

LA MODELLAZIONE NUMERICA TRIDIMENSIONALE NELLO STUDIO DELLE INTERFERENZE TRA OPERE IN SOTTERRANEO E INFRASTRUTTURE IN SUPERFICIE

L'APPROCCIO UTILIZZATO A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE PER LO STUDIO DELL'INTERAZIONE TRA LO SCAVO DELLA NUOVA GALLERIA FERROVIARIA LONATO DELLA LINEA AD ALTA VELOCITÀ/ALTA CAPACITÀ MILANO-VERONA E L'AUTOSTRADA A4 TORINO-TRIESTE

Nella fase di progettazione e di realizzazione delle gallerie da sempre si pone particolare attenzione agli effetti che lo scavo può comportare in superficie. Tali effetti si esplicano non solo in termini di cedimenti in senso stretto ma comprendono tutta una serie di problematiche più complesse che possono arrivare a modificare la stabilità dei versanti nonché la stabilità delle infrastrutture e degli edifici presenti in superficie. Nelle aree urbane e, più in generale, nelle aree fortemente antropizzate l'interazione tra opere sotterranee e infrastrutture di comunicazione (strade, autostrade, ferrovie) presenti in superficie assume ancor più importanza in quanto sempre più spesso queste ultime non possono essere rilocalizzate ma devono essere mantenute fruibili all'utenza in condizioni di sicurezza. Per affrontare la sfida posta dalla crescente complessità delle interferenze delle opere geotecniche tra sottosuolo e superficie, il Progettista si deve avvalere di strumenti e metodologie innovativi in grado di predire in maniera accurata gli effetti degli scavi in termini di subsidenze e cedimenti indotti a piano

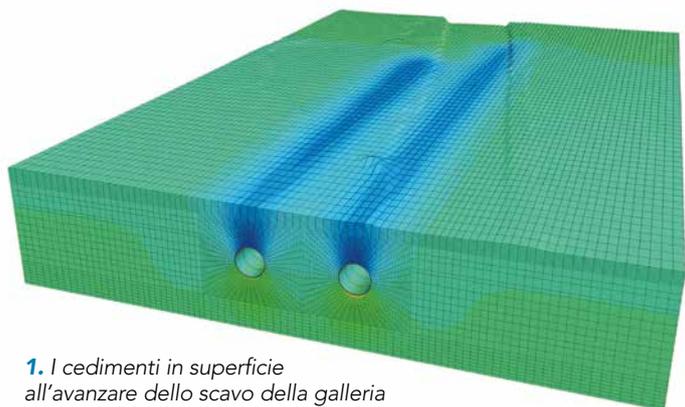
campagna. Tra questi strumenti assumono particolare rilevanza le metodologie di simulazione numerica al continuo o al discontinuo, utilizzando modelli tridimensionali.

La potenza di calcolo oggi disponibile sui normali personal computer e i software presenti sul mercato consentono di affrontare la modellazione tridimensionale in maniera molto più agevole che in passato. L'evoluzione e l'introduzione di generatori di mesh consentono di contenere i tempi per la realizzazione dei modelli e, con i giusti accorgimenti, anche i tempi di calcolo non sono più proibitivi [1]. L'utilizzo di tali metodi è oggi ampiamente diffuso, come documentato anche dai numerosi contributi presentati all'ultima Conferenza internazionale Iacmag (ad esempio [2, 3 e 4] per rimanere ad Autori del nostro Paese).

