

# Controllo delle subsidenze nello scavo in tradizionale di una galleria di grande diametro in area urbana

Alessandro Lombardi<sup>(1)</sup>, Aldo Capata<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>SGS - Studio Geotecnico Strutturale S.r.l., Roma, Italia

**ABSTRACT:** Lo scavo della Connessione Alessandrino, nodo di scambio terminale della tratta T5 della Linea C della Metropolitana di Roma, è stato realizzato in tradizionale, mediante allargo della galleria di linea costruita dalla fresa scudata TBM. Lo scavo del camerone si è sviluppato, per circa 50 metri, parallelamente alla direttrice viaria e ferroviaria leggera di via Casilina, in un contesto densamente popolato con impossibilità di interruzione o sospensione del servizio pubblico durante l'esecuzione dei lavori. Nonostante le favorevoli condizioni geotecniche e stratigrafiche (depositi piroclastici da parzialmente cementati a pseudo-litoidi), l'elevato tasso di urbanizzazione dell'area, le notevoli dimensioni dello scavo (fino a 200 m<sup>2</sup>) ed un rapporto copertura su diametro di scavo poco superiore all'unità, hanno comportato serie difficoltà nella progettazione degli interventi di mitigazione delle subsidenze in superficie. In questa memoria si espongono le modalità di scavo e di realizzazione dei rivestimenti ed i risultati conseguiti riguardo la riduzione dei cedimenti in superficie. Si descrivono nel dettaglio le fasi di getto del rivestimento che hanno consentito, mediante il completamento anticipato della struttura definitiva di calotta, di limitare al massimo il de-tensionamento dell'ammasso e, di conseguenza, gli spostamenti registrati al livello del piano campagna. Le back-analysis eseguite (modelli agli elementi finiti) hanno messo in evidenza non solo l'ottima risposta tenso-deformativa dei depositi piroclastici attraversati dallo scavo, ma anche l'efficacia degli interventi volti ad assicurare la riduzione delle deformazioni e le condizioni di sicurezza per le preesistenze e le infrastrutture viarie presenti in superficie.

## 1 Introduzione

Nell'ambito della realizzazione della Linea C della Metropolitana di Roma, la galleria di maggiore sezione di scavo è quella realizzata per la Connessione di Alessandrino. L'allargo del camerone si è sviluppato, per circa 50 metri, dalla galleria di banchina binario dispari della Stazione di Alessandrino fino al Pozzo Multifunzionale 5.6, parallelamente alla direttrice viaria e ferroviaria leggera di via Casilina (Figura 1), in un contesto densamente popolato con impossibilità di interruzione o sospensione del servizio di trasporto pubblico durante l'esecuzione dei lavori.

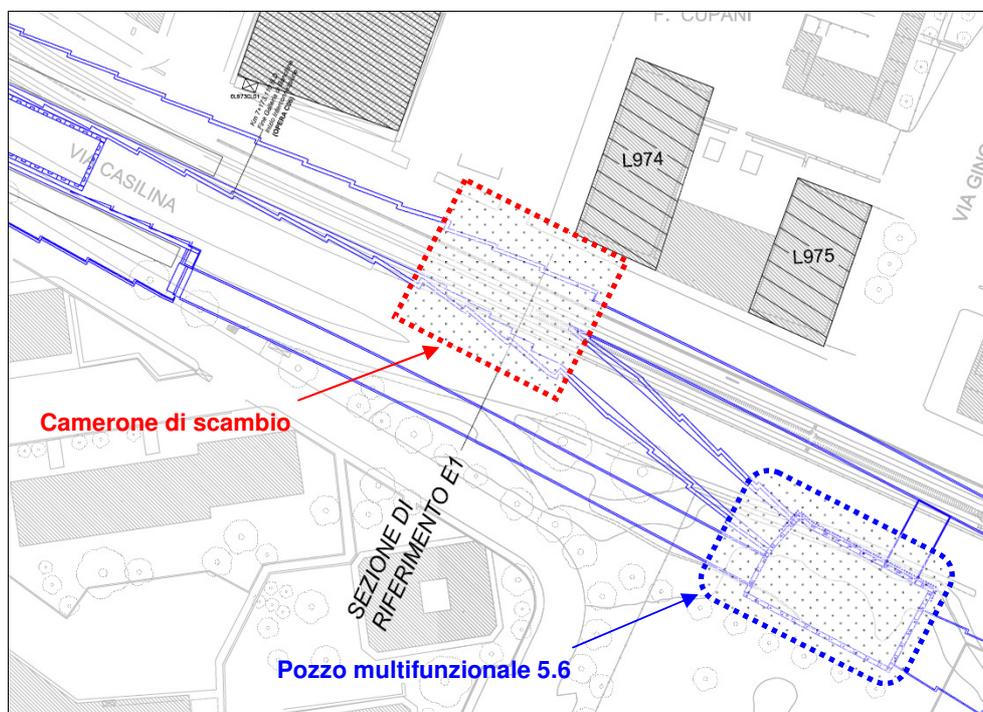
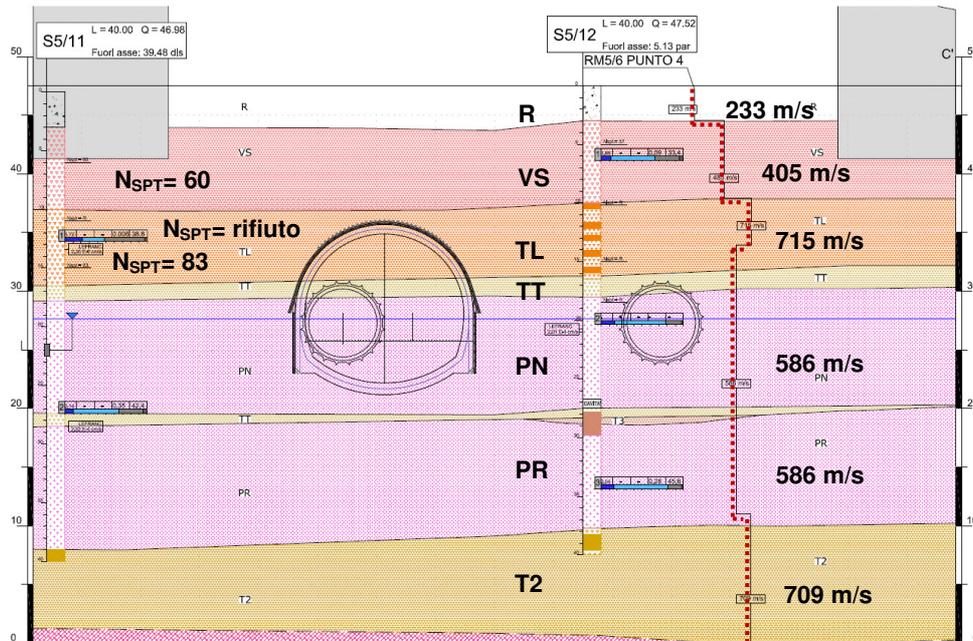


Figura 1. Planimetria di riferimento Connessione Alessandrino

## 2 Inquadramento geologico e caratterizzazione geotecnica

La successione stratigrafica (Figura 2) interessata dallo scavo del tunnel è piuttosto uniforme con alternanze di orizzonti piroclastici con diverso grado di cementazione tipiche della periferia est-sud-est della città di Roma, originati dall'attività vulcaniche dei Colli Albani. In particolare lo scavo del camerone investe principalmente i depositi superficiali che già a bassa profondità, immediatamente al di sotto dello strato dei riporti antropici, si presentano da cementati, tufi di Villa Senni (VS) a litoidi (tufi Lionati, TL). Nella metà superiore del fronte della galleria si ritrovano quindi gli orizzonti cementati mentre in quella inferiore è presente il deposito delle Pozzolane di notevole spessore, fino a profondità di circa 13 m al di sotto dell'arco rovescio.



