

SCAVO DI UNA GALLERIA IDRAULICA MEDIANTE MICRO-TBM: CONFRONTI TRA MISURE E RISULTATI DI ANALISI 3D

Francesca Buselli, Antonioluca Manno, Salvatore Miliziano
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica "Sapienza" Università di Roma
francesca.buselli@uniroma1.it, antonioluca.manno@gmail.com,
salvatore.miliziano@uniroma1.it

Antonio Zechini
Roma Metropolitane
a.zechini@romametropolitane.it

Sommario

In questa nota si presentano alcuni risultati ottenuti nella valutazione dei cedimenti indotti dallo scavo di una galleria di piccolo diametro eseguito con micro-TBM per la realizzazione del nuovo collettore fognario Taranto -Tuscolano: un'opera propedeutica alla realizzazione della Linea C della Metropolitana di Roma. Lo studio d'interazione è stato perseguito mediante l'analisi numerica tridimensionale con l'impiego di semplici legami costitutivi elasto-plastici perfetti, simulando i principali aspetti del processo costruttivo da cui dipende il comportamento tensionale e deformativo dell'ammasso in cui la galleria è realizzata: il sostegno del fronte, la geometria dello scudo, l'installazione del rivestimento ed il riempimento dello spazio anulare delimitato dal profilo di scavo e dall'estradosso del rivestimento. L'analisi è stata condotta in una tratta del tracciato caratterizzata dalla presenza di terreni di buone caratteristiche meccaniche e con riferimento alle condizioni di campo libero. Il confronto tra i profili di cedimento calcolati e quelli misurati evidenzia le discrete capacità previsionale del modello numerico messo a punto.

Introduzione

La previsione degli spostamenti indotti dalla realizzazione di una galleria è di primaria importanza soprattutto quando il contesto in cui s'inserisce l'opera è quello urbano ove la salvaguardia dei manufatti esistenti richiede le dovute attenzioni. Si tratta di un complesso problema di natura tridimensionale per simulare il quale in una modellazione piana è necessario introdurre grandi semplificazioni; nel dettaglio, la forma del profilo di subsidenza ed il volume perso, V_L , sono assunti come dati di input dipendenti dalla natura dei terreni e dalla geometria del problema, piuttosto che il risultato di una modellazione tridimensionale completa con la quale il processo di scavo è realisticamente riprodotto. Il lavoro si pone l'obiettivo di valutare le capacità previsionali del modello numerico messo a punto confrontando il profilo degli spostamenti indotto dallo scavo di un *micro-tunnel* ottenuto mediante le analisi numeriche 3D con quanto rilevato dal sistema di monitoraggio. Lo scavo riguarda la realizzazione del collettore fognario Taranto-Tuscolano in Roma, portato a termine nel maggio 2006; questa opera rientra tra quelle propedeutiche, di deviazione dei pubblici servizi necessari al completamento della Linea C della Metropolitana di Roma. Il progetto prevede la realizzazione di una galleria di 2.1 m di diametro interno mediante la tecnica dello spingitubo eseguendo lo scavo con micro-TBM. Nel seguito, dopo una

descrizione del modello geologico-geotecnico di sottosuolo impiegato, si descrive il modello numerico e si illustrano e commentano i risultati delle analisi numeriche condotte con il codice di calcolo agli elementi finiti *Plaxis 3D Tunnel*. Nel dettaglio, per la presente nota, le analisi sono state eseguite con riferimento ad una sola delle tre sezioni strumentate, quella caratterizzata dalle migliori condizioni geotecniche. Tenuto conto dei dati di monitoraggio che evidenziano l'assenza di spostamenti sugli edifici presenti nelle vicinanze dello scavo, sono state modellate le condizioni di campo libero (*free field*).