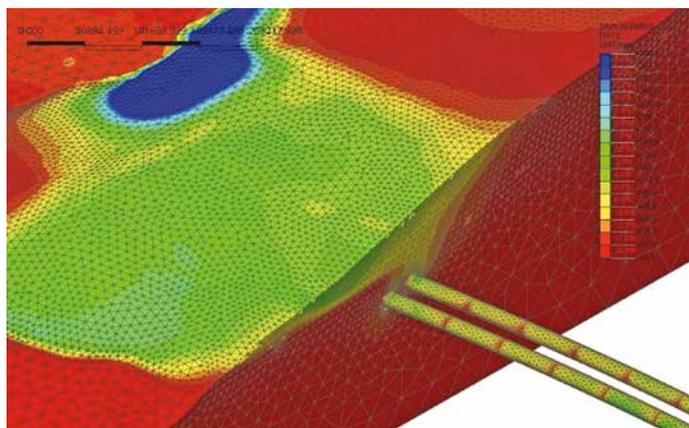
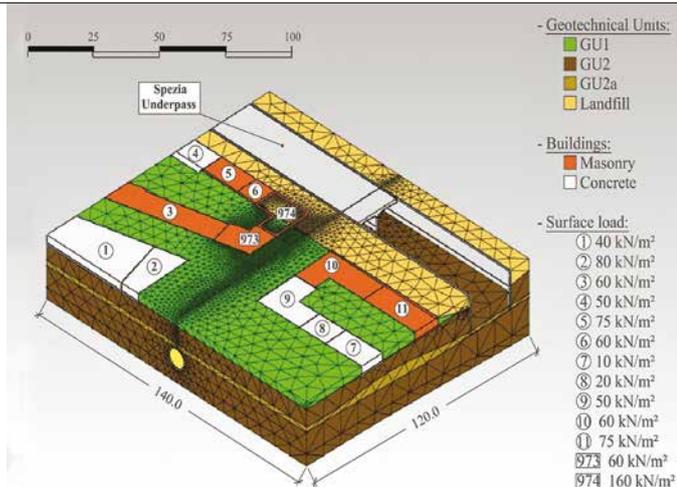
Le Figure 2A e 2B mostrano, a titolo di esempio, due modelli numerici tridimensionali adottati dagli Autori per lo studio di importanti interazioni tra opere in sottosuolo e deformazioni gravitative di versante.

In questa nota viene descritto l'approccio utilizzato a supporto della progettazione per lo studio dell'interazione tra lo scavo della nuova galleria ferroviaria Lonato della Linea ad Alta Velocità/Alta Capacità Milano-Verona e l'Autostrada A4 Torino-Trieste sviluppato per conto di Pini Swiss Engineers Srl.

La configurazione della nuova galleria Lonato prevede due imbocchi che saranno realizzati con sezione scatolare artificiale e una galleria naturale a due canne e singolo binario ciascuna di lunghezza pari a circa 4,8 km e con interasse pari a circa 32 m. Lo scavo della galleria sarà condotto con l'utilizzo di una TBM-EPB scudata e avverrà al di sotto di coperture esigue (12-13 m) e con una particolare geometria che prevede un'intersezione a basso angolo tra gli assi delle due infrastrutture. L'angolo di intersezione tra l'asse autostradale e la nuova galleria andrà



1. I cedimenti in superficie all'avanzare dello scavo della galleria



2A e 2B. Esempio di modello numerico tridimensionale per lo studio dell'interazione tra gallerie metropolitana e strutture e infrastrutture [5] e tra gallerie e versanti nel caso della galleria Val di Sambro [6]

di conseguenza a determinare una estesa e complessa zona di influenza tra le due canne della galleria e l'infrastruttura autostradale. La complessità dell'interferenza ha richiesto l'utilizzo di strumenti di simulazione particolarmente avanzati volti a riprodurre nella maniera più realistica possibile ciascuna fase dello scavo e gli interventi di consolidamento previsti.

Per comprendere in dettaglio i cedimenti indotti dallo scavo in superficie è stato quindi impiegato un modello numerico tridimensionale alle differenze finite articolato in 62 distinte fasi di calcolo che riproducono fedelmente ciascuna fase dello scavo meccanizzato previsto nel progetto. I risultati della simulazione hanno consentito di fornire ai Progettisti dell'opera i valori di cedimento atteso in maniera spazialmente continua per l'intero tratto interessato dall'interferenza.

DESCRIZIONE DELLE OPERE

La galleria Lonato, attualmente in costruzione, è ubicata tra i comuni di Lonato e Desenzano del Garda (BS) e costituisce la galleria più lunga del lotto funzionale Brescia Est-Verona della linea Alta Velocità/ Alta Capacità Milano-Verona [7]. La galleria è suddivisa in tre parti d'opera distinte (Figura 3):