**Figura 2. Sezione geotecnica di riferimento (in evidenza i valori di velocità delle onde di taglio misurate attraverso gli stendimenti Re.Mi. ed il numero di colpi ottenuti da verticali SPT)**

Il tufo di Villa Senni (VS) è costituito da materiali piroclastici sciolti a grana per lo più fina, cineritico scoriacea con abbondanti cristallini di leucite. La colorazione varia dal grigio al rossastro e lo spessore risulta in generale molto variabile in relazione allo sviluppo dei processi erosivi superficiali.

Il Tufo Lionato (TL) è una piroclastite di colore rossiccio, costituita da una matrice cineritico-scoriacea nella quale spiccano piccole scorie di colore rosso e piccoli cristalli di leucite alterata. E' una formazione nota e diffusa in tutta l'area romana, spesso utilizzata come materiale da costruzione; nella zona in esame presenta un grado di cementazione variabile da punto a punto ma talora anche piuttosto alto; la sua resistenza meccanica risulta, quindi, in media piuttosto alta. Il grado di cementazione risulta più elevato nelle zone in cui il materiale raggiunge spessori maggiori.

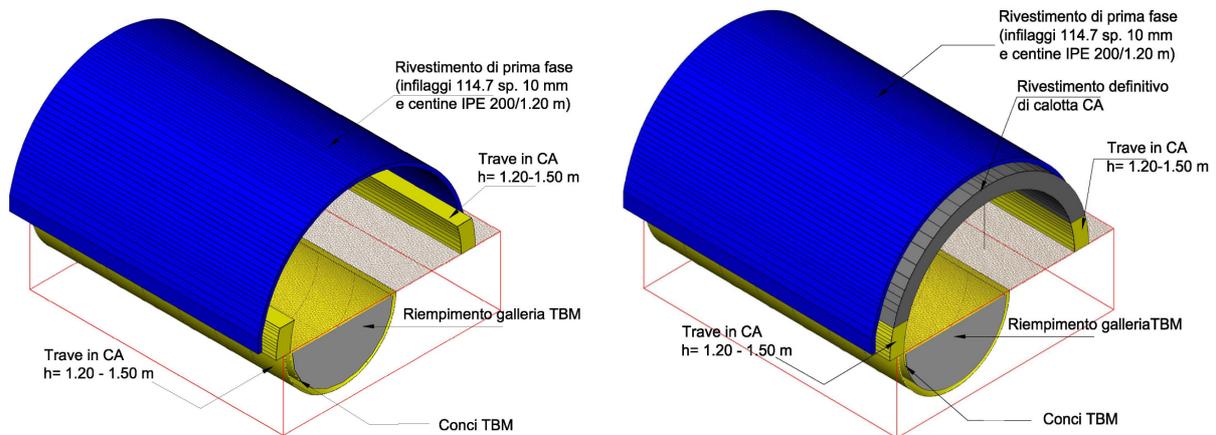
Le Pozzolane (PN-PR) sono costituite da materiale piroclastico sciolto della classica serie delle "pozzolane romane"; presenta grana piuttosto fina, con una matrice cineritico-scoriacea di colore grigio-nerastro, talora di colore debolmente violaceo, con piccole pomice e rari piccoli cristallini di leucite alterata. All'interno della serie PN-PR le "pozzolane nere" presentano in generale una matrice a grana più grossolana, è più ricco di pomice e queste hanno in media dimensioni sensibilmente più grandi. In generale il grado di addensamento è elevato e localmente e irregolarmente, porzioni più o meno grandi della formazione presentano un debole grado di cementazione.

Intercalati tra il Tufo Lionato e le Pozzolane sono presenti livelli di materiale piroclastico alterato e rimaneggiato (Tufi Terrosi, TT); dal punto di vista granulometrico sono in generale definibili come "limi argillosi e/o sabbiosi". Presentano una matrice di colore variabile da marrone scuro a giallastro, entro la quale si riconoscono talora piccole pomice ingiallite o sbiancate e cristallini di leucite e di biotite alterati.

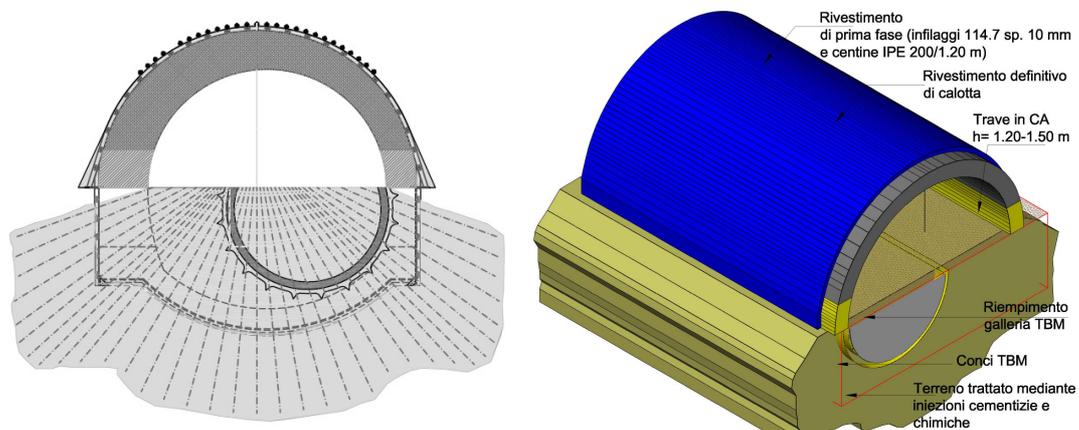
L'insieme delle prove in sito (SPT, prove "Re.Mi."= Refractor Microtremor) e di laboratorio (edometriche sulle frazioni fini e taglio diretto) ha consentito di stimare i parametri di resistenza e deformabilità riportati in Tabella 1. Tutti gli strati descritti presentano solitamente angoli di attrito