Il collettore fognario Taranto-Tuscolano

Lo spostamento del collettore fognario Taranto-Tuscolano è stato indubbiamente il più importante tra gli interventi di deviazione dei sottoservizi pubblici, propedeutici alla realizzazione della nuova Linea Metropolitana C di Roma. Il tracciato si sviluppava originariamente lungo via Taranto, attraversando Piazzale Appio, passando poi all'interno del manufatto della stazione San Giovanni-linea A, per infine procedere nel suo percorso. Per la realizzazione del nuovo corpo stazione su via La Spezia per la futura linea C, si è reso necessario operare una deviazione del collettore disegnando un percorso ad "L" che da via Taranto svolta prima su via Altamura, by-passando con un sifone il corpo stazione futuro, e poi su Viale Castrense, al termine del quale si ricongiunge con il tracciato originario a nord dell'esistente stazione San Giovanni della linea A (Figura 1). La copertura è di circa 10 m, praticamente costante lungo il tracciato. Per la realizzazione del collettore nel nuovo tratto di competenza è stata adottata la tecnica del *micro-tunneling*; questa tecnica consente di scavare e mettere in opera gli elementi della condotta limitando l'impatto sul contesto urbano, senza interruzioni del traffico stradale e garantendo tempi rapidi di esecuzione. La galleria è costituita da conci prefabbricati in c.a. di lunghezza pari a 3.0 m e spessore 20 cm collegati trasversalmente mediante giunti a tenuta. Lo scudo ha un diametro di 2.565 m ed è munito di una testa fresante che disgrega il materiale incontrato durante lo scavo; i detriti di risulta vengono poi allontanati dal fronte e portati in superficie da un circuito chiuso a circolazione d'acqua. Lo scavo meccanizzato avviene con sostegno meccanico e idraulico del fronte di scavo. L'avanzamento della macchina è guidato tramite un sistema laser. Le correzioni di traiettoria nel corso dello scavo avvengono mediante appositi martinetti idraulici capaci di modificare la giacitura della testa fresante. L'opera nel suo complesso ha richiesto la realizzazione di cinque pozzi necessari in fase esecutiva e funzionale (C1, C2, C3, S1, S2) e di due pozzi d'ispezione utili per le attività di manutenzione in fase di esercizio (Is1, Is2). La costruzione del collettore avviene su tre tratte distinte: nella prima tratta, lo scavo procede dal pozzo (C1) al pozzo sifone S1; nella seconda, lo scavo avanza lungo via Altamura dal pozzo C2, di immissione delle micro-TBM, posto all'incrocio tra via Altamura e viale Castrense, verso il pozzo sifone S2; nella terza tratta, la micro-TBM viene spinta su viale Castrense dal pozzo C2 fino al pozzo C3 ove si conclude l'opera. Per ciascuna di queste tratte, ad eccezione della prima (stante la modesta estensione), a causa delle marcate differenze stratigrafiche, è stata individuata una sezione di monitoraggio per il controllo dei cedimenti del piano campagna con livellazione geometrica di precisione; nello specifico, la sezione A per il tratto C2-S2, le sezioni B, C e D per il tratto C2-C3 (figura 1); alcuni capisaldi sono stati installati sulle strutture in superficie (edifici e mura). Il sistema di monitoraggio ha previsto anche l'installazione di 5 piezometri di Casagrande e 4 inclinometri. In corrispondenza della sezione D, oggetto di studio di questo articolo, oltre a 5 capisaldi per la livellazione topografica sono stati posizionati gli inclinometri *I3* e *I4*, posizionati a cavallo dell'asse della galleria ed il piezometro *P4* (Figura 1).

Modello geotecnico di sottosuolo

La caratterizzazione geotecnica è stata basata sulle informazioni disponibili dai profili geologici e dalle verticali d'indagine (campagne 2000, 2002, 2009). Lungo il tracciato del collettore sono presenti marcate disuniformità stratigrafiche che, come già accennato, hanno portato alla decisione di strumentare quattro diverse sezioni. Nella sezione D oggetto di questa prima fase dello studio (Figura 2), è presente una coltre superficiale di riporti, *R*, di spessore pari a circa 6 m. Al di sotto, le formazioni piroclastiche, interessate principalmente dallo scavo, presentano ottime caratteristiche meccaniche e spessore complessivo di circa 8 m; queste formazioni si presentano con un'alternanza di strati tufacei secondo una duplice successione regolare di piroclastiti, *Ta*, e tufo di consistenza litoide e semilitoide, *T1-T2*. L'unità geologica seguente, *Ar* presente a partire dalla profondità di 13.5 m, è costituita da argille sabbiose limose del Paleotevere, e presenta uno spessore tale da rendere irrilevante l'individuazione del tetto della formazione delle argille Vaticane Plioceniche, l'unità geologica di base presente in tutto il bacino romano. Il regime delle pressioni interstiziali è idrostatico con superficie libera della falda posta a 9.7 m di profondità da p.c. (28 m m.s.l.); pertanto, il fronte di scavo si presenta del tutto sotto falda sia pure con battente idraulico modesto. Volendo mettere in risalto le differenze geotecniche lungo il tracciato, si evidenzia che muovendosi dalla sezione D alla sezione B e successivamente in direzione della sezione A la coltre di riporti aumenta progressivamente fino a raggiungere uno spessore pari a 16 m mentre lo spessore delle formazioni tufacee si riduce via via fino ad annullarsi in prossimità della sezione A. In corrispondenza di quest'ultima il tetto dell'unità del Paleotevere, *Ar*, è predominato dalle alluvioni recenti del Tevere, *LSO*, caratterizzate da limi sabbiosi e sabbie limose con tracce di sostanza organica; pertanto, lo scavo della galleria ha interessato anche i riporti e le alluvioni recenti.