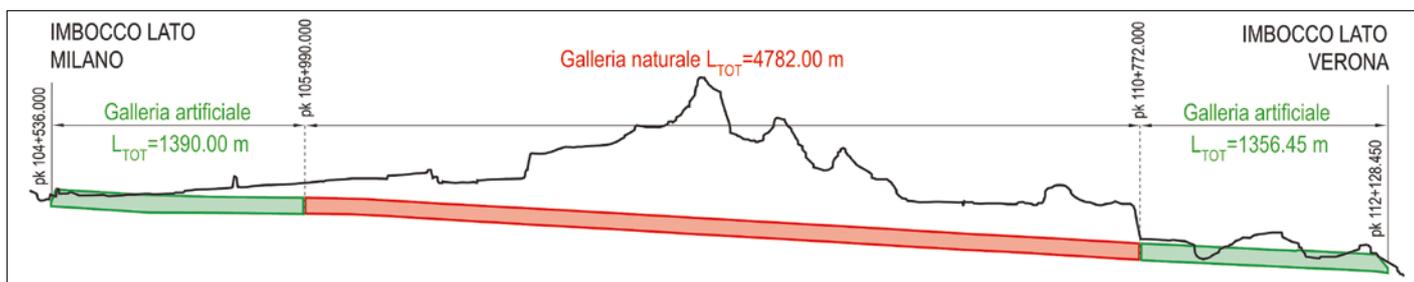
- porzione Ovest, corrispondente a una galleria artificiale di lunghezza complessiva pari a circa 1.500 m, con un primo tratto monocanna a doppio binario e un secondo tratto a canne separate, entrambe con sezione scatolare;
- porzione centrale, corrispondente a una galleria naturale a doppia canna a singolo binario, scavata mediante TBM-EPB (diametro della testa pari a 10 m) con lunghezze di circa 4,8 km;
- porzione Est, corrispondente a una galleria artificiale di lunghezza complessiva pari a circa 1.400 m, con un primo tratto monocanna, a doppio binario, ed un secondo tratto a canne separate con sezione scatolare.

Nella porzione realizzata con scavo in naturale ciascuna delle due gallerie presenta un diametro interno pari a 8,8 m. Il rivestimento definitivo viene realizzato in conci prefabbricati armati di spessore pari a 45 cm messi in opera direttamente a tergo dello scudo della TBM-EPB. A tergo dei conci, si provvederà infine ad iniettare malta cementizia per uno spessore di 15 cm.

Come anticipato, la galleria sottoattraversa un'infrastruttura autostradale di primaria importanza nella rete viaria dell'Italia settentrionale che deve essere mantenuta in esercizio durante le attività di costruzione. Ne consegue una particolare attenzione al tema dei cedimenti sull'asse autostradale eventualmente provocati dalla realizzazione degli scavi. Nel tratto interessato dall'interferenza, l'Autostrada A4 è composta da una doppia carreggiata con tre corsie più corsia di emergenza per senso di marcia, di larghezza complessiva pari a 32,5 m sulla piattaforma. Il tracciato autostradale è in generale in trincea e l'altezza dei muri laterali dell'autostrada è sempre inferiore a 6 m; centralmente, si trova il guardrail spartitraffico che delimita le due carreggiate.

Nel tratto in esame, l'autostrada compie una transizione tra rettilineo e un leggero dosso in corrispondenza dell'attraversamento, con raggio longitudinale molto ampio e pendenza della livelletta ridotta. La pendenza longitudinale è pari a 2,7‰ e 1,8‰ rispettivamente in corrispondenza del punto d'incrocio tra l'asse centrale della piattaforma e la canna Nord e tra l'asse centrale della piattaforma e la canna sud della galleria.

Poco a Nord del tracciato autostradale, nel tratto dell'interferenza, sono presenti anche una serie di edifici adibiti ad uso abitativo ed industriale (Figura 4).



3. Il profilo di progetto della galleria Lonato con indicazione dei tratti da realizzarsi con scatolare artificiale (verde) e del tratto di galleria naturale scavata con TBM-EPB (rosso)



4. La planimetria con ubicazione delle canne della galleria naturale Lonato e dell'Autostrada A4 nel tratto interessato dall'interferenza. Nella figura è riportata anche l'estensione del modello numerico tridimensionale

L'INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOTECNICO

A livello geologico, l'area dove si verifica l'interazione tra le due opere è costituita da una complessa sequenza di depositi di origine alluvionale, fluvioglaciale e glaciale di età Pleistocenica e Olocenica.

In particolare, risultano presenti prevalentemente depositi fluvioglaciali costituiti da ghiaie e sabbie limoso-argillose con rari trovanti di dimensione fino al metro cubo di litologia calcarea, granitica o porfirica e caratterizzati in genere da elevata alterazione. Questi depositi derivano dal progressivo smantellamento dei cordoni morenici messi in posto dal ghiacciaio del Garda, apparato laterale del ghiacciaio dell'Adige, che ad oggi vengono individuati dai rilievi collinari allungati e concentrici presenti lungo il bordo meridionale del Lago di Garda.