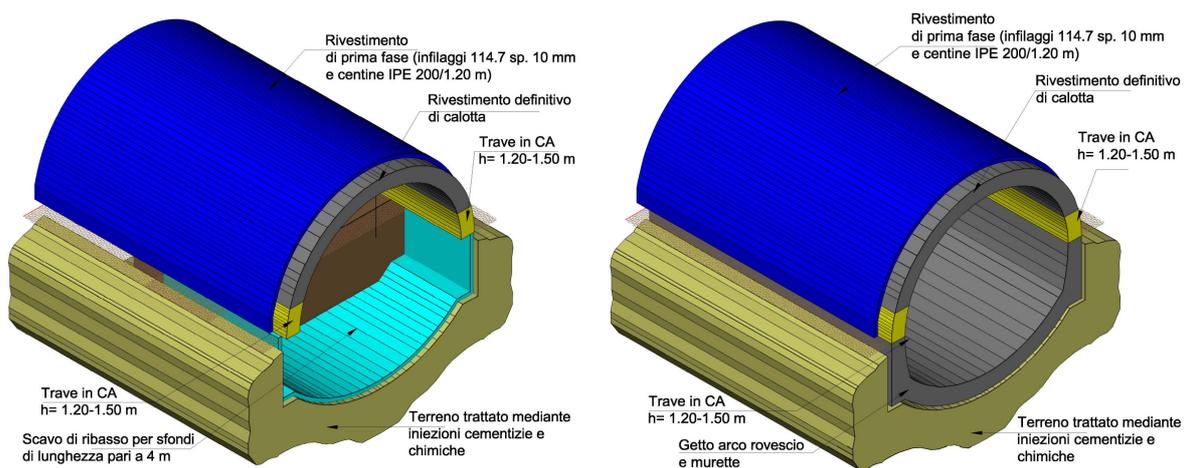
L'insieme delle fasi realizzative del tunnel ha avuto una durata di circa 9 mesi, a partire dal 14-09-2010, per concludersi il 30-06-2011. Di seguito si mostrano alcuni schemi che descrivono le principali fasi esecutive (Figure 3, 4 e 5) dello scavo della Connessione di Alessandrino.



**Figura 3. Esecuzione della trave per il sostegno della calotta (a sinistra); esecuzione del rivestimento di calotta (a destra)**



**Figura 4. Esecuzione dell'intervento di riduzione della permeabilità del terreno**



**Figura 5. scavo di ribasso fino a quota piano lavoro di 2° fase, demolizione totale galleria TBM e completamento del rivestimento provvisorio (a sinistra); completamento del secondo ribasso e getto dell' arco rovescio e delle murette**



**Figura 6. Particolare del cassero di calotta a sinistra; a destra si nota la trave a sostegno del getto di calotta)**



**Figura 7. Particolari dell'armatura di murette e dell'arco rovescio al di sotto del getto di calotta di prima fase e del getto di calotta di prima fase**

#### **4 Sistema di monitoraggio e subsidenze registrate**

Durante le operazioni di scavo tutta la Concessione, è stata attrezzata con strumenti per il monitoraggio delle deformazioni indotte a piano campagna (capisaldi sul terreno, miniprismi sulla linea ferroviaria esistente e mire ottiche sugli edifici), a quota scavo (miniprismi al contorno di scavo e barrette estensimetriche nei rivestimenti) ed all'interno del volume dell'ammasso stesso (assestimetri multibase, inclinometri e piezometri Casagrande). In figura 8 si mostra uno stralcio planimetrico con le sezioni di monitoraggio e la strumentazione installata in corrispondenza di una sezione tipo. I risultati della campagna di monitoraggio hanno evidenziato cedimenti a piano campagna piuttosto contenuti e compresi tra i 5 ed i 9,5 mm (quest'ultimo valore registrato sul caposaldo MOCXXMP77F installato sui binari della linea ferroviaria Roma-Pantano in corrispondenza della sezione di scavo massima, cfr. Figura 8). Di seguito si riporta una sezione delle subsidenze in superficie (Figura 9) con i valori di involucro per le diverse date di lettura degli strumenti; l'ampiezza della curva di subsidenza è di poco inferiore ai 40 m. In Figura 10 si riporta l'andamento degli spostamenti registrati sulla linea ferroviaria durante il periodo delle lavorazioni.

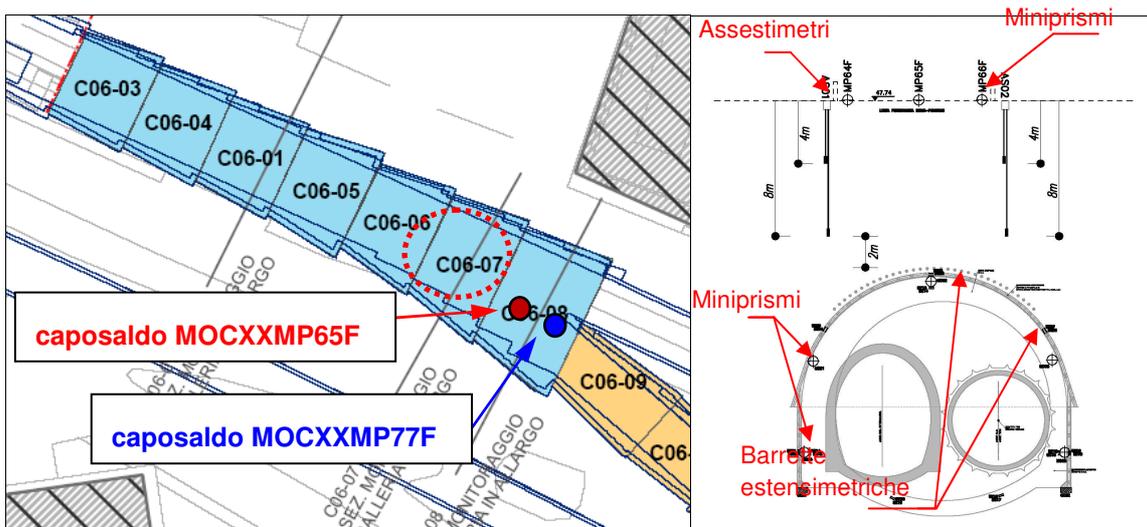


Figura 8. stralcio planimetrico con indicate le sezioni di monitoraggio su tutta la Concessione di Alessandrino (nel cerchio rosso la sezione di monitoraggio analizzata) e sezione tipo (a destra)