I risultati delle indagini geotecniche sono stati interpretati con un approccio classico di modello costitutivo elasto-plastico perfetto con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb; considerata la tecnica di scavo impiegata, la natura dei terreni ed il limitato detensionamento atteso del terreno, i moduli di rigidezza sono stati scelti facendo riferimento a livelli di deformazione medio-piccoli; al modulo di Young è stata assegnata una legge linearmente crescente con la profondità secondo un gradiente di 1 MPa/m. I valori numerici dei parametri geotecnici sono sintetizzati nella Tabella I. Maggiori dettagli a riguardo delle prove eseguite e della caratterizzazione geotecnica sono riportati in *Buselli (2009)* e *Buselli et al. (2010)*.

Analisi numerica

L'analisi numerica è stata eseguita su un modello le cui dimensioni (Figura 3) sono state scelte per limitare l'influenza degli effetti di bordo, seguendo le indicazioni suggerite da *Frazius & Potts (2005)*. In direzione longitudinale, la *mesh* è suddivisa in *slices* aventi spessore di 2 m. Al fine di ottenere una soluzione sufficientemente accurata con tempi di calcolo accettabili, si è adottato un grado d'infittimento globale della *mesh* di tipo *Coarse* con un infittimento maggiore nell'intorno del cavo, dove sono attesi i più elevati gradienti tensionali e deformativi. Sono stati impiegati elementi finiti tetraedrici a 15 nodi ed è stato assunto un valore del parametro *tolerated error* pari a 0.01.

Le condizioni di vincolo assegnate al modello prevedono che i punti sui contorni verticali siano impediti di spostarsi fuori piano, mentre i punti sul contorno inferiore non possano spostarsi in nessuna delle tre direzioni. Lo scudo della micro-TBM è stato modellato con un elemento tipo *plate* avente un peso equivalente a quello della macchina e per tenere conto della sua conicità, è stata assegnata una *contraction* capace di riprodurre la differenza di diametro tra la testa e la coda (6 cm su una lunghezza di 8 m). Il rivestimento in conci è stato modellato anch'esso con un elemento tipo *plate* trascurando la presenza dei giunti.

Considerata la reale procedura esecutiva seguita durante la costruzione, il riempimento anulare tra il profilo di scavo e l'estradosso del rivestimento (*anulus*) è stato simulato come un continuo elastico con proprietà meccaniche equivalenti a quelle di un fluido ($\gamma=21 \text{ kN/m}^3$, $E=1 \text{ MPa}$, $\nu=0.49$). Per la stabilizzazione del fronte, così come avvenuto in cantiere, è stata applicata una pressione crescente linearmente con la profondità (gradiente 10 kPa/m), tale da controbilanciare puntualmente la sola pressione interstiziale derivante dalla presenza della falda. L'avanzamento del fronte è simulato mediante la disattivazione degli elementi di *mesh* che ricadono all'interno del profilo di scavo per un spessore pari a quello delle *slices*, la traslazione in avanti dello scudo e l'attivazione sia di un nuovo elemento che modella il rivestimento sia di un nuovo elemento che modella il riempimento del *tail void*. Infine, si è modellata la prima *slice* come interamente realizzata in calcestruzzo, a replicare la parete del pozzo di spinta dello spingitubo e, subito dopo il passaggio completo dello scudo, si è modellato il riempimento dell'*anulus* in sua corrispondenza come una malta un po' indurita ($\gamma=21 \text{ kN/m}^3$, $E=3 \text{ MPa}$, $\nu=0.49$) per cercare di riprodurre gli effetti della presenza del collarino di tenuta predisposto per evitare la fuoriuscita del materiale iniettato nel *tail void*.