A livello idrogeologico, all'interno dei depositi fluvioglaciali è stata riconosciuta la presenza di un livello acquifero piuttosto continuo tra 10 e 20 m da p.c. in funzione delle ondulazioni della superficie topografica. Il livello di falda nel tempo ha mostrato oscillazioni anche considerevoli in funzione degli apporti delle precipitazioni. La permeabilità di questi depositi, definita sulla base di prove Lefranc in foro, è risultata fortemente influenzata dal contenuto di matrice fine (limi e argille) che nel complesso possono portare a variazioni consistenti fino a due ordini di grandezza. In media la permeabilità dei depositi fluvioglaciali è risultata pari a circa $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

La caratterizzazione delle unità geotecniche presenti nella zona di interesse è stata definita in fase progettuale alla luce dei risultati delle indagini in sito e in laboratorio disponibili [7]. I parametri geotecnici individuati per i depositi fluvioglaciali presenti nella zona di interazione sono riportati in Figura 5. Il comportamento è assunto di tipo elasto-plastico ideale con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, con parametri variabili con la profondità. La suddivisione adottata evidenzia un progressivo aumento del modulo elastico con la profondità a fronte di una lieve diminuzione dell'angolo di resistenza al taglio e della dilatanza.

LE SIMULAZIONI NUMERICHE DELL'INTERAZIONE TRA GALLERIA E AUTOSTRADA

Al fine di studiare l'interazione tra le costruende gallerie e la piattaforma autostradale, si è realizzato un modello numerico adottando il codice alle differenze finite FLAC3D versione 6.0 [8]. La simulazione numerica tridimensionale è stata condotta con l'obiettivo di analizzare nella maniera più approfondita possibile i cedimenti indotti in superficie in corrispondenza del sotto-atteveramento dell'Autostrada A4. Considerata la complessità del modello numerico e la numerosità delle fasi di calcolo richieste per la simulazione realistica dello scavo, è stato necessario ridurre al minimo la dimensione del modello (300x200 m) per contenere i tempi di calcolo (Figura 4).

Precedentemente alla realizzazione del modello solido vero e proprio in FLAC3D, a partire dalle informazioni disponibili, è stata realizzata una mesh a elementi triangolari della superficie topografica nell'area di interesse utilizzando il software Rhinoceros 6 [9], la quale è stata poi importata nel software di calcolo alle differenze finite in formato .stl.

La superficie topografica così importata ha consentito la definizione del limite superiore del dominio da rappresentare ai fini del calcolo meccanico.

Si è quindi proceduto a costruire la geometria del modello mediante estrusione della sezione bidimensionale compresa tra le quote $z = 109,2$ m e $z = 145,2$ m. La maglia di discretizzazione nella direzione di estrusione è caratterizzata da un passo di 5 m. Tale discretizzazione, oltre a consentire una notevole riduzione del tempo di calcolo, è funzionale alla simulazione dello scavo (sono infatti stati utilizzati avanzamenti pari a 5 m).

I bordi esterni del modello sono posti a distanza tale da non

	PROFONDITÀ DA P.C.		PESO DELL'UNITÀ DI VOLUME, γ	ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO, φ'	COESIONE, C	ANGOLO DI DILATANZA, ψ	COEFFICIENTE DI SPINTA A RIPOSO, K_0	MODULO DI DEFORMABILITÀ, E	RAPPORTO DI POISSON, ν
	DA [m]	A [m]	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[°]	[-]	[MPa]	[-]
STRATO A	0	4	19,5	42	10	7	0,57	70	0,3
STRATO B	4	8	19,5	41	0	6,8	0,54	80	0,3
STRATO C	8	15	19,5	40,5	0	6,8	0,5	150	0,3
STRATO D	15	25	19,5	40	0	6,7	0,51	180	0,3
STRATO E	> 25		19,5	39,5	0	6,6	0,45	230	0,3

5. I parametri geotecnici dei depositi fluvioglaciali

influenzare la soluzione nell'area di interesse del problema. Si sono vincolati gli spostamenti orizzontali lungo i bordi verticali esterni e gli spostamenti verticali lungo il bordo inferiore. Il bordo superiore del modello è rappresentato da un contorno libero nei movimenti orizzontali e verticali.