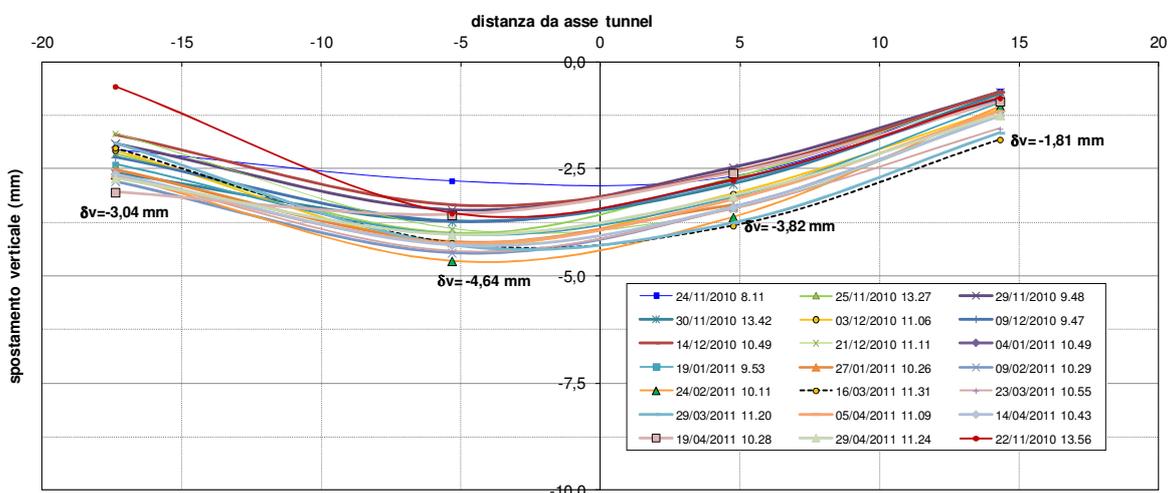


Figura 9. Spostamenti verticali misurati attraverso i capisaldi installati a piano campagna (sezione di monitoraggio C06-07, periodo di misura dal 22/11/2010 al 29/04/2011)

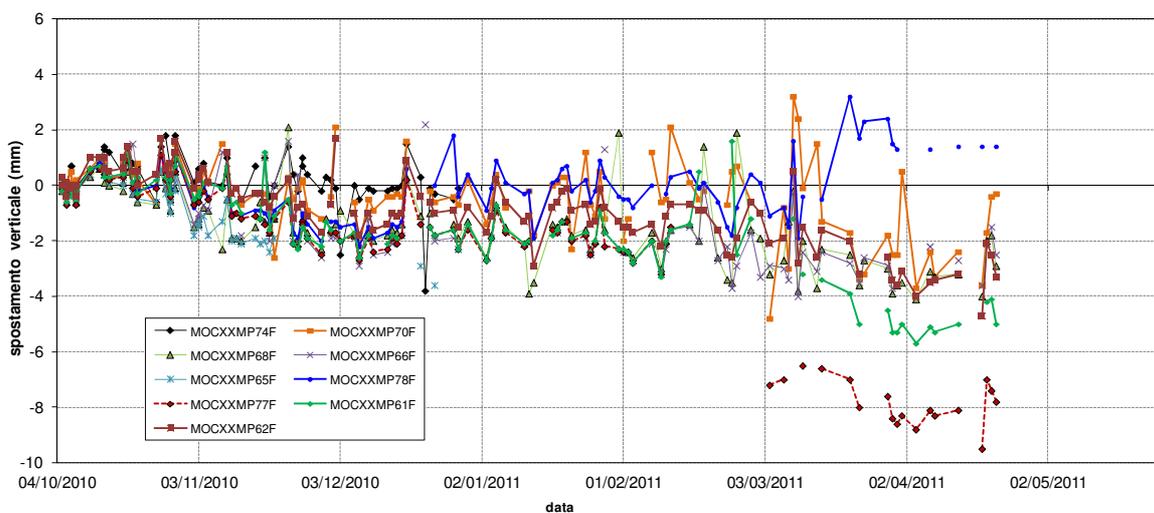


Figura 10. Spostamenti verticali misurati attraverso i capisaldi installati a piano campagna sulla linea ferroviaria Roma-Pantano

## 5 Caratteristiche della modellazione agli elementi finiti

Il codice di calcolo utilizzato (PLAXIS 2D) ha permesso di valutare il comportamento deformativo dell'insieme opera-terreno, nell'ipotesi di deformazione piana (Figura 11).

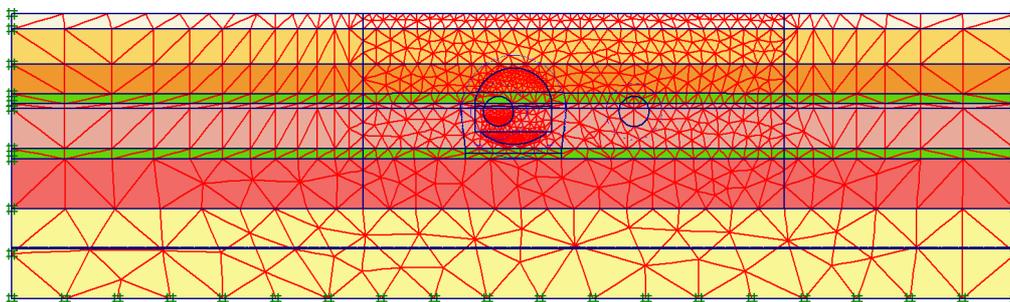


Figura 11. Reticolo di calcolo utilizzato nel modello agli elementi finiti (2080 elementi e 17289 nodi)

Trattandosi di una modellazione bidimensionale, l'“effetto fronte” ovvero il rilassamento della cavità all'aumentare della distanza dal fronte di scavo, è stato simulato attraverso il *metodo del rilascio tensionale*, applicando una pressione interna fittizia (radiale)  $p_i$  all'interno del cavo. Nel modello bidimensionale elaborato, l'effetto fronte viene ottenuto attraverso la definizione di opportuni moltiplicatori delle tensioni litostatiche (parametro  $\Sigma M_{stage}$ ) dedotti da curve caratteristiche di letteratura (Ribacchi *et al.* 1977). Per rappresentare il comportamento tenso-deformativo degli strati interessati dallo scavo è stato utilizzato un modello costitutivo avanzato tipo Hardening Soil (Schanz *et al.* 1999). L'Hardening Soil è un modello elastoplastico incrudente che riproduce in condizioni di primo carico triassiale un legame sforzi-deformazioni di tipo iperbolico. L'incrudimento è funzione sia delle deformazioni distorsionali plastiche ( $\epsilon_{ps}$ ) sia delle deformazioni volumetriche plastiche ( $\epsilon_{pv}$ ). Il criterio adottato prevede l'utilizzo di un modulo di rigidezza di primo carico, funzione dello stato tensionale e delle caratteristiche di resistenza del terreno e di un modulo di riferimento  $E_{50,ref}$ .

## 6 Risultati delle back-analysis eseguite

I risultati in termini di deformazioni e stato tensionale indotto nell'ammasso sono di seguito riportate. È importante osservare che le analisi condotte utilizzando i parametri di rigidezza riportati in tabella 1 hanno fornito sempre valori di deformazioni del cavo e a piano campagna più elevate rispetto a quelle misurate dal sistema di monitoraggio (valore massimo di 24 mm al termine dello scavo della mezza sezione e getto di calotta già realizzato). Il mancato raggiungimento di condizioni di plasticizzazione all'interno dell'ammasso (Figura 13) è stato determinato con tutta probabilità dalla presenza dello strato continuo di Tufo Lionato in calotta (Figura 12). Per tale motivo, è stata effettuata un'analisi di sensibilità volta a stimare i valori di modulo elastico, che fossero compatibili con lo stato deformativo rilevato. I valori ottenuti attraverso back-analysis del modulo elastico sono riportati in Tabella 2: come si può notare i moduli variano tra 1.4 e 8.9 volte i valori di Progetto.

