

## Metropolitana Linea C di Roma – Tratte T4, T5 eT6: procedure progettuali di scavo e cedimenti prodotti in superficie

P.Lunardi, P.Merlanti<sup>(1)</sup>, A.Magliocchetti<sup>(1)</sup>, E.Romani<sup>(2)</sup>, A.Tarquini<sup>(3)</sup>

<sup>1</sup>Stone

<sup>2</sup>Metro C S.c.p.A.

<sup>3</sup>Roma Metropolitane S.p.A.

**ABSTRACT:** Nella progettazione di scavi in tradizionale secondo l'approccio ADECO-RS, nella fase di terapia, che segue le fasi conoscitiva e di diagnosi, si procede alla definizione degli interventi di precontenimento e contenimento del cavo e di tutti gli aspetti connessi con le cadenze di scavo (es: profondità degli sfondi e dei campi d'avanzamento). Detti interventi devono di volta in volta essere opportunamente dimensionati per garantire la stabilità degli scavi, limitando le deformazioni. In maniera del tutto equivalente, nel caso di scavi meccanizzati mediante TBM, l'ADECO-RS insegna come procedere per una corretta definizione delle procedure di avanzamento. Capita spesso di riscontrare nei progetti come queste procedure siano definite in maniera "convenzionale", facendo riferimento alle note proposte in letteratura. Tuttavia, analogamente a quanto accade per il dimensionamento degli interventi nello scavo in tradizionale, esse dovrebbero essere verificate e calibrate in funzione dello specifico contesto geotecnico ed ambientale per limitare lo sviluppo dei cedimenti indotti. A tal proposito si illustra l'esperienza maturata durante gli scavi della Linea C della Metropolitana di Roma dove lo scavo meccanizzato si è sviluppato in un contesto intensamente urbanizzato.

### 1. Introduzione

Per un avanzamento in tradizionale, il controllo della risposta deformativa del mezzo allo scavo, secondo l'approccio ADECO-RS, si consegue mediante adeguate azioni di precontenimento e contenimento del cavo (Lunardi P., 2006) che si possono produrre operando attraverso tutta una serie di elementi, i principali dei quali sono sintetizzati in Tabella 1. Per semplice confronto (Tabella 1) è possibile individuare aspetti analoghi, seppure non identici, che condizionano il controllo della risposta deformativa nello scavo meccanizzato. In tal caso gli elementi su cui è possibile intervenire riguardano direttamente l'interazione fisica terreno-TBM (*Tunnel Boring Machine*) e una corretta, seppur semplificata, valutazione di questa interazione è essenziale per poter prevedere attendibilmente i fenomeni deformativi che si produrranno a seguito dello scavo in contesti geotecnici particolarmente delicati. Per esemplificare, anche aspetti meramente tecnologici e/o geometrici quali conicità dello scudo, entità del sovrascavo, ecc., possono influenzare significativamente la risposta deformativa del terreno all'azione dello scavo ed è indispensabile tenerne debito conto in fase di terapia.

**Tabella 1. Principali elementi che influenzano la risposta tenso-deformativa (ADECO-RS)**

Scavo in tradizionale	Scavo meccanizzato
Interventi di protezione e/o rinforzo del nucleo-fronte	Pressione sul fronte e caratteristiche della testa fresante
Lunghezza sfondi	Lunghezza/conicità dello scudo/sovrascavo
Cadenze di avanzamento	Velocità di scavo /durata del ciclo
Interventi di contenimento (arco rovescio, pre-rivestimento, rivestimento)	Pressioni e volumi delle iniezioni di intasamento, anello di rivestimento

Per lo scavo in tradizionale (fig. 1) è ormai prassi consolidata studiare l'influenza dei diversi elementi con gli strumenti dell'analisi numerica 3D. Analoghe simulazioni numeriche tridimensionali

fornirebbero un prezioso contributo anche per scavi da eseguirsi mediante TBM, consentendo di individuare e ottimizzare le prescrizioni di avanzamento più appropriate per contenere opportunamente le deformazioni del terreno.

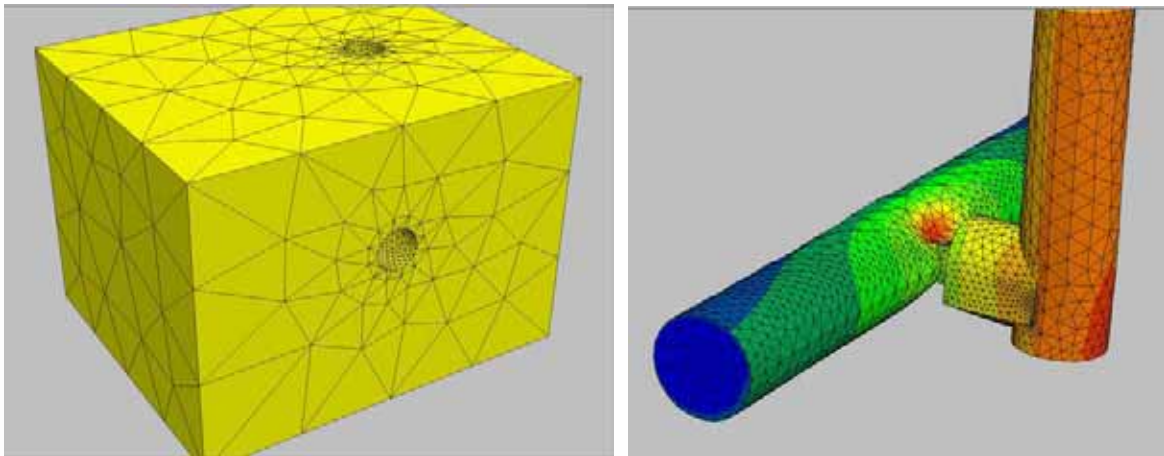


Figura 1. Analisi numeriche eseguite per i cunicoli di collegamento fra galleria TBM e pozzi di aerazione

Nella comune pratica progettuale, invece, i parametri di funzionamento della TBM sono generalmente regolati da procedure standard generalmente basate su metodi teorici di letteratura o sulle indicazioni contenute nel manuale del costruttore. Nell'ambito di tali procedure, i parametri di progetto sono costituiti dal valore della pressione al fronte, dal volume e dalla pressione del riempimento a tergo e dal peso di volume dello smarino. Nel proseguo oltre ad inquadrare il contesto geologico in cui si sono svolti i lavori per l'esecuzione della Linea C (Tratte T4+T5+T6) della metropolitana di Roma, si discuterà specificatamente delle *back analysis* effettuate per lo scavo mediante TBM delle gallerie correnti tra la Stazione San Giovanni e la Stazione Lodi. Contrariamente alle altre tratte, ove entrambe le TBM hanno avuto un comportamento molto efficiente, dando luogo a cedimenti millimetrici o del tutto trascurabili, solo nella zona in esame i cedimenti, seppur contenuti, dopo il passaggio della seconda TBM sono risultati centimetrici. Si è allora analizzato lo scavo delle due TBM in questa tratta allo scopo di evidenziare come in certi delicati contesti sia necessario approfondire la problematica delle procedure di scavo, ricorrendo a metodologie di calcolo più sofisticate e come queste metodologie possano rappresentare un valido supporto fare previsioni sul campo deformativo atteso.