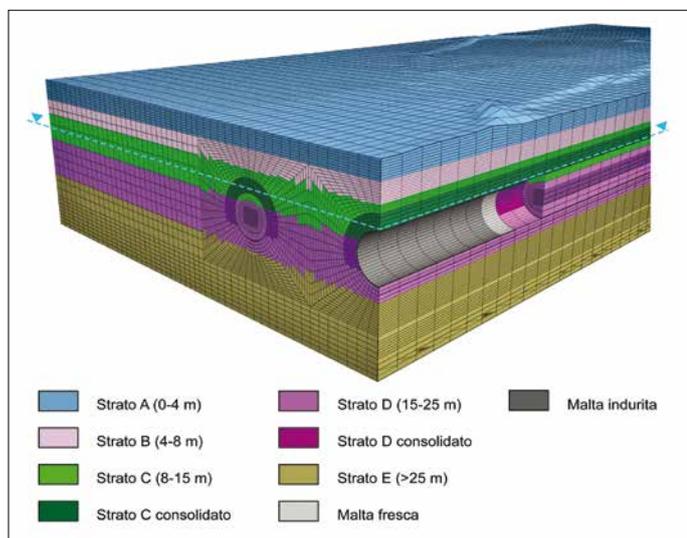
La geometria solida del modello unitamente alla stratigrafia del modello geotecnico, i cui parametri meccanici caratteristici sono riportati nella Figura 5, vengono mostrati nella Figura 6.

La falda freatica è stata considerata, in coerenza con quanto riportato nel progetto esecutivo, giacente ad una quota pari a 137,20 m s.l.m., corrispondente a una soggiacenza di 12 m. L'analisi è stata effettuata in termini di tensioni efficaci, pertanto al di sotto della falda (cioè a partire da una profondità di 12 m dal piano campagna), è stata assegnata una densità di 22 kN/m³, pari alla densità saturata del materiale.

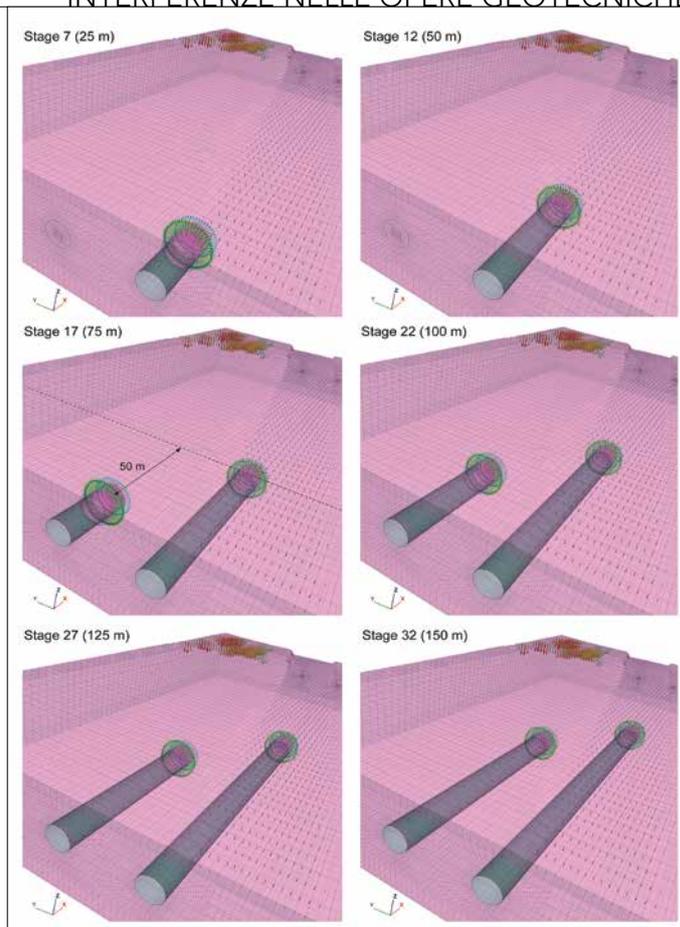
Le gallerie, il cui asse è situato ad una profondità pari a 17,68 m (canna sinistra) e 17,36 m (canna destra), ricadono all'interno dello strato C nella zona della calotta e all'interno dello strato D nella zona dei piedritti e dell'arco rovescio. Per l'intero modello è stato pertanto adottato nel calcolo delle tensioni geostatiche il coefficiente di spinta a riposo K_0 pari a 0,51, corrispondente al valore di K_0 dello strato D.

L'analisi condotta ha tenuto conto della realizzazione di un intervento di consolidamento nell'intorno di entrambe le gallerie, il quale è stato modellato mediante un miglioramento delle proprietà geotecniche dei materiali situati in un anello caratterizzato da uno spessore di 3 m a partire dall'estradosso dello scavo e da una quota superiore al piano del ferro. In particolare, in questa regione è stata assegnata una coesione di 50 kPa, mentre il modulo di Young è stato incrementato del 50% rispetto ai valori indicati in Figura 5.