Tabella 2. Parametri di rigidezza ottenuti con l'analisi di sensibilità e maggiormente rappresentativi del reale comportamento dell'ammasso

strato	$E_{50,ref}$ [MPa]	$E_{50,ref,design}$ [MPa]	amplif. [-]
R	50	35	1,4
VS	200	130	1,5
TL	2500	280	8,9
TT	160	160	1,0
PN	300	190	1,6
PR	300	190	1,6

Definiti i valori di rigidezza degli stati, le analisi sono state ripetute sostenendo lo scavo della mezza sezione attraverso due differenti tipologie di rivestimento: *analisi tipo 1*: centine IPE 200 ad interasse 1,20 m; *analisi tipo 2*: calcestruzzo armato dalla calotta fino al piano dei centri.

Nelle pagine che seguono si riporta il campo deformativo ottenuto nelle analisi di tipo 1 e 2. Esaminando i risultati si osserva come solo nel caso di scavo sostenuto dal rivestimento di calotta (*analisi tipo 2*) i valori di cedimento assoluto siano sostanzialmente in accordo con quelli misurati dai miniprismi posizionati sui binari della linea ferroviaria Roma-Pantano, mentre i valori registrati dalla sezione trasversale di monitoraggio si mantengono inferiori a quelli calcolati. A tale differenza può aver contribuito "l'effetto piastra" esercitato dal Tufo Litoide anche lungo la direzione dello scavo, comportamento questo che sicuramente non può essere colto dal modello bidimensionale. Dagli andamenti delle subsidenze (Figura 12) si può notare inoltre come l'aver simulato il getto anticipato della calotta abbia condotto ad un incremento di cedimento al piano campagna di soli 2 mm al termine dello scavo di ribasso. Per l'analisi in presenza di centine il medesimo incremento raggiunge i 10 mm.

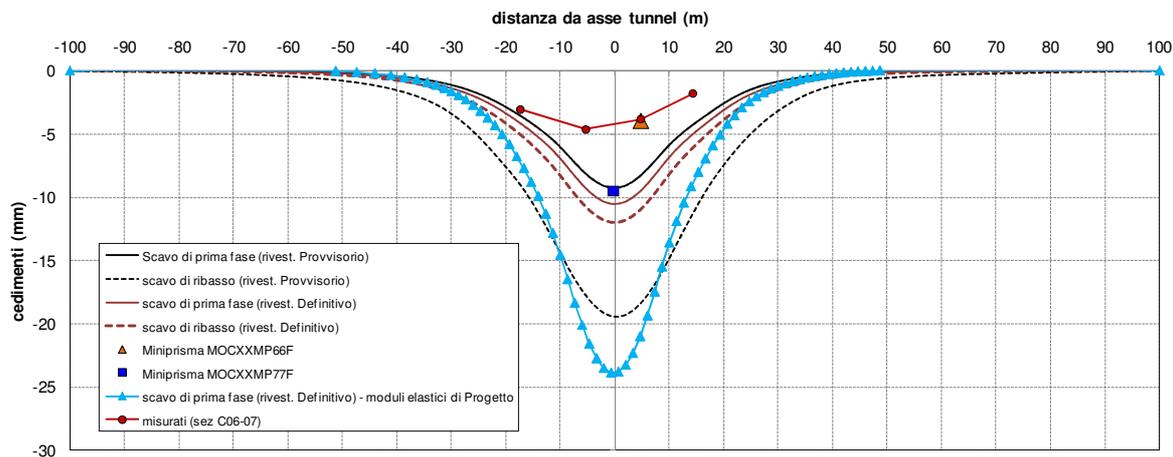


Figura 12. Confronto tra le curve di subsidenza misurate e quelle stimate attraverso i modelli agli elementi finiti