Illustrazione e commento dei risultati

Le misure piezometriche hanno messo in evidenza, così come assunto nel modello, che il carico idraulico permane inalterato durante l'esecuzione dello scavo. In Figura 5 si riportano i cedimenti del piano campagna in corrispondenza della sezione di controllo (sezione D) per diversi avanzamenti del fronte. I cedimenti iniziano ad essere apprezzabili quando il fronte si trova a circa due diametri dalla sezione di controllo ed aumentano progressivamente con il suo avanzamento; a partire da 6 metri di scavo successivi a tale sezione si osserva una inversione di tendenza dei cedimenti che tendono a ridursi dopo aver raggiunto il valore massimo di poco superiore ad 1 mm. Il volume perso calcolato dal profilo di cedimento ottenuto numericamente per diverse posizioni del fronte, cresce con un gradiente elevato durante l'avvio dello scavo per raggiungere un valore finale pari a circa 0.45% (Figura 7). Anche il profilo longitudinale degli spostamenti mette in evidenza tale aspetto (Figura 6). I risultati ottenuti mostrano curve di subsidenza apprezzabilmente più aperte rispetto alle evidenze sperimentali associate ad una sovrastima del campo di spostamenti rispetto a quanto rilevato dai dati di monitoraggio, di entità pari a circa il 50%. Ciò si riflette nella stima del volume perso che vale all'incirca 0.2%, se determinato sulla base delle curve di subsidenza rilevate dal sistema di monitoraggio. Non sono chiare le ragioni delle differenze tra misure e modello numerico; una possibile causa sulla quale si sta indagando, potrebbe risiedere nella sottostima della pressione esercitata al fronte derivante dall'aver trascurato l'azione meccanica esercitata dalle parti metalliche della testa fresante.

Gli spostamenti orizzontali (Figura 8), calcolati per diverse posizioni del fronte in corrispondenza delle verticali in cui sono ubicati i due inclinometri *I3* e *I4*, risultano di un ordine di grandezza minore rispetto a quanto rilevato dal sistema di monitoraggio. Tenuto conto dei valori di cedimento misurati e del discreto accordo con i risultati delle analisi numeriche, si ritiene che le misure inclinometriche non siano accurate.

Considerazioni conclusive e sviluppi futuri

Il lavoro presentato in questa nota evidenzia, in linea con quanto ottenuto in precedenti lavori, la possibilità di valutare gli effetti indotti dallo scavo meccanizzato di una galleria mediante analisi tridimensionali capaci di tener in conto il reale processo di scavo riproducendo i principali aspetti del processo costruttivo: sostegno e avanzamento del fronte, conicità dello scudo, intasamento del *tail void*, installazione dei conci di rivestimento. La forma e il profilo di subsidenza oltre al volume perso, V_L , sono il risultato dell'analisi piuttosto che i dati di

input approssimativamente scelti di una modellazione bidimensionale. Lo studio è stato condotto limitatamente alla sola tratta in cui è presente la sezione di monitoraggio, D, del nuovo tracciato del collettore fognario Taranto-Tuscolano. Al fine di completare lo studio, si prevede di sviluppare analoghe analisi 3D per le altre due tratte (sezioni di monitoraggio A e B) in corrispondenza delle quali la caratteristiche meccaniche dei terreni presenti sono più scadenti e dove i cedimenti misurati sono risultati molto più elevati. Inoltre, sono in corso analisi di sensitività per indagare sugli effetti della pressione al fronte, con l'obiettivo di verificare se le sottostima dei cedimenti calcolati possa essere imputata ad una sottostima di questo parametro.