## 2. Inquadramento generale

Le gallerie della Linea C, la terza rete metropolitana della città di Roma, sono state realizzate tra Dicembre 2009 e Giugno 2011 e si estendono dalla Stazione Giardinetti alla Stazione di San Giovanni per circa 19 km, 8.5 km per ogni binario. Al di sotto di una coltre più o meno continua di terreni di riporto e di terreni fluvio-colluviali, lungo l'intero tracciato, si individuano i seguenti complessi, dal più recente al più antico: Alluvioni recenti ed attuali di fondovalle (LSO), Complesso Superiore dei prodotti vulcanici dei Colli Albani, (VS, TL, PN, PR), Complesso dei "Tufo inferiori" (T1/T2, TA). Al di sotto dei terreni piroclastici è presente un complesso sedimentario fluvio-lacustre pre-vulcanico (Paleotevere 2), costituito da limi, sabbie, ghiaie ed argille variamente intercalati. Alla base di tale complesso sono presenti le Argille plioceniche (APL), consistenti, di origine marina, che raggiungono spessori dell'ordine di alcune centinaia di metri e che costituiscono il substrato di tutta l'area della città di Roma. Lungo l'intero tracciato (fig.2) fino alla Stazione Lodi, le gallerie di linea si sviluppano essenzialmente entro il complesso di terreni piroclastici dell'Apparato Vulcanico dei Colli Albani, che sono ampiamente diffusi nell'area orientale e sud-orientale della città di Roma. Nella tratta compresa tra la Stazione Lodi e la Stazione San Giovanni (fig.4), invece, le gallerie interessano i depositi alluvionali recenti della Marrana dell'Acqua Mariana e, in parte, i terreni limoso-sabbiosi della parte sommitale dei depositi fluvio-lacustri pleistocenici che costituiscono il substrato dei depositi vulcanici, con un importante strato di riporti soprastante che raggiunge anche i 15-18 m di spessore. Data la natura dei terreni si è scelto per lo scavo meccanizzato una TBM con scudo "EPBS" il cui funzionamento si basa sulla azione di spinta esercitata dalla testa della macchina sul materiale scavato, mantenuto all'interno della camera di scavo ed estratto in maniera controllata attraverso un trasportatore a coclea. Una volta raggiunta la pressione interna di equilibrio, lo scavo avviene a volume costante, mantenendo uguali i volumi scavati e i volumi estratti dalla coclea. Lo scavo delle 2

gallerie di linea è stato eseguito con 4 TBM aventi un diametro della testa fresante di 6.70m (conicità radiale di 2cm circa) ed una lunghezza complessiva di circa 10m.

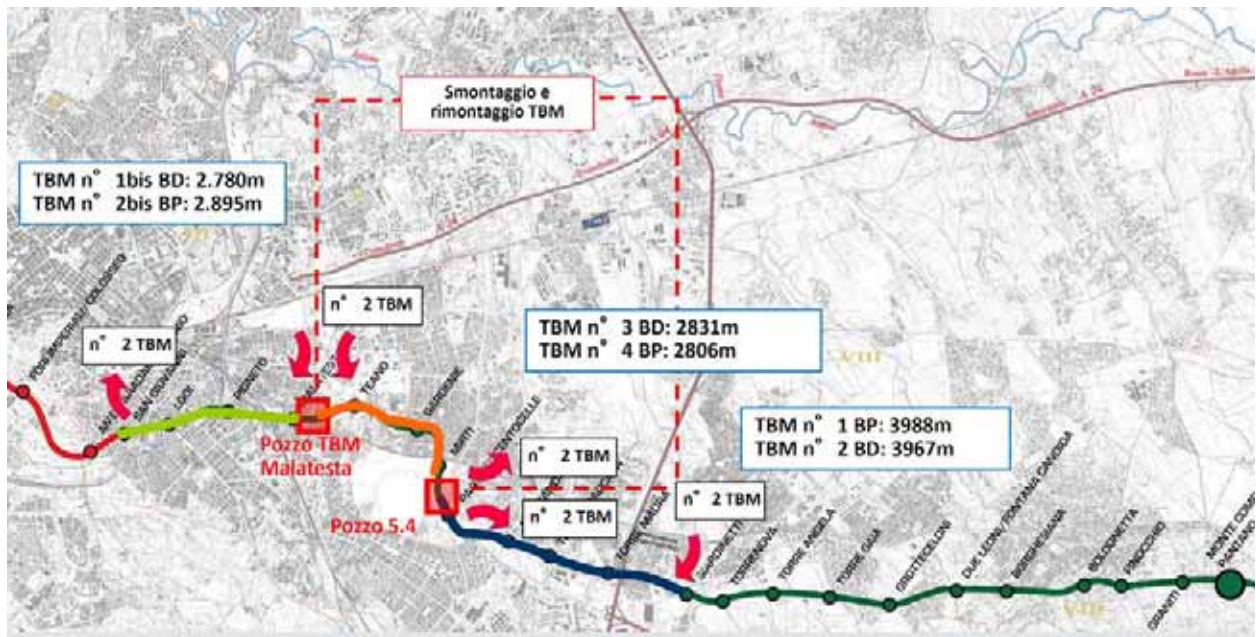


Figura 2. Tracciato della linea C da Pantano fino a San Giovanni (a sinistra)



Figura 3. Pozzo 5.4 - estrazione TBM

La pressione di confinamento esercitata al fronte per bilanciare la pressione dei terreni e dell'acqua viene controllata e modulata coordinando la spinta della macchina in avanzamento e la velocità di estrazione della coclea. Come riassunto nella figura 2, le prime 2 TBM sono state calate in corrispondenza del pozzo di introduzione degli scudi presso la Stazione Giardinetti e, dopo aver scavato circa 4 km di galleria, sono state estratte in corrispondenza del Pozzo 5.4 (fig.3). Successivamente, le altre 2 TBM sono state calate nel Pozzo TBM Malatesta e hanno realizzato circa 2.80 km di galleria, anch'esse fino al Pozzo 5.4. Infine, le prime 2 TBM sono state nuovamente calate nel Pozzo TBM Malatesta per realizzare gli ultimi 2.80 km di linea, fino alla Stazione San Giovanni.

### 3. Tratta T4 da Stazione Lodi a Stazione San Giovanni

Nella tratta in esame le TBM S409 (BD - binario dispari) ed S410 (BP – binario pari), partite da Pozzo TBM Malatesta, hanno attraversato un contesto geologico in falda piuttosto difficile (fig.4) caratterizzato dalla scomparsa del tetto tufaceo (TA,T1,T2) e dalla presenza di un pacchetto considerevole (15 m) di terreni di riporto (R) presenti al di sopra dei terreni alluvionali argillosi costituiti dalle formazioni ST ed AR.

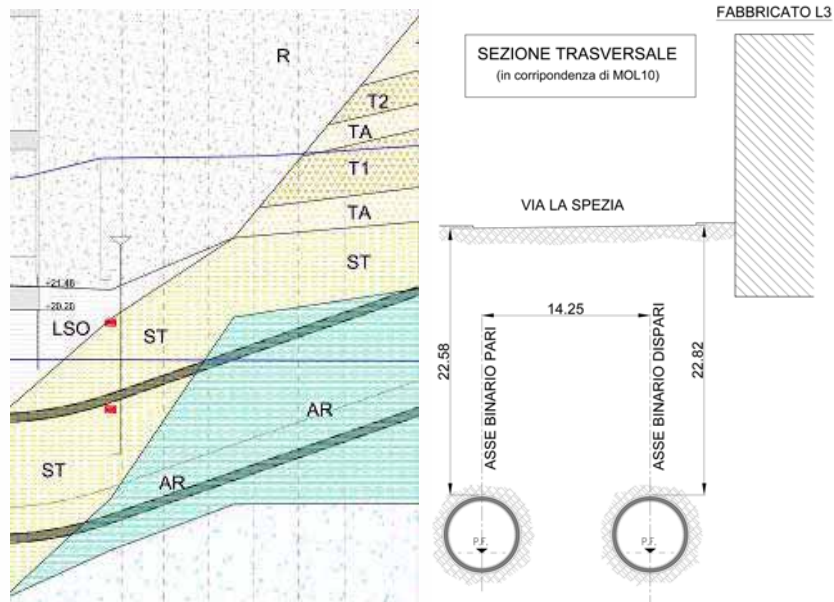


Figura 4. Tratta San Giovanni –Lodi - Sezione tipo e profilo geologico

Il passaggio litologico ed il deciso decadimento delle caratteristiche geotecniche, riferibili alle formazioni ST ed AR è testimoniato dalla netta diminuzione in questa tratta del valore dell'energia specifica, dovuto alla coppia ed alla spinta applicata dalle TBM (fig. 5, tra progressiva 0 e 400) che passa da valori molto alti nei tufi a valori medi di 18 MJ/m<sup>3</sup> nelle alluvioni.