Sulla superficie topografica così ottenuta, il peso degli edifici è stato simulato con l'applicazione di pressioni pari a 50 kPa, trattandosi principalmente di edifici a due piani sulle rispettive impronte. Anche il traffico veicolare sulla piattaforma autostradale è stato simulato mediante l'applicazione di una pressione pari a 9 kPa sulle rispettive carreggiate.



6. Lo spaccato del modello numerico tridimensionale con indicazione dei materiali impiegati nella simulazione



7. Un dettaglio di alcuni stage di calcolo adottati per simulare la sequenza di scavo del tunnel Lonato. Gli avanzamenti indicati tra parentesi si riferiscono alla canna destra del tunnel

Particolare attenzione è stata adottata nella simulazione di tutte le fasi di costruzione dell'opera mediante TBM-EPB articolata nel modello numerico in 62 stage di calcolo differenti. Le caratteristiche principali della TBM-EPB, come la lunghezza, il diametro e la pressione della camera di scavo, nonché lo spessore dei conchi del rivestimento e gli spessori della malta sono state riprodotte fedelmente. La Figura 7 mostra a titolo esemplificativo gli avanzamenti delle due canne della galleria e le pressioni applicate (espresse come vettori forza) per alcuni stage di calcolo (7, 12, 17, 22, 27 e 32).

I RISULTATI DEL CALCOLO E LE CONSIDERAZIONI SULL'INTERFERENZA

Il completamento della simulazione dello scavo delle due canne del tunnel nella zona che sotto-attraversa l'Autostrada A4 ha consentito di determinare la risposta tensionale e deformativa del terreno al contorno dello scavo.

La simulazione evidenzia una zona plasticizzata di spessore uniforme compreso tra 2,0 e 2,5 m nella zona dell'arco rovescio di entrambe le canne del tunnel dove non è presente il consolidamento. La zona plasticizzata si riduce progressivamente lungo i piedritti fino a scomparire del tutto in calotta. Sul fronte di scavo e nel nucleo di avanzamento del tunnel la plasticizzazione è del tutto assente. A seguito dell'installazione del rivestimento definitivo con l'avanzare dello scavo, la plasticizzazione del terreno non si estende ulteriormente e la stessa interazione tra lo scavo

delle singole canne del tunnel appare non generare particolari disturbi sulla canna adiacente.

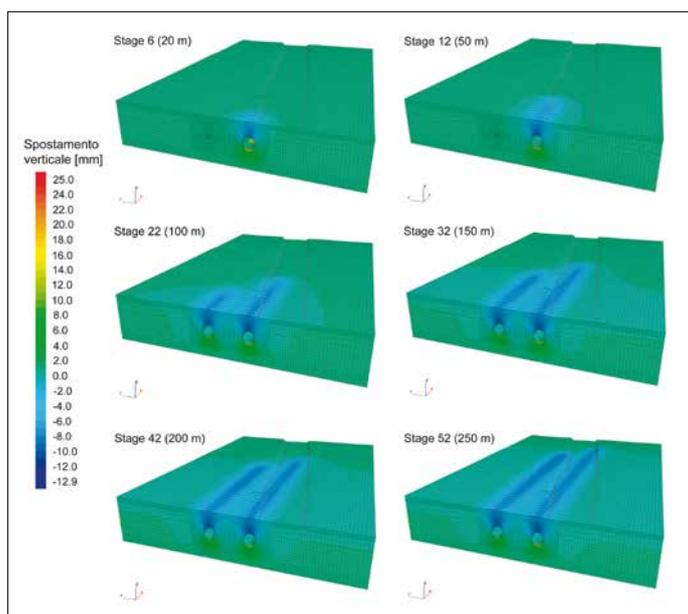
Nella Figura 8 viene mostrata l'evoluzione dei cedimenti in superficie, ovvero degli spostamenti verticali (positivi verso l'alto e negativi verso il basso) lungo la superficie topografica all'avanzare dello scavo.

Tali cedimenti, compresi tra $-2,0$ e $-8,0$ mm, risultano distribuiti in maniera leggermente asimmetrica, con un massimo in corrispondenza della canna sinistra intorno ad un avanzamento pari a $x = 155$ m.

