyses assuming plane strain tunnel excavation. Three approaches were adopted to simulate tunnel excavation, all calibrated to provide the same volume loss obtained from the greenfield section. The displacement-based approach ( $\delta$ -method) was seen to provide the best agreement in terms of greenfield settlement trough and the best compromise for predicting the settlement reduction on both sides of the barrier, when assuming plane strain tunnel excavation.