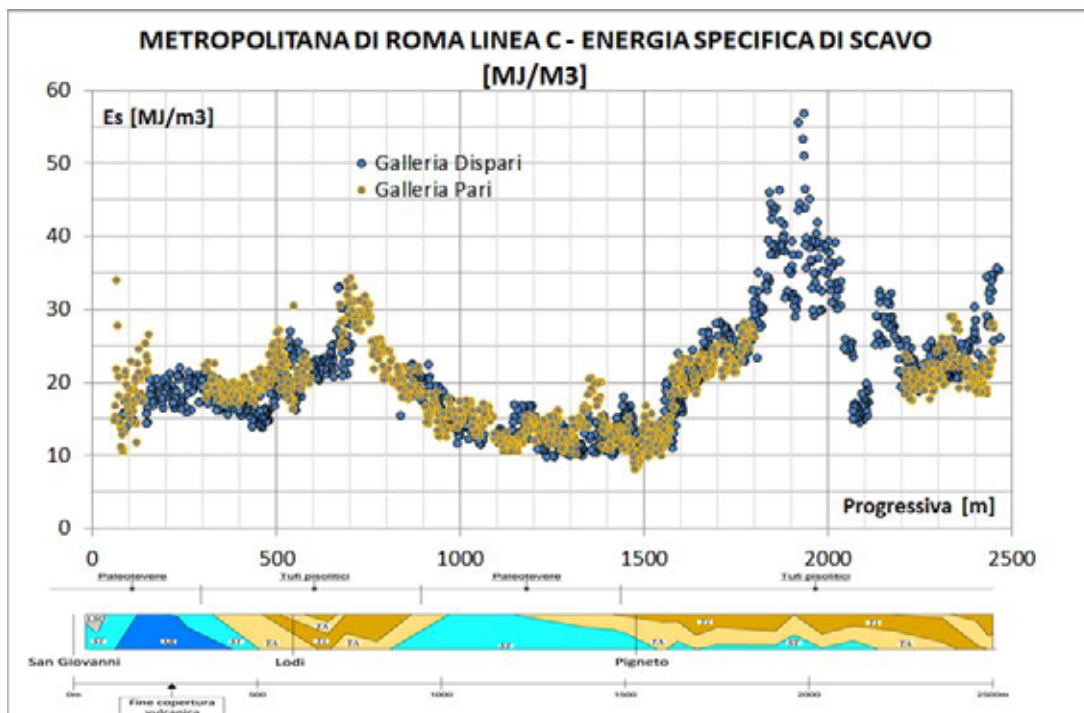


Figura 5. Energia specifica di scavo e litologie della tratta T4

### 3.1 Cedimenti registrati

La sezione di monitoraggio MOL10, costituita da capisaldi superficiali, è stata sotto attraversata dalla TBMS409 il 22/05/2011 e dalla TBMS410 a seguire il 02/06/2011. Le due TBM hanno terminato lo scavo, entrando a pieno nel pozzo antistante della Stazione San Giovanni, distante circa 90m dalla MOL10, rispettivamente il 29/05/2011 e il 08/06/2011. Lo scavo della prima TBM S409 (BD) ha prodotto nella MOL10 dei cedimenti in linea con le previsioni progettuali (fig.6 e fig. 7) raggiungendo un massimo di -6mm (Vp - volume perso - BD=0.45%) quando la TBM ha raggiunto la Stazione a grande distanza. Lo scavo della seconda TBM S410 ha prodotto invece dei cedimenti maggiori (fig. 6 e fig. 7) raggiungendo -16mm quando la TBM è entrata nella Stazione, stabilizzatisi 6 mesi dopo (Settembre 2011), allorquando il cedimento massimo ha raggiunto -23mm.

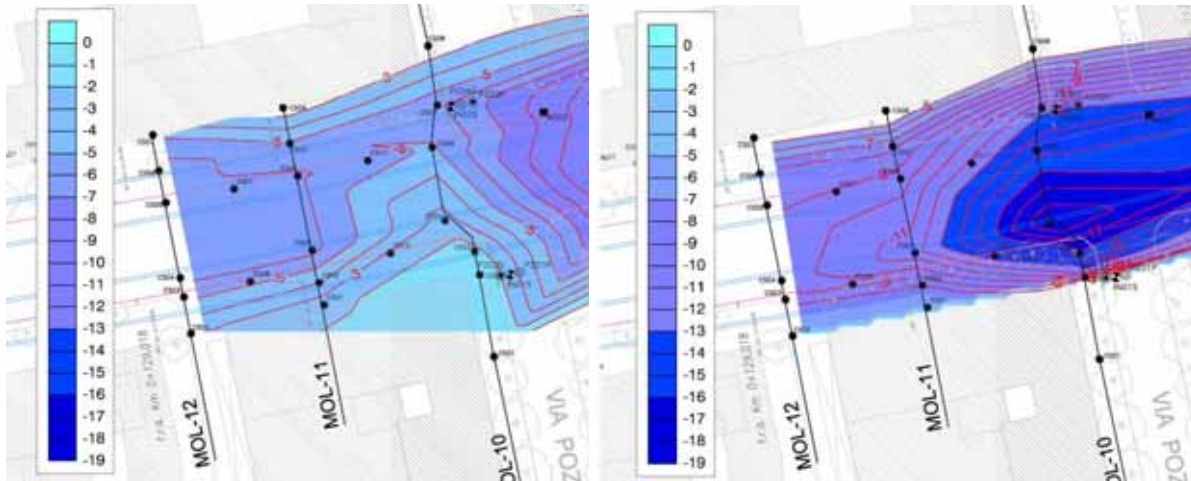


Figura 6. Cedimenti (mm) al passaggio della TBMS409 - BD (sinistra) e della TBMS410- BP (destra)

Le previsioni di progetto sono invece rappresentate in Fig.19.

L'andamento longitudinale dei cedimenti (fig.7) al momento del passaggio della seconda TBMS410 fa supporre che il volume perso si possa essere generato soprattutto al contorno dello scudo, dopo il passaggio del fronte ma in questi terreni la risposta non è istantanea e quindi è difficile isolare i vari contributi.