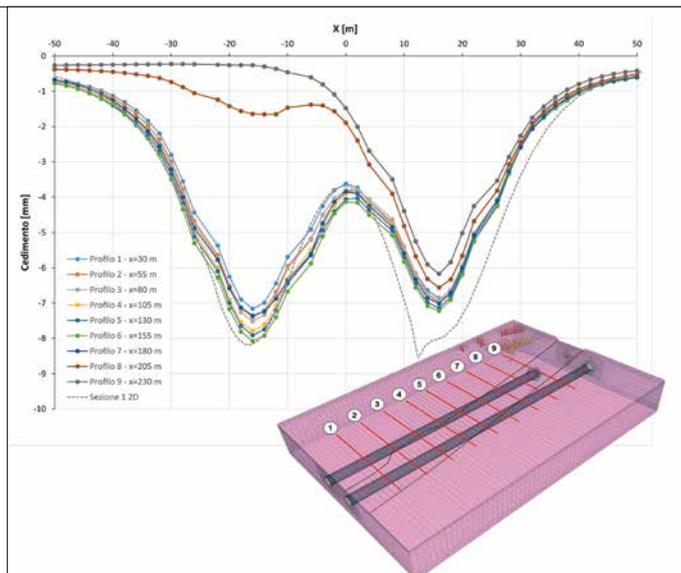
Con l'avanzare dello scavo non si notano, inoltre, significative variazioni nel pattern dei cedimenti che si mantengono sempre localizzati sulla verticale di ciascuna canna. Si deve sottolineare che tutti i cedimenti sono stati valutati in campo libero (green field) senza quindi tenere in considerazione in alcun modo gli effetti irrigidenti del complesso sottofondo e pavimentazione autostradale. Tale scelta appare ragionevolmente conservativa. Per rendere più chiaro in termini quantitativi l'effetto indotto in superficie e sull'infrastruttura autostradale dallo scavo delle due canne del tunnel Lonato, la Figura 9 illustra il profilo trasversale dei cedimenti superficiali al termine dello scavo in nove sezioni comprese tra $x = 30$ m e $x = 230$ m e distanziate di 25 m l'una dall'altra.

Per verifica e confronto si riporta nella stessa Figura 9, con linea tratteggiata, anche il profilo dei cedimenti ottenuto da una serie di analisi bidimensionali agli elementi finiti sulla medesima sezione. La sovrapposizione con i risultati del modello tridimensionale si dimostra soddisfacente. È bene notare che il modello tridimensionale denota dei cedimenti al di sopra dell'asse della canna sinistra di quasi 1 mm superiori rispetto a quelli al di sopra dell'asse della canna destra.

I risultati del modello confermano quindi che l'intervento di consolidamento del terreno lungo i piedritti e la calotta della galleria previsto nel progetto consente di minimizzare notevolmente i



8. L'evoluzione dei cedimenti in superficie all'avanzare dello scavo: gli avanzamenti riportati tra parentesi si riferiscono alla canna destra del tunnel



9. I profili trasversali dei cedimenti al termine dello scavo (Stage 52) in corrispondenza dell'intersezione tra la galleria Lonato e l'autostrada A4

cedimenti indotti sulla superficie stradale che si mantengono per l'intera area di interferenza al di sotto del centimetro.

CONCLUSIONI

Nei territori fortemente antropizzati, la progettazione e la costruzione di nuove opere in sotterraneo molto spesso deve affrontare e risolvere le interferenze causate dalla presenza di infrastrutture preesistenti la cui fruibilità all'utenza non può essere interrotta per ovvie ragioni socio-economiche. Tantomeno queste opere possono essere rilocalizzate. In questi casi risulta necessario utilizzare strumenti avanzati in grado di predire nella maniera più accurata possibile gli effetti tenso-deformativi causati dalla realizzazione delle nuove opere e il ricorso a modellazione numerica tridimensionale diventa imprescindibile.

La problematica descritta in questa nota rappresenta un esempio tipico di queste situazioni. La particolare geometria di intersezione a basso angolo tra gli assi della galleria Lonato in progetto e l'asse dell'Autostrada A4 preesistente e le basse coperture comprese tra 12 e 13 m determinano un'ampia e complessa zona di interazione che, in questo caso, è stata simulata in maniera accurata mediante l'adozione di un modello numerico tridimensionale alle differenze finite. Particolare attenzione è stata dedicata alla simulazione di ogni fase dello scavo meccanizzato con TBM-EPB così come definito nel progetto dell'opera. La simulazione è stata quindi articolata in 62 differenti fasi che rispecchiano la sequenza realizzativa dello scavo, dei consolidamenti e della messa in opera del rivestimento definitivo costituito da conci in calcestruzzo armato prefabbricati e da iniezioni di malta cementizia a tergo per campi di avanzamento pari a 5 m.