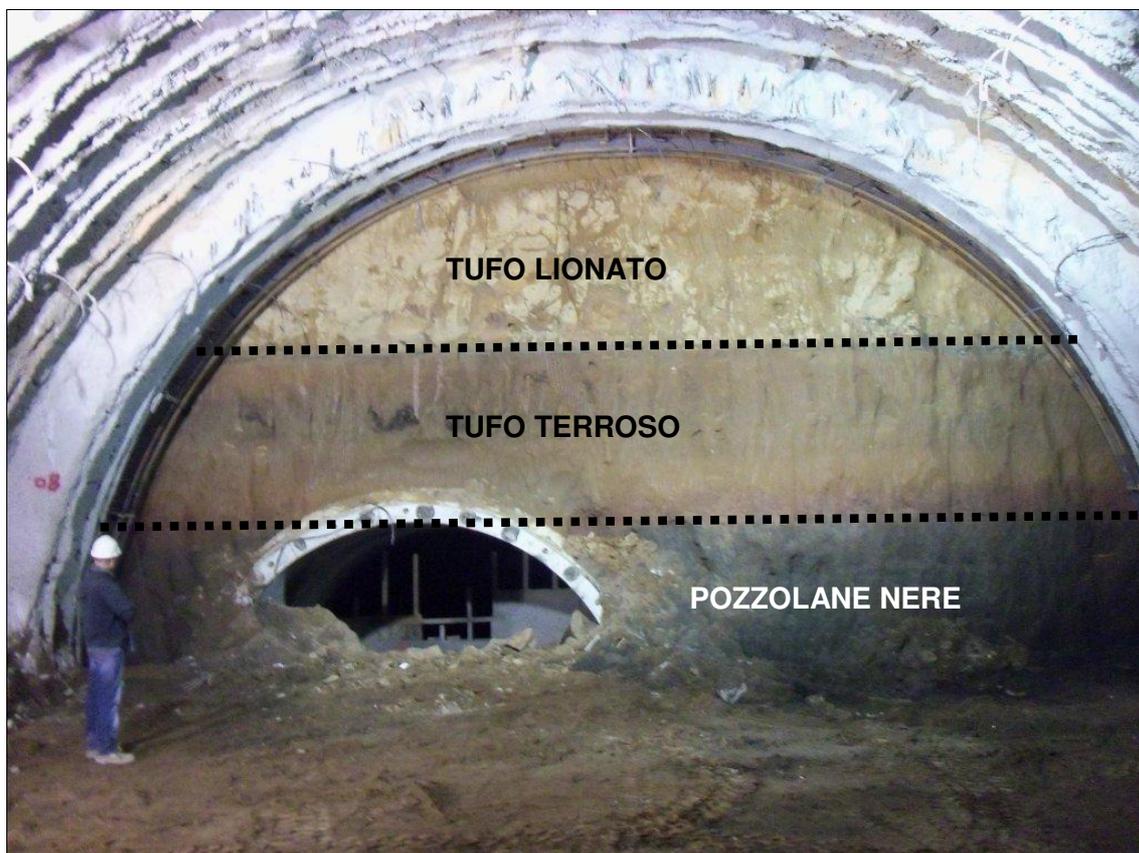


Figura 13. Immagine del fronte di scavo con in evidenza gli strati attraversati

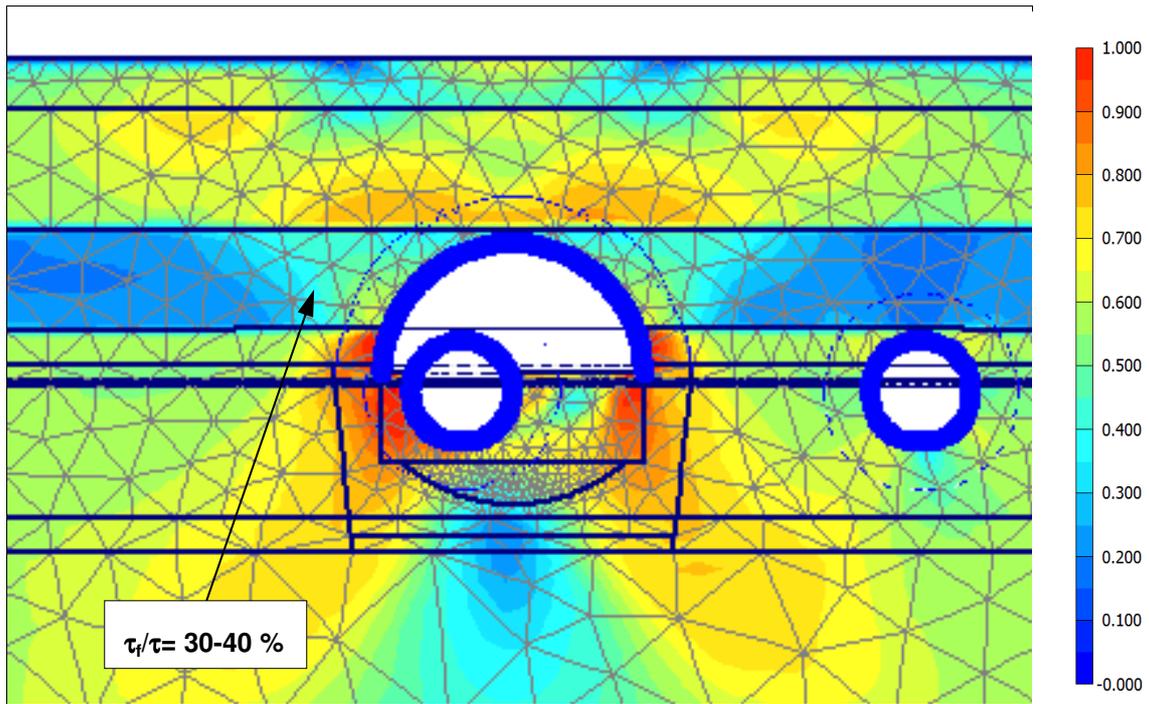


Figura 14. Contours della resistenza al taglio mobilitata (valori di rigidezza di Progetto e getto di calotta già completato)