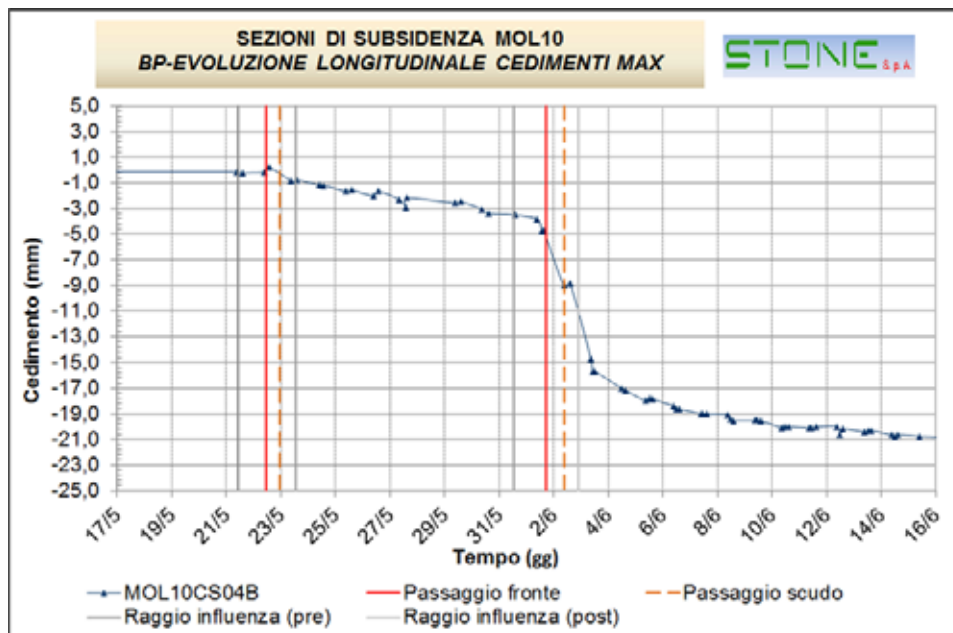


Figura 7. Sezione MOL10 – Andamento longitudinale dei cedimenti massimi a piano campagna

### 3.2 Analisi dei dati macchina

In questo contesto (tab.3) le prescrizioni di progetto prevedevano i parametri in tabella 2, da mantenere regolari e costanti nelle fasi di spinta e montaggio.

Tabella 2. Parametri progettuali di spinta	-	valori di letteratura
Pressione al fronte	2.8 ÷ 3.0 bar	3.0(K0)+2.5(Ka)+1.5(Kovari)
Pressione a tergo	3.5 ÷ 3.9 bar	Pressione al fronte + 0.5 bar
Volume di miscela iniezioni	4.46 m <sup>3</sup>	
Peso smarino	92 t	

L'analisi dei dati "globali" (fig. 8) ha evidenziato alcune differenze di comportamento fra le macchine; lo scavo della seconda è stato meno regolare e caratterizzato da alcuni stop. A livello "globale" un aspetto da evidenziare è la durata (spinta + montaggio anello + stop) maggiore per la TBMS410 con picchi temporali dovuti alla ridotta velocità di spinta, ai tempi maggiori di montaggio dell'anello ed a stop dovuti a problemi meccanici. La durata totale del ciclo ha raggiunto anche 6h contro una media di 1.5h della TBM S409. La pressione media al fronte è risultata al limite inferiore del range di progetto, comunque superiore sia al valore di Kovari che a quello di spinta attiva. La pressione media delle iniezioni a tergo dei conci è risultata inferiore ai valori di progetto. Il volume di miscela iniettata a tergo dei conci ha evidenziato valori superiori (5mc per la TBMS409, +15%, e 6 m<sup>3</sup> per la TBMS410, +34%) a quelli di progetto (4.47 m<sup>3</sup>). Tale fenomeno fa pensare o ad un "corto circuito" fra la coda ed il fronte oppure un leggero sovrascavo (teoricamente ΔR~4.5 cm per la TBMS410 e ΔR~2.5 cm per la TBMS409), trascurando invece l'ipotesi di un assorbimento delle miscele da parte del terreno, vista la natura dei litotipi in esame. Analizzando il comportamento "locale", alla scala della singola spinta, la differenza è più evidente (fig. 6), con i parametri della TBMS410 caratterizzati da un andamento meno regolare, inferiori alle attese e poco costanti durante la fase di stop o montaggio dell'anello.

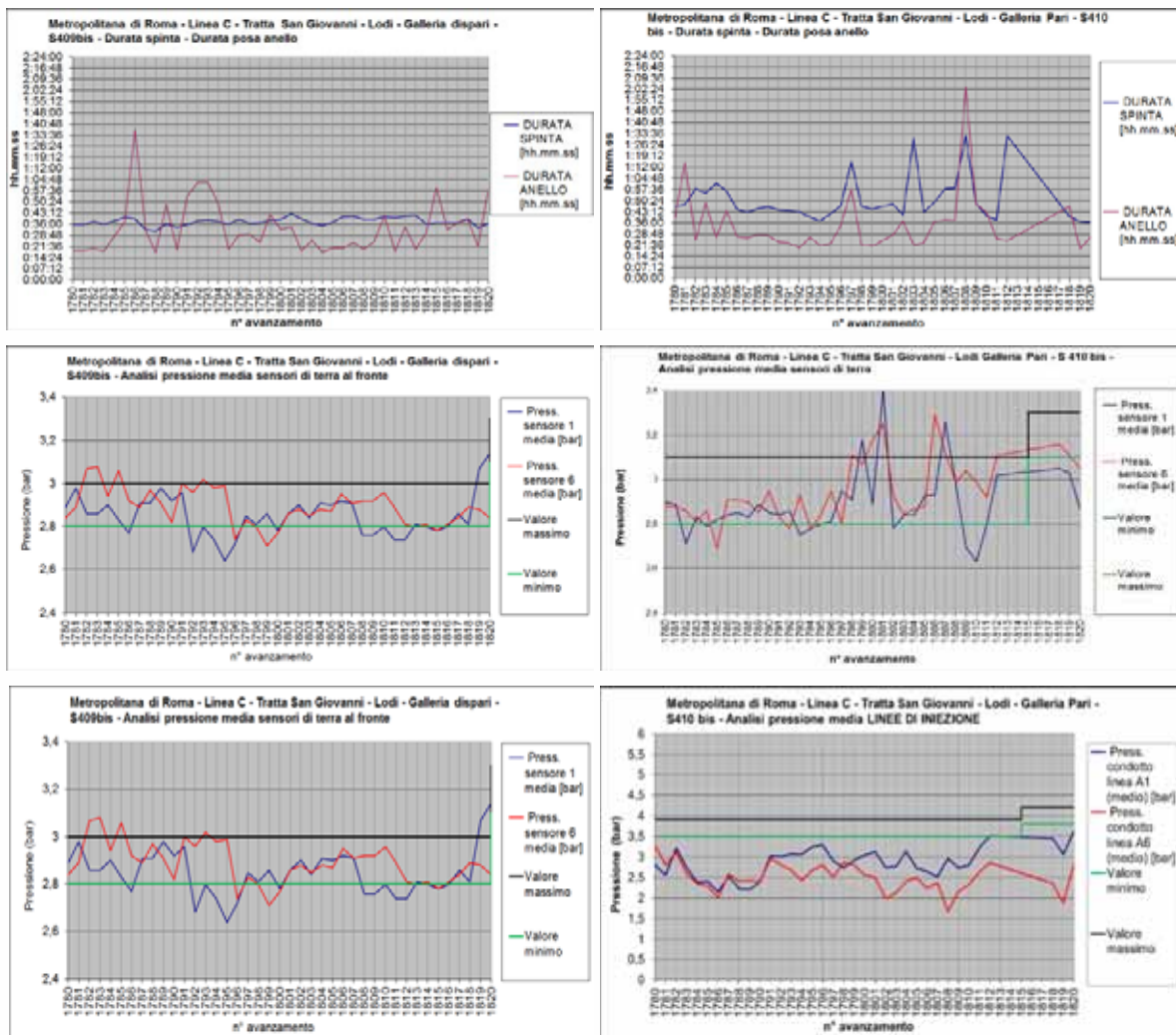


Figura 8 . Dati macchina (a sinistra i dati della TBMS409 a destra quelli della TBMS410)