I risultati della simulazione numerica hanno consentito di ricostruire l'evoluzione completa dei cedimenti lungo la superficie topografica e lungo la piattaforma autostradale all'avanzare dello scavo. Tali cedimenti, misurati in mezz'ora sull'asse delle carreggiate dell'autostrada, sono risultati in generale sempre inferiori al centimetro e distribuiti in maniera leggermente asimmetrica in funzione dell'angolo di intersezione tra le due infrastrutture. Gli interventi di consolidamento previsti nel progetto consentono la limitazione del bacino di subsidenza e dei

Bibliografia

cedimenti nonostante le basse coperture presenti al sopra della galleria. Con l'avanzare dello scavo, non si notano infatti significative variazioni nel pattern dei cedimenti che si mantengono sempre localizzati sulla verticale di ciascuna canna.

In conclusione, l'adozione di modelli di calcolo tridimensionali in un caso relativo a un'interferenza complessa come quella mostrata in questa nota risulta necessaria per comprendere gli effetti in superficie causati dalla realizzazione di infrastrutture sotterranee. Nel caso dell'utilizzo dello scavo meccanizzato con TBM, le simulazioni tridimensionali presentano il grande vantaggio della possibilità di simulare in maniera del tutto realistica l'avanzamento della macchina, la pressione nella camera di scavo, la presenza dello scudo ed il sistema di installazione del rivestimento definitivo in conci. La corretta e realistica simulazione delle fasi di scavo determina una corretta previsione del bacino di subsidenza e dei cedimenti che possono quindi essere utilizzati sia per ottimizzare la progettazione sia nel corso delle fasi realizzative dell'opera come valori di riferimento per il metodo osservazionale. ■

⁽¹⁾ *Professore Associato del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica presso il Politecnico di Torino*

⁽²⁾ *Assegnista di Ricerca e Docente a Contratto del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica presso il Politecnico di Torino*

⁽³⁾ *Direttore tecnico di Geosolving Srl*

⁽⁴⁾ *Geologo di Geosolving Srl*

- [1]. G. Barla, F. Antolini, M. Barla, A. Perino - "Key aspects in 2D and 3D modeling for stability assessment of a high rock slope", Workshops 2013 "Failure predictions in geotechnics", Salzburg, Austria, 9 Ottobre 2013, pp. 15-18, 2013.
- [2]. D. Boldini, L. Losacco, A. Franza, S. Miraei - "Tunnelling-induced displacements and damage on framed structures: comparison between numerical models", M. Barla et al. (Eds.): IACMAG 2021, LNCE 126, pp. 148-155, 2020.
- [3]. A. Di Mariano, A. Franza, V. Limatola, A. Gens, E. Bilotta - "Building Response to Line 9 EPB Tunnelling in Barcelona. A case study", M. Barla et al. (Eds.): IACMAG 2021, LNCE 126, pp. 172-180, 2020.
- [4]. F.M. Soccodato, G. Tropeano - "Numerical analysis of a deep excavation in front of marmorkirken, Copenhagen", M. Barla et al. (Eds.): IACMAG 2021, LNCE 126, pp. 223-230, 2020.
- [5]. G. Barla, M. Barla, G. Leuzzi - "3D numerical modelling and settlement monitoring during excavation of the Metro-Torino South extension", 7th International Symposium TC28, Roma 16-18 Maggio 2011, pp. 8, 2011.
- [6]. G. Barla, A. Perino - "Interaction of large size tunnels and a landslide", 7th Colloquium Rock Mechanics, Theory and practice with "Vienna-Leopold-Müller Lecture", Vienna, 13-14 Marzo 2014.
- [7]. M. Tanzini, D. Merlini, R. Rutigliano, R. Liani, A. Anania, M. Lanfranchi - "Aspetti progettuali delle principali opere in sotterraneo della tratta AV/AC Brescia Est-Verona", Gallerie e grandi opere sotterranee, anno XLIII, n° 137, 2021.
- [8]. Itasca Consulting Group, FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Version 6.0, Minneapolis, USA, 2018.
- [9]. R. McNeel & Associates, Rhinoceros versione 6, Seattle, USA, 2018.