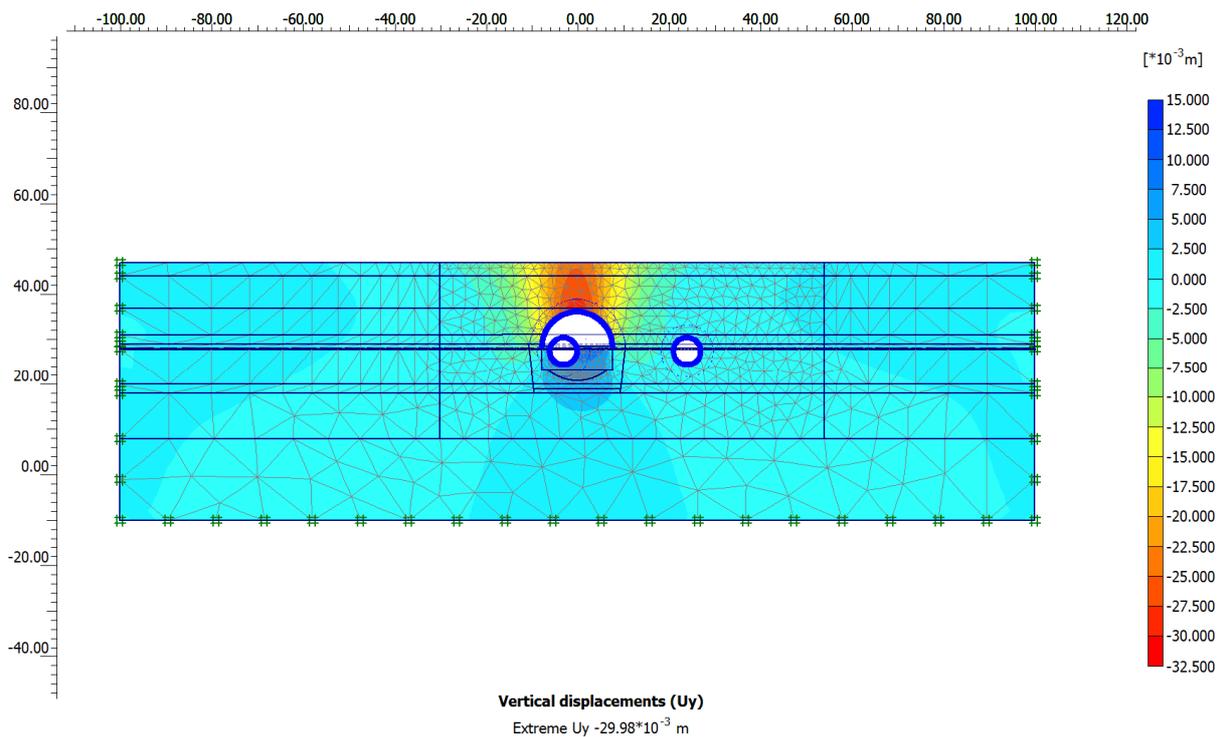
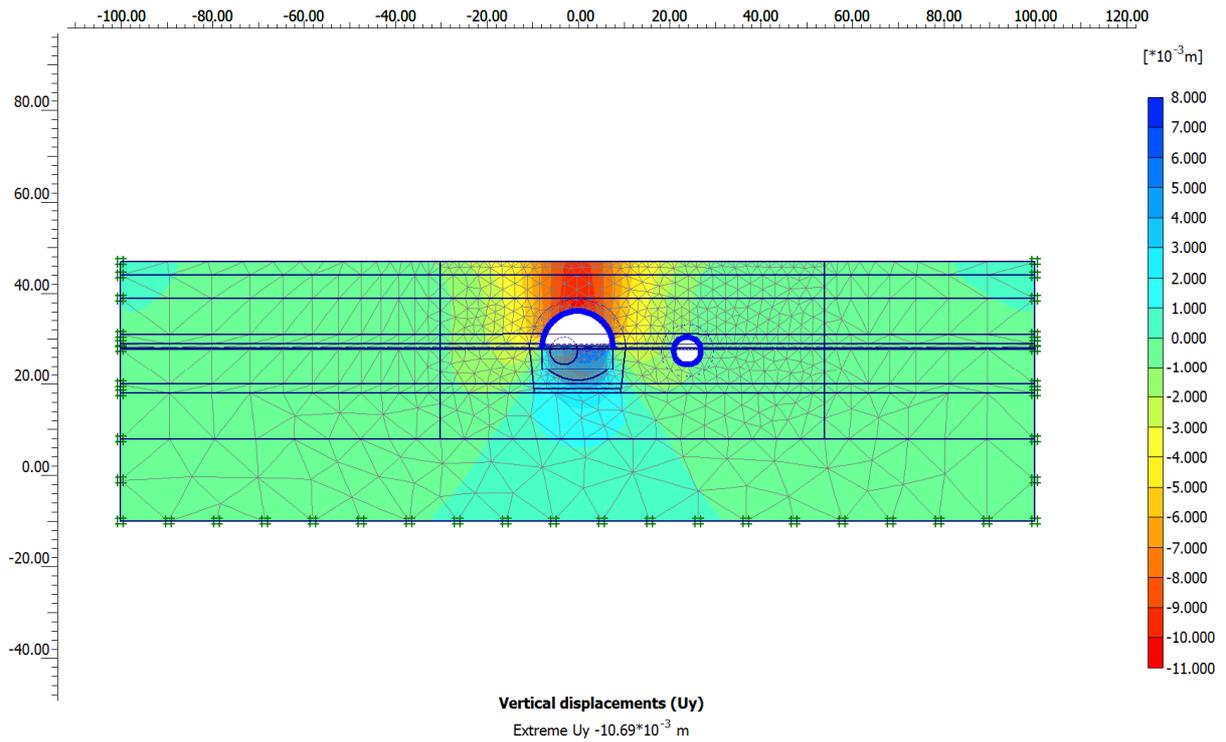
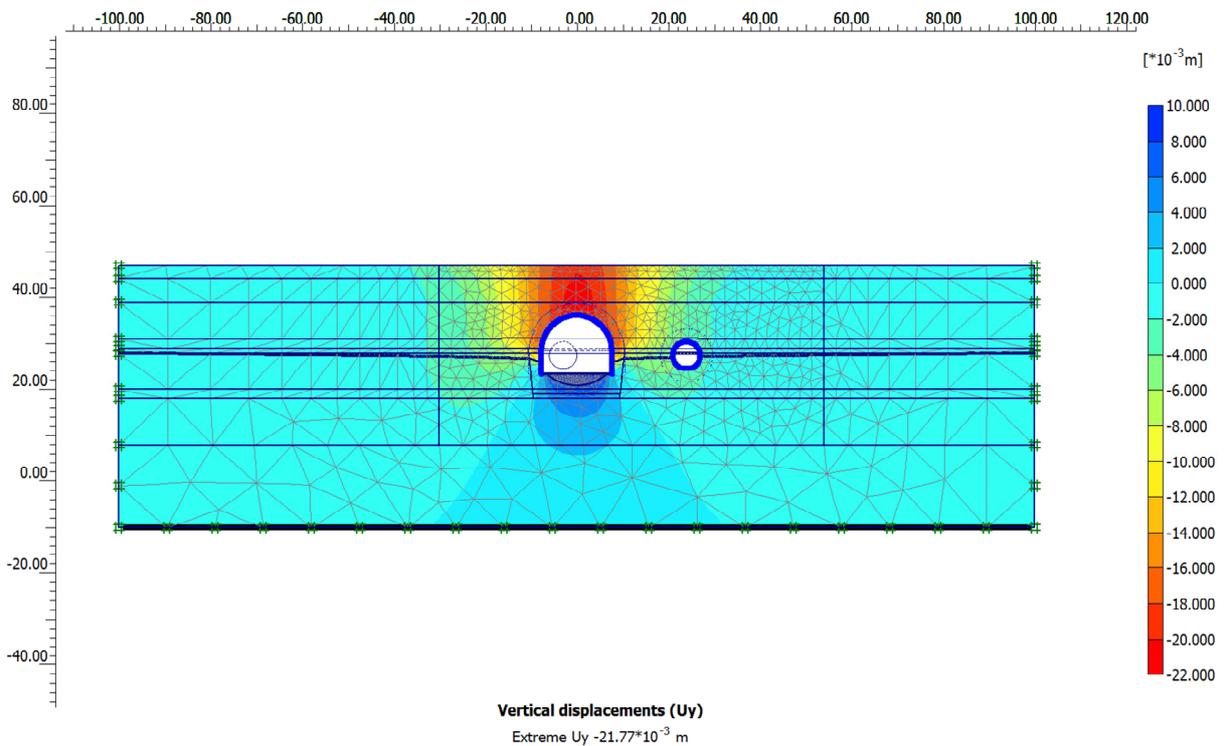


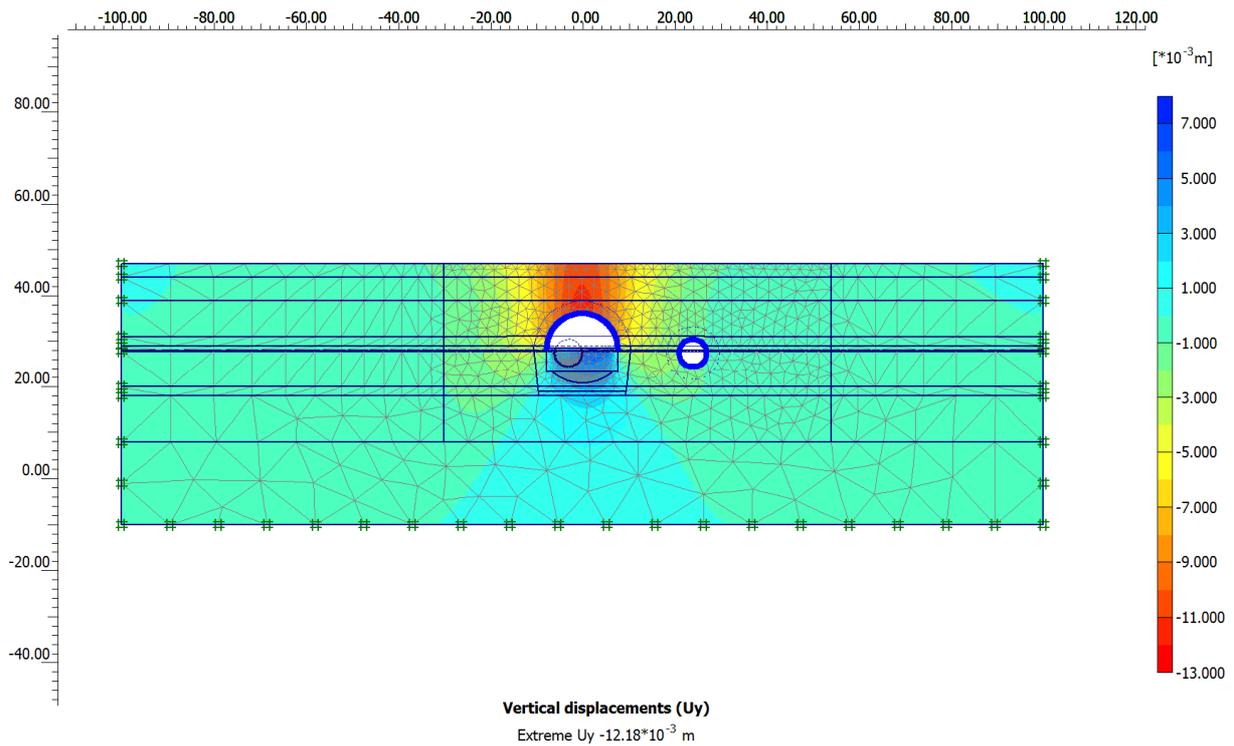
Figura 15. Contours degli spostamenti verticali al termine dello scavo di prima fase con rivestimento definitivo di calotta già completato e moduli elastici di Progetto (cedimento massimo al piano campagna= 24 mm)