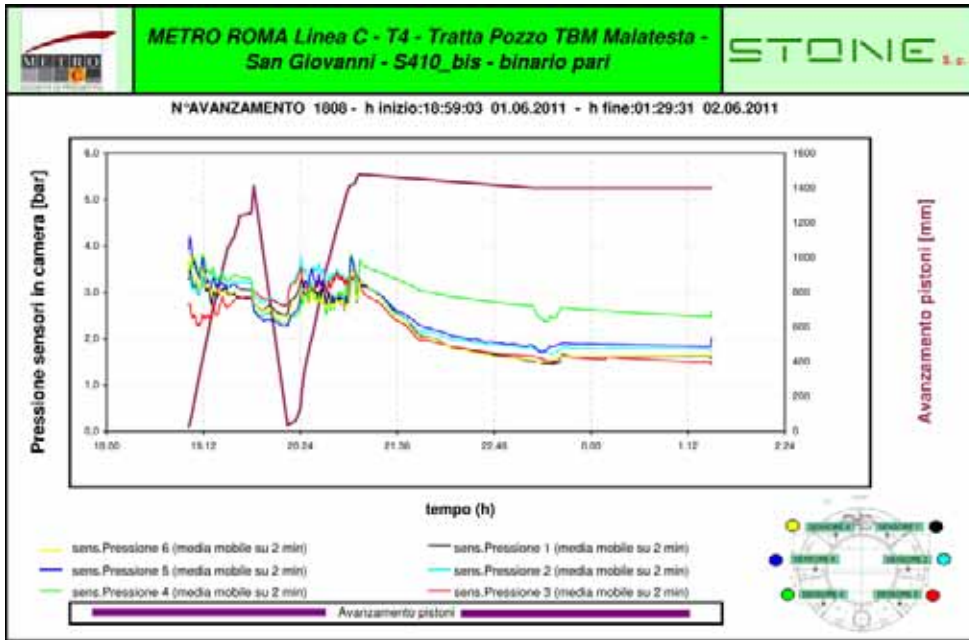


Figura 9 . Dati macchina: andamento pressione a tergo - spinta 1808

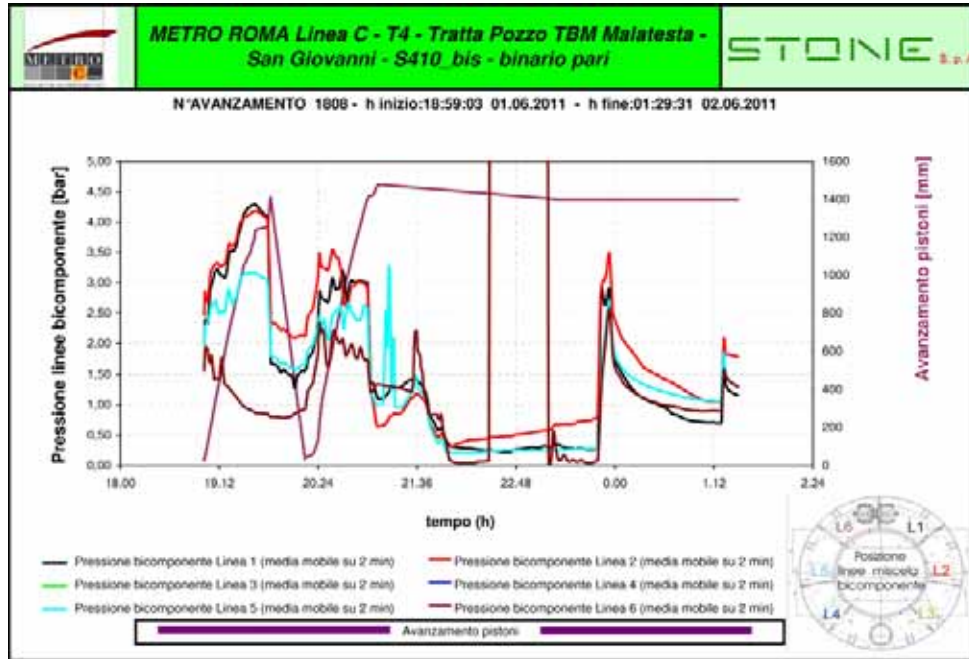
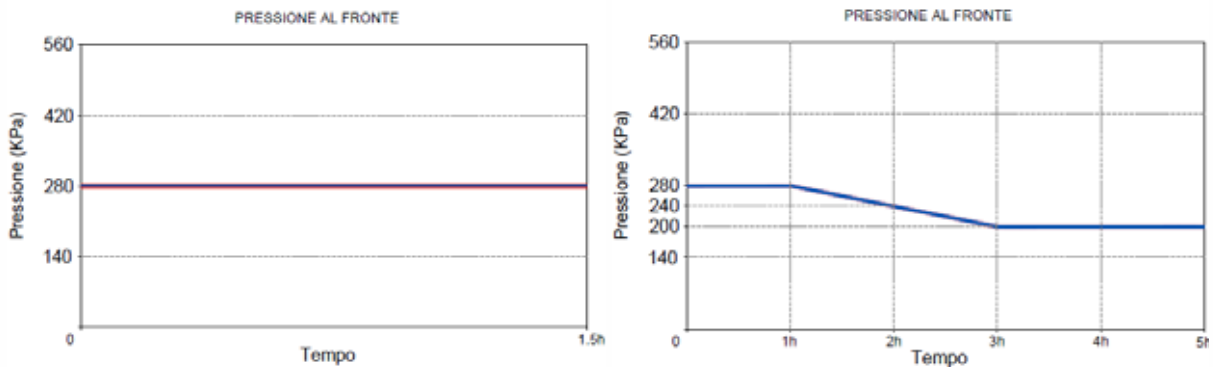


Figura 10 . Dati macchina: andamento pressione a tergo - spinta 1808



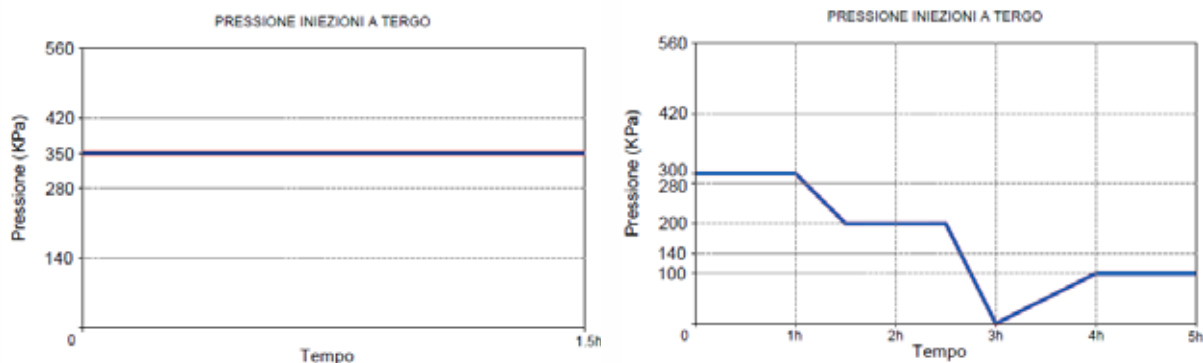


Figure 11 . Schematizzazione di calcolo delle pressioni nel tempo (a sinistra le ipotesi di progetto, a destra una situazione tipo della TBMS410)