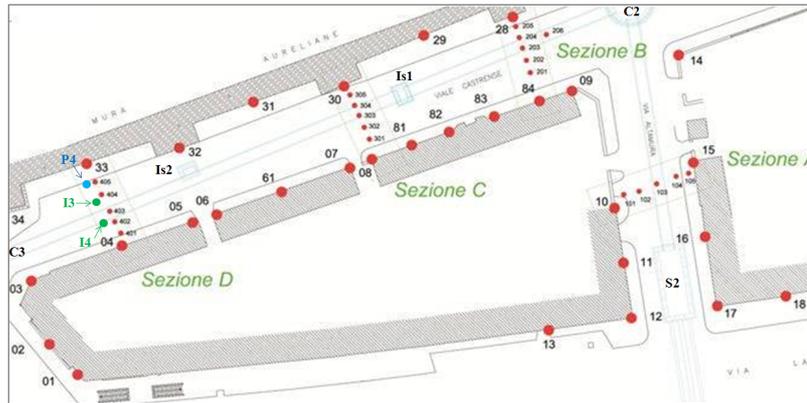


Figura 1. Nuovo tracciato del collettore fognario Taranto-Tuscolano ed ubicazione delle sezioni monitorate con i relativi capisaldi di livellazione geometrica.

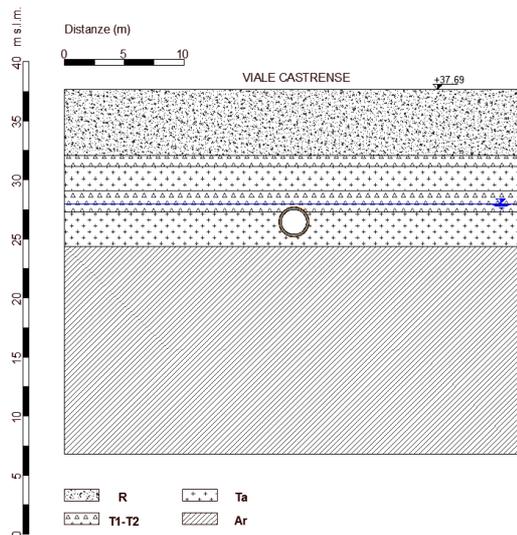


Tabella I. Parametri fisici e meccanici degli strati del modello geotecnico.

sigla	γ (kN/m^3)	c' (kPa)	φ' ($^\circ$)	E (MPa)
R	17	10	34	35
Ta	16	17,5	32	300
T1-T2	16	275	52	6000
Ar	19	30	24	55
L50	18	25	27	40

Figura 2. Sezione geotecnica di riferimento in corrispondenza della sezione di misura (D).

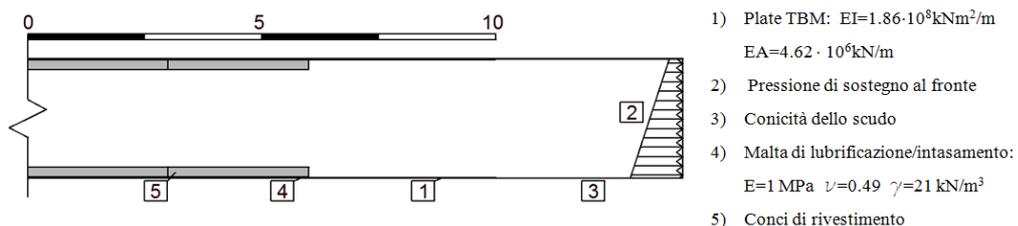


Figura 3. Schema completo dell'avanzamento di scavo.

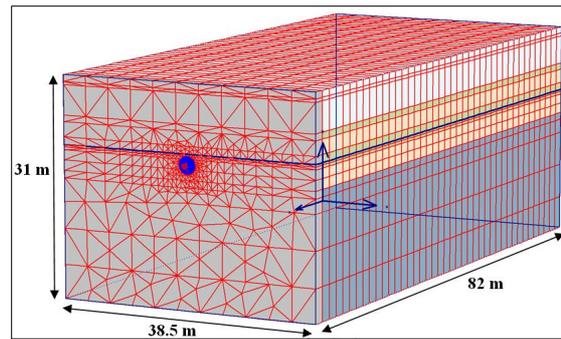


Figura 4. Mesh 3D impiegata nelle analisi numeriche.