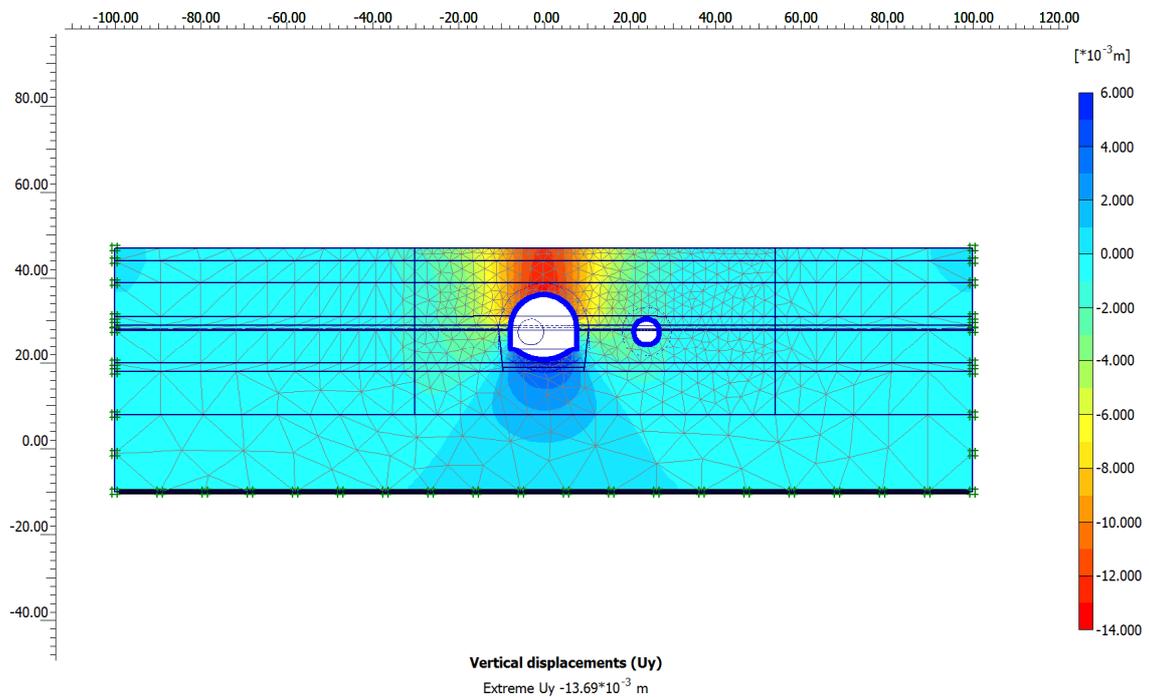
**Figura 16. Contours degli spostamenti verticali al termine dello scavo di prima fase con rivestimento provvisorio già messo in opera e moduli elastici degli strati rivalutati (cedimento massimo al piano campagna= 9 mm)**



**Figura 17. Contours degli spostamenti verticali al termine dello scavo di ribasso con rivestimento provvisorio già messo in opera e moduli elastici degli strati rivalutati (cedimento massimo al piano campagna= 19.5 mm)**



**Figura 18. Contours degli spostamenti verticali al termine dello scavo di prima fase con rivestimento definitivo di calotta già completato e moduli elastici degli strati rivalutati (cedimento massimo al piano campagna= 10.5 mm)**



**Figura 19. Contours degli spostamenti verticali al termine dello scavo di ribasso con rivestimento definitivo di calotta già completato e moduli elastici degli strati rivalutati (cedimento massimo al piano campagna= 12 mm)**

## 7 Conclusioni

Lo scavo della Connezione di Alessandrino ha rappresentato uno degli aspetti più singolari dell'intera tratta T5, considerando il contesto ambientale in cui tale opera si pone. Le modalità di scavo e di realizzazione dei rivestimenti definitivi sono state determinanti per il controllo dei cedimenti, tenuto conto della modesta copertura. Il completamento anticipato della struttura definitiva in calotta ha limitato il detensionamento dell'ammasso, contrastando con maggiore rigidità i carichi litostatici interamente gravanti sulla struttura. L'efficienza di tali accorgimenti costruttivi è evidenziata anche dai risultati delle analisi agli elementi finiti. I cedimenti registrati attraverso il sistema di monitoraggio sono risultati in generale di molto inferiori a quelli stimati dalle analisi agli elementi finiti basate sui moduli elastici di Progetto; l'incremento di rigidità degli strati ha consentito ai modelli di rappresentare con maggiore efficacia il comportamento tenso-deformativo osservato.

## 8 Ringraziamenti

Si ringraziano il settore ingegneria ed il cantiere di Metro C S.c.p.a. per la disponibilità e la collaborazione dimostrate.

## 9 Bibliografia

Peck R.B., Hanson W.E., Thornburn T.H., 1973. Foundation Engineering (2nd edition). *Wiley International Edition*, pp.: 42-43.

Ribacchi & Riccioni, 1977. Stato di sforzo e di deformazione intorno ad una galleria circolare. *Gallerie*, 1977, 5, pp 7-20.

Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. 1999. The Hardening soil model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of PLAXIS. Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 040 X.

## **Settlements control for large tunnel in urban areas: the excavation of the Alessandrino Cavern of Metro C in Rome**

**ABSTRACT:** The excavation of the Alessandrino Cavern, switching terminal node of T5 section Metro C in Rome, was built according to NATM system, widening the cross-section tunnel constructed by TBM machine. The widening of the cavern, about 50 meters long, has been performed, parallel to Casilina urban street and railway line, in a densely populated area with inability to interruption or suspension of the public services during the execution of the works. Although the mechanical properties of soils have been quite favorable (partially cemented pyroclastic deposits), the high rate of urbanization of the area, the size of the cross sections excavation (up to 200 square meters of area) and a ratio between depth/diameter of the tunnel slightly greater than one, constituted serious difficulties in the design to limit as much as possible settlements, while maintaining the activity and safety of transports. The back-analysis performed (finite elements models) have highlighted not only the good stress-strain response of pyroclastic deposits interested by the excavation, but also the effectiveness of interventions aimed at ensuring the settlements reduction and safety conditions for the pre-existing infrastructures present at the ground level.