### 3.3 Interpretazione e previsione dei fenomeni deformativi con modelli numerici

Una volta analizzati in corso d'opera tutti i dati si è ipotizzato che la risposta deformativa propagatasi a piano campagna a seguito dello scavo della galleria sul BP derivasse da un decadimento delle caratteristiche meccaniche del terreno e dall'innescio di processi viscosi e di consolidazione terminati molto tempo dopo la conclusione dello scavo. Gli effetti della seconda TBM sarebbero risultati amplificati perché si sarebbero sommati a quelli prodotti dalla prima a distanza di pochi metri. Il comportamento ipotizzato è compatibile con la natura dei terreni costituiti da argille sature sovraconsolidate di alta plasticità. La mancanza di regolarità dell'avanzamento, valori non ottimali ed incostanti dei parametri possono aver prodotto una sovrapposizione di componenti deformative di varia natura nel breve e medio termine: una componente elasto-plastica "istantanea" creata in condizioni (quasi) non drenate (modello di Maxwell), caratterizzata da un decadimento dei parametri meccanici, una componente viscosa dovuta ai processi di consolidazione primaria (modello di Kelvin) instauratosi sin da subito e una componente viscosa secondaria (modello di Maxwell). Il valore non eccessivamente basso della permeabilità delle argille in questione ( $1e^{-7}m/s$ ) relazionato alle velocità di avanzamento delle TBM in esame ( $3+6e^{-4}m/s$ ) lascia infatti presagire un comportamento solo parzialmente non drenato al momento dello scavo (Anagnostou G., Cantieni L. & Ramoni M. (2010)). Il comportamento deformativo di medio-lungo termine sarebbe poi il risultato della dissipazione pressoché completa delle sovrappressioni interstiziali precedentemente indotte dallo scavo e dal completamento dei fenomeni di consolidazione primaria.

### 3.4 Back analysis dello scavo delle TBM S409 e TBMS410

Si è ritenuto di dover verificare le ipotesi descritte precedentemente attraverso back analysis con modelli numerici in grado di rappresentare il reale comportamento del terreno che, nel caso in esame, presenta un comportamento non lineare, dipendente dal tempo e dai percorsi di carico imposti (modalità di scavo della macchina). Sono stati quindi analizzati vari scenari: uno che ha simulato le condizioni di scavo secondo il progetto e altri che hanno simulato le condizioni realmente riscontrate per le TBM. I modelli implementati sono assialsimmetrici con l'avanzamento di un tratto di circa 30m. Il terreno è stato modellato con un legame costitutivo elastico non lineare, viscoso - plastico (fig. 12). L'analisi è stata condotta in condizioni non drenate (flusso bloccato) utilizzando comunque i parametri drenati e simulando i primi effetti viscosi sviluppati durante il ciclo (ore). I rivestimenti sono stati modellati come materiali linearmente elastici.

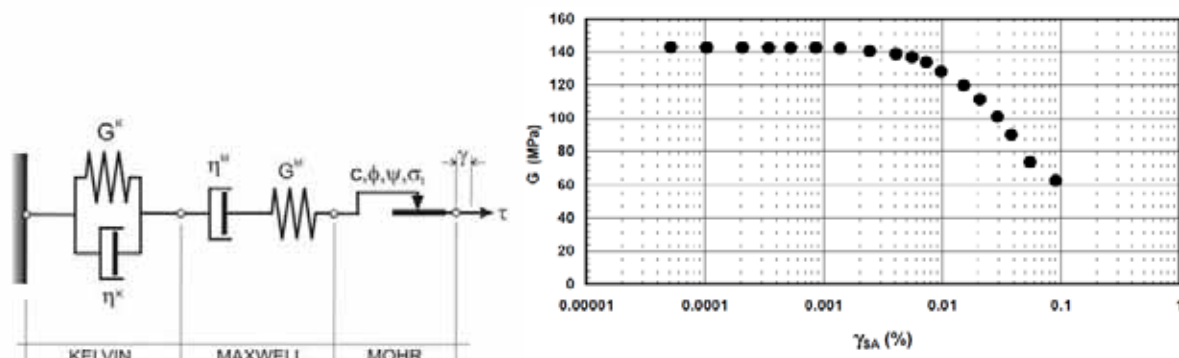


Figura 12 . Modello costitutivo per il terreno e decadimento del modulo G



Il decadimento del modulo elastico di taglio  $G$  è stato simulato con la legge rappresentata in figura 12 (prove in colonna risonante). Ogni spinta di 1.4 m (spinta) è stata simulata nello spazio e nel dominio del tempo, seppur in modo semplificato, applicando sia le procedure di progetto (fig.11) sia quelle effettive (fig.11), inserendo nel modello la presenza dello scudo, il sovrascavo radiale, la presenza del rivestimento definitivo ed il riempimento a tergo dell'anello con iniezioni di miscela bicomponente (fig.13).

**Tabella 3. Principali parametri di analisi**

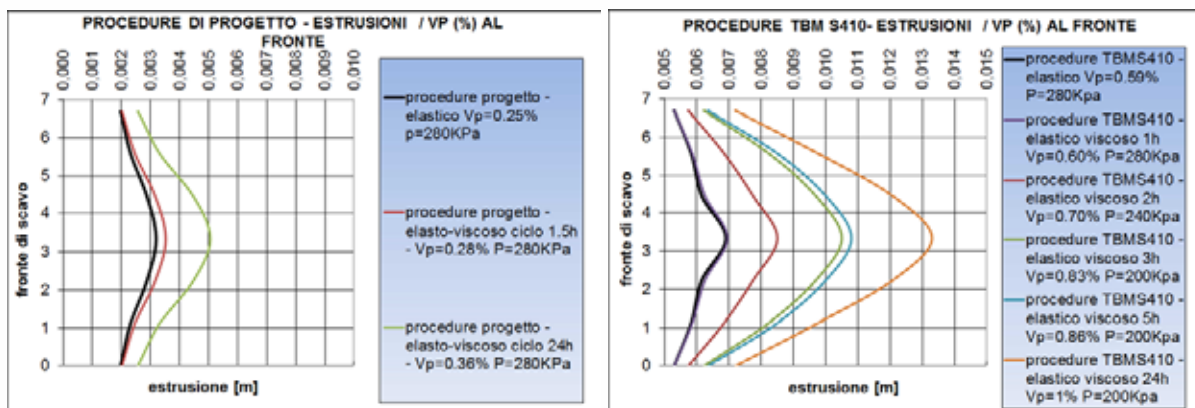
H	25m
falda	-11m da p.c.
$\gamma$	18.5 KN/mc
$c'$	30 KPa
$\phi'$	24°
$G_0$	160MPa
$\mu_M$	1e13 Pa · s
$\mu_K$	1e12 Pa · s
conicità radiale scudo	2cm
sovrascavo radiale	2.5cm+4.5cm



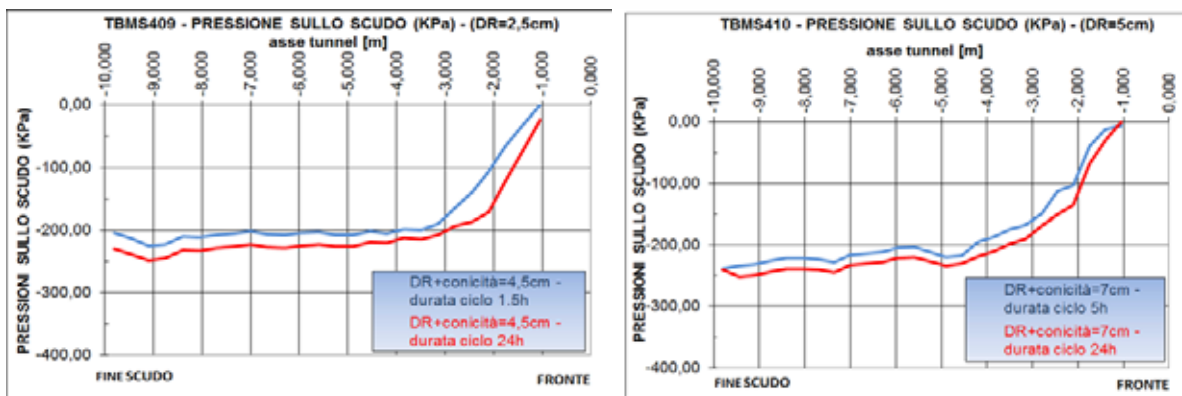
**Figura 13 . Particolari della mesh di calcolo del modello numerico assialsimmetrico**

Per quanto riguarda il comportamento al fronte l'analisi condotta secondo le ipotesi di progetto ha generato estrusioni (fig.14) e volumi persi limitati (cap.3.5) che diventano significativi solo in presenza di un fermo macchina di 24h. Per l'analisi condotta secondo le procedure dello scavo della TBMS410, si ottiene un aumento significativo del volume perso anche dopo poche ore (0.85% a 5h), a causa del duplice effetto della viscosità e del decadimento dei moduli indotto dalle minori pressioni applicate nel tempo, effetto che evidentemente si sovrappone a quanto scontato nelle precedenti spinte.