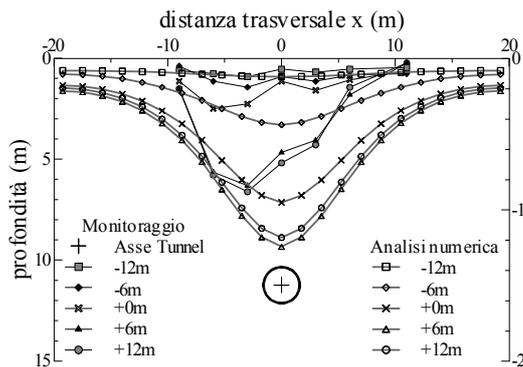


Figura 5. Profilo trasversale dei cedimenti a p.c. sulla sezione di controllo per diverse posizioni del fronte.

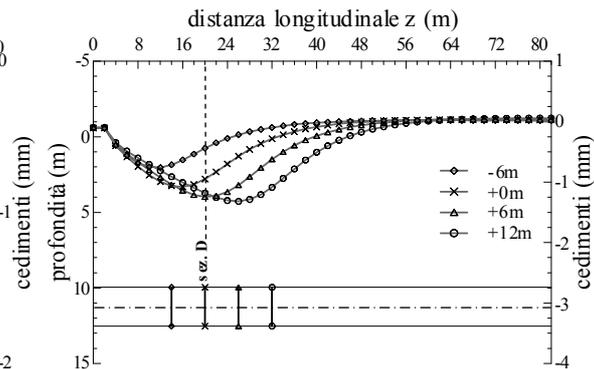


Figura 6. Profilo longitudinale dei cedimenti a p.c. per diverse posizioni del fronte.

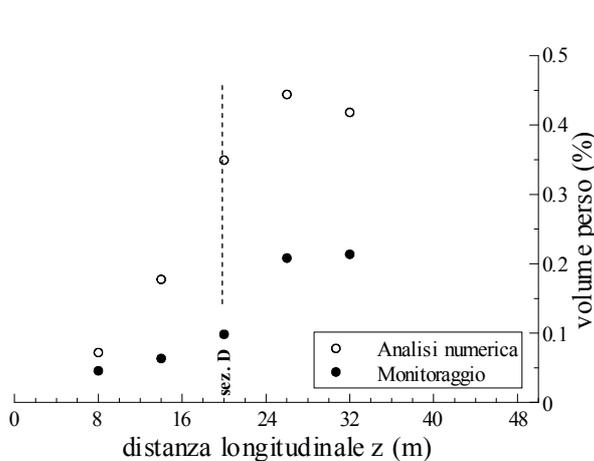


Figura 7. Volume perso per alcune posizioni del fronte calcolato in corrispondenza della sezione di controllo D.

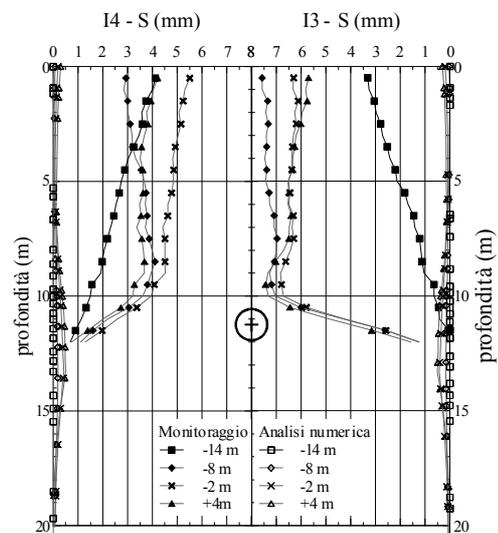


Figura 8. Confronto tra gli spostamenti orizzontali misurati e quelli ottenuti dall'analisi numerica (sezione D), per diverse posizioni del fronte.

Bibliografia

- Buselli F. (2009) – *Interazione tra lo Scavo delle Gallerie della Metro C in Roma e un Edificio nell'area della Stazione Pigneto* – Tesi di Laurea Specialistica, Aprile 2009.
- Buselli F., Logarzo A., Miliziano S. & Zechini A. (2010). *Class A prediction of the effects induced by the Metro C construction on a preexisting building, in Rome* – Proceedings of 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, NUMGE, Trondheim, Norway.
- Franzius J.N., Potts D.M. (2005). *Influence of Mesh Geometry on Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Tunnel Excavation* – International journal of geomechanics, ASCE, Settembre 2005.
- Plaxis 3D Tunnel, Version 2. *Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*.