Per quanto riguarda il comportamento attorno allo scudo è risultato difficile verificare la presenza di un sovrascavo radiale parzialmente riempito a tergo: a tal proposito sono state effettuate solo delle assunzioni supportate dai dati macchina e dal monitoraggio. L'approccio è stato quindi quello di ipotizzare e simulare varie misure di sovrascavo radiale. Si riporta nelle fig.14 l'esito di due analisi effettuate, ritenute le più significative, e da cui è stato possibile calcolare la pressione teorica sullo scudo, simulando separatamente le condizioni di scavo delle due TBM.

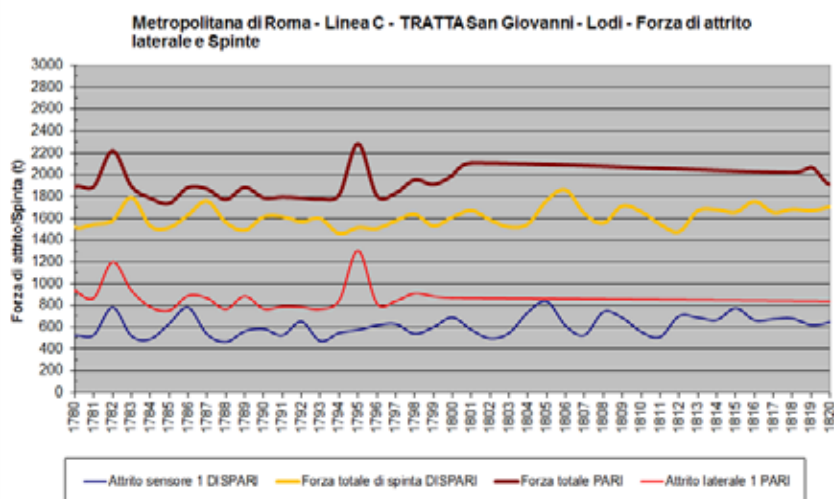


**Figura 14 . Risultati del modello assialsimmetrico – estrusioni e volumi persi al fronte**



**Figura 15. Risultati del modello assialsimmetrico – pressioni sullo scudo**

I risultati sono quantitativamente comparabili con quanto riportato in fig.16: la forza di attrito (coefficiente dinamico  $\mu=0.25$ ) stimabile dai risultati dell'analisi numerica della TBMS410 risulta pari a circa 8.000 KN. Nella fig. 16 le forze di attrito calcolate a partire dai dati macchina risultano mediamente pari a 8000 KN per la TBMS410 ed a 6000 KN per la TBMS409. Si evidenzia inoltre che un fermo macchina di 24h ha generi un aumento della pressione sullo scudo di circa il 15%.



**Figura 16 . Dati macchina – forze di attrito e spinte**

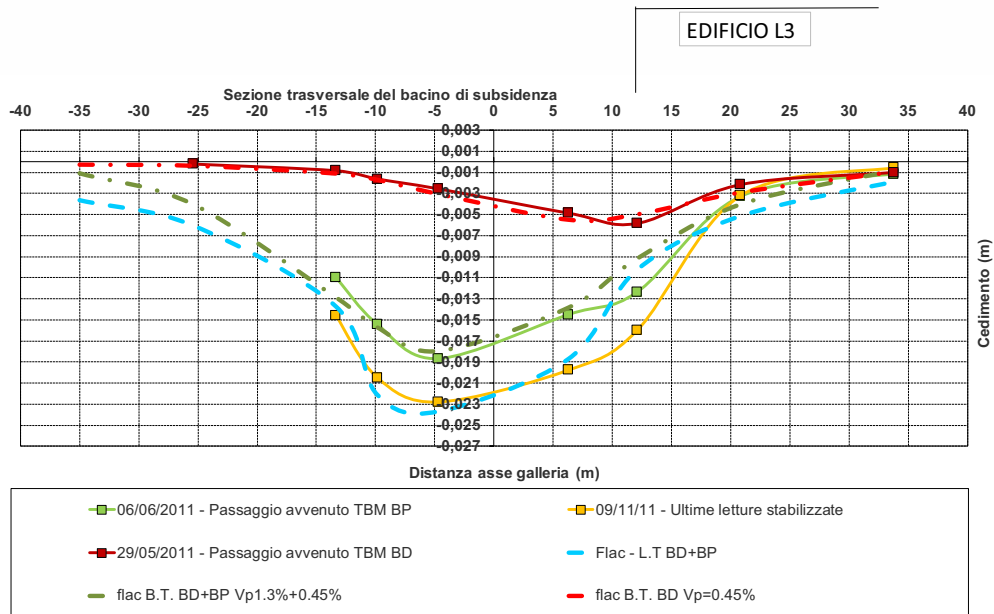
Il risultato a cui si è pervenuti con le analisi non è scontato in quanto nonostante per la TBMS410 (BP) sia stato simulato un sovrascavo più elevato, le pressioni sullo scudo sono risultate comparabili, se non maggiori, di quelle calcolate nel caso della TBMS409 (BD) per la quale il sovrascavo ipotizzato è inferiore. Ciò è dovuto all'effetto del maggiore deconfinamento del nucleo ed al decadimento delle caratteristiche del terreno più detensionato. Partendo da tali risultati si è potuto fare un'ulteriore considerazione: a partire dal volume misurato di miscela iniettata della TBMS410 si può stimare un sovrascavo radiale teorico di 4.5 cm inferiore rispetto a quello simulato nell'analisi, (5 cm), (fig. 15) ed è probabile che il sovrascavo reale possa essere stato localmente più importante di quello ipotizzato e non completamente compensato dalle iniezioni. Assesamenti millimetrici radiali possono aver generato un'ulteriore perdita di volume al contorno (spostamenti radiali di 5 mm -> VP=0.5%) che, sommata a quella già scontata al fronte, conduce ad un valore teorico totale di 1.3%. Discorso analogo può essere fatto per la TBMS409. I valori finali ipotizzati per i volumi persi sono:

**Tabella 4. Volumi persi di breve termine in galleria stimati da analisi numeriche**

TBMS409	TBMS410
0.45%	1.3%

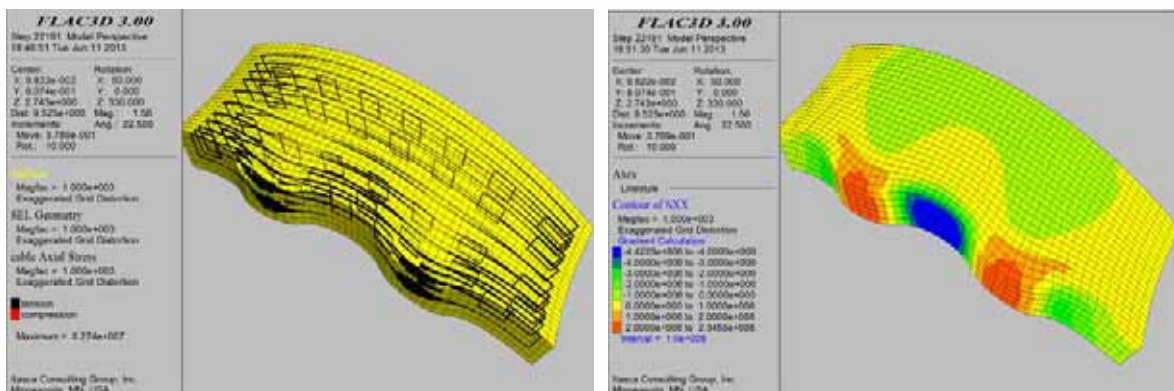
Tali valori teorici sono stati utilizzati in analisi numeriche 2D in cui si è simulata la presenza di entrambe le gallerie e si è calcolato l'effetto deformativo indotto in superficie. Tali simulazioni hanno consentito di valutare due aspetti valutati con le analisi assialsimmetriche: la mutua interferenza delle gallerie e l'effetto della dissipazione delle pressioni interstiziali a lungo termine sui cedimenti. Il modello costitutivo utilizzato per il terreno è analogo a quello utilizzato per le analisi assialsimmetriche.

I moduli elastici del terreno in fase di scarico sono stati assunti più elevati per evitare che laddove la dissipazione delle pressioni interstiziali conducesse ad uno scarico tensionale efficace, si verificassero inverosimili sollevamenti del terreno. L'analisi della galleria dispari (TBMS409) evidenzia cedimenti (tratteggio in rosso) e volumi persi (0.4%) comparabili con quelli effettivamente misurati nel breve termine (29/05/2011) e registrati dopo il passaggio della prima macchina. Per la galleria pari (TBM S410) imponendo un disturbo (rilascio) al contorno del cavo compatibile con il valore del volume perso calcolato (1.3%) si è ottenuto un andamento dei cedimenti cumulati (tratteggio in verde) comparabile con i dati misurati: risulta evidente l'effetto del disturbo indotto dalla prima galleria in quanto i cedimenti totali risultano amplificati e non pari alla somma algebrica dei singoli contributi delle due gallerie. Dalla comparazione dei dati risulta evidente l'effetto del peso e della rigidità dell'edificio antistante le gallerie sulla forma della subsidenza che risulta più affossata rispetto a quella stimata numericamente (analisi in condizioni di *free field*).



**Figura 17 . Cedimenti registrati e simulazioni numeriche di back analysis**

Dal punto di vista numerico non si è riscontrata un'influenza significativa dei valori della pressione a tergo sull'entità dei volumi persi. È pratica diffusa quella di fissare la pressione delle iniezioni pari a quella del fronte maggiorata di 0.5 bar. Ciò deriva da considerazioni di natura tecnologica (es: tenuta delle spazzole dietro lo scudo, evitare il rischio di intasamento delle linee). Si ritiene invece che, immediatamente dietro lo scudo, debba essere minimizzato il detensionamento dell'ammasso mantenendo una pressione più vicina a quella media litostatica per garantire il confinamento del rivestimento soggetto alla spinta dei martinetti. In questa condizione come risulta evidente dalle analisi numeriche che simulano un conchio soggetto alla spinta massima (2500KN) di tre martinetti (fig. 18), gli stati tensionali nei conci e nelle armature di frettaggio rimangono contenuti all'interno delle resistenze dei materiali.



**Figura 18 . Modello numerico per la simulazione di un conchio armato soggetto alla spinta di tre martinetti**

### 3.5 Simulazione delle ipotesi di progetto

Per quanto riguarda le procedure di progetto il comportamento al fronte riprodotto con l'analisi condotta è caratterizzato da estrusioni (fig.15) e volumi persi limitati (0.28% a 1.5h) che cominciano a diventare significativi solo in presenza di un fermo macchina di 24h. Per quanto riguarda il comportamento al contorno dello scudo, in una zona ugualmente critica per la potenziale generazione dei volumi persi, le ipotesi di progetto non prevedono alcun sovrascavo significativo e si ipotizza che il profilo di scavo sia perfettamente riempito a tergo da iniezioni eseguite con volumi e pressioni adeguati. In queste condizioni la prima TBM avrebbe quindi prodotto un volume perso  $V_p=0.28\%$ , mentre la seconda, a parità di disturbo arrecato, dovendo passare successivamente, per la mutua interferenza fra le gallerie ed il conseguente decadimento dei terreni, avrebbe generato un volume perso quasi doppio (0.5%), comunque all'interno delle previsioni progettuali (fig.19).

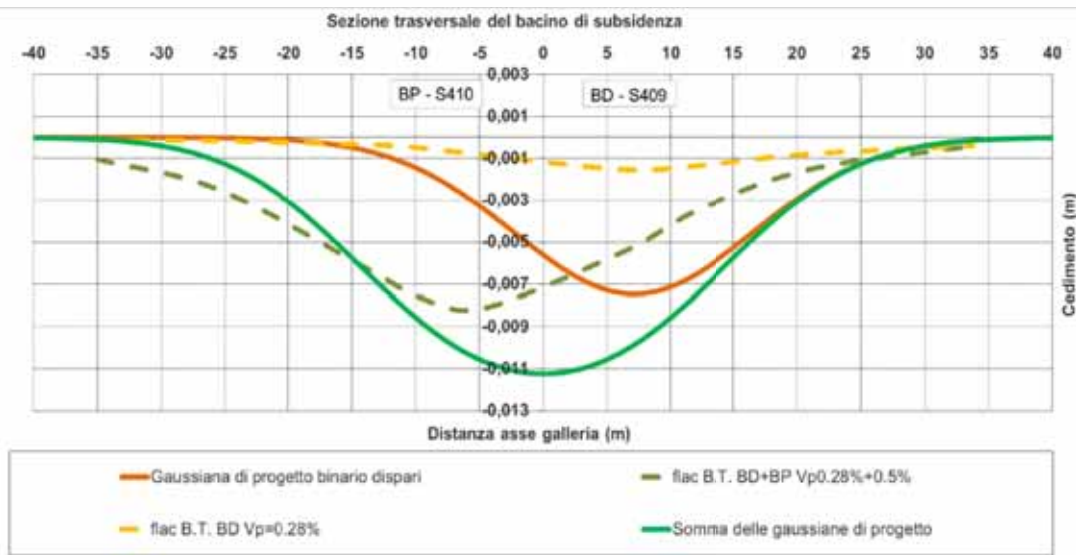


Figura 19 . Simulazioni numeriche di previsione e curve gaussiane

### 4. Conclusione

Un miglioramento delle previsioni delle deformazioni indotte dagli scavi delle TBM può essere rappresentato da modelli numerici tridimensionali anche semplificati, possibilmente tarati con prove specifiche di laboratorio (es: prove di estrusione in cella triassiale, prove triassiali di creep,...) che consentano di simulare in dettaglio gli avanzamenti con lo scopo di definire procedure tali da limitare in campo elastico le deformazioni indotte. In casi critici tale approccio va approfondito perché il terreno anche in campo elastico presenta un comportamento non univoco (non linearità, viscosità, dipendenza dal tempo,...) e la risposta deformativa è fortemente condizionata dall'interazione terreno-macchina.

### 5. Bibliografia

Anagnostou G., Cantieni L. & Ramoni M. (2010): "L'importanza degli effetti tridimensionali in prossimità del fronte di scavo"; *Gallerie e grandi opere sotterranee XXXII n. 96 – dicembre 2010*, 28–38; Pàtron Editore Bologna.

Lunardi P. (2006), "Progetto e costruzione delle gallerie" *Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e Suoli ( ADECO-RS) – Editore Hoepli*