

# A VARSAVIA, PER LA LINEA II LO SCAVO MEDIANTE TBM - EPB

IL SOTTOATTRAVERSAMENTO DELLA METROPOLITANA DELLA LINEA I ESISTENTE



1. Il sollevamento dello scudo della TBM

La parte centrale della Linea II della nuova metropolitana di Varsavia, comprensiva di sette stazioni, ha una lunghezza complessiva di 6,3 km con gallerie a doppio fornice. Il presente articolo descrive lo scavo meccanizzato effettuato al di sotto della Linea I esistente, costituita da conci in ghisa, con una distanza tra le gallerie nuove e quelle esistenti di soli 3,00 m. Il progetto è stato sviluppato dalla Rocksoil SpA, in qualità di Progettista delle opere in sotterraneo, secondo l'approccio progettuale A.DE.CO.-RS., attraverso le fasi conoscitiva, di diagnosi, terapia e verifica e controllo in corso d'opera [1].

Il comportamento tenso-deformativo dell'ammasso è stato ricavato dalle numerose back-analysis effettuate sulla base dei dati raccolti nelle sezioni di monitoraggio delle tratte scavate precedentemente al sottopasso della Linea I. Durante lo scavo, tutti i parametri di funzionamento della TBM sono stati analizzati, processati e controllati per verificare la congruenza tra le pressioni progettuali e la reale risposta tenso-deformativa del terreno e delle preesistenze interferenti. Il sottopasso della Linea I esistente è avvenuto con una copertura pari a circa 17,00 m. Lo scavo di entrambe le gallerie, con le TBM Anna e Maria (Figura 1), è stato completato nelle massime condizioni di sicurezza e nel rispetto delle ipotesi progettuali e delle velocità di avanzamento previste.

La Linea II della città di Varsavia, Capitale della Polonia con circa due milioni di abitanti, prevede 22 stazioni distribuite su un percorso di circa 30 km ed è in fase di realizzazione. Il tratto centrale della Linea II (Figura 2) è stato assegnato al Consorzio Internazionale AGP, formato dalle Imprese Astaldi (Italia), Gulermak (Turchia) e PBDiM (Polonia). La tratta è stata inaugurata l'8 Marzo 2015. La sezione centrale della Linea II è compresa tra la stazione di Rondo Daszynskiego e la stazione di Dworzec Wilenski.



2. La planimetria della Linea II

In questo contesto, lo scopo principale della Rocksoil SpA è stato quello di studiare le problematiche connesse alla progettazione dei tunnel, quali le verifiche strutturali e deformative delle gallerie e le analisi di rischio dei fabbricati e di tutte le opere interferenti con il tracciato. Oltre a quello oggetto del presente articolo, sono stati affrontati e superati brillantemente altri passaggi estremamente critici quali il sottoattraversamento del fiume Vistola, per un tratto di 300 m, e quello del complesso monumentale degli edifici della zona di Praga che sono gli unici sopravvissuti alla Seconda Guerra Mondiale. Attraverso la progettazione e l'assistenza tecnica in corso d'opera, la Rocksoil SpA ha provveduto a ideare e mettere in opera tutte le lavorazioni propedeutiche all'ingresso e all'uscita delle TBM dalle stazioni (break in e break out). In particolare, nei passaggi a vuoto delle stazioni sono state progettate e verificate alcune tipologie di ingresso e uscita delle TBM, come blocchi di calcestruzzo magro, falsi tunnel, tamponi in jet-grouting e anelli a tenuta stagna (bullflex). La progettazione ha interessato inoltre le opere di by-pass tra i tunnel e i pozzi di ventilazione e le opere di blindaggio delle gallerie, propedeutiche allo scavo delle stazioni nel caso di passaggio a pieno all'interno delle stazioni stesse. Le gallerie gemelle sono state scavate utilizzando quattro TBM - EPB (Tunnel Boring Machine - Earth Pressure Balance) con un diametro di scavo pari a 6,3 m.

Oggetto di questo articolo è lo scavo al di sotto della Linea I, unica linea di metropolitana esistente fino a quel momento a Varsavia, con meno di 3,00 m di distanza tra le gallerie nuove e quelle esistenti in prossimità della stazione Świętokrzyska.

## IL MOMENTO DELLA PROGETTAZIONE: L'APPROCCIO ADECO-RS

Per la progettazione del sottoattraversamento della Linea I esistente secondo l'approccio ADECO-RS sono state sviluppate analisi numeriche in grado di simulare l'interazione tra le gallerie esistenti e quelle di nuova realizzazione. Il sottopassaggio tra le due linee è avvenuto con un angolo di 90°, a una distanza - come detto in precedenza - minore di 3,00 m. I diametri delle gallerie della Linea I sono pari a 5,5 m, mentre quelli della Linea II di 6,30 m.

### La fase conoscitiva

Seguendo l'approccio ADECO-RS, durante la Fase Conoscitiva sono stati definiti tutti i parametri geotecnici che hanno permesso di delineare correttamente i parametri macchina operativi necessari per le operazioni di scavo.

La stratigrafia presente nella zona del sottopassaggio della Linea I è piuttosto eterogenea. Le litologie presenti sono le seguenti: (VIII) una coltre superficiale di riporto, di origine molto diversificata fatta prevalentemente di riempimenti di origine antropica, parti di vecchi insediamenti, pavimentazioni e basamenti stradali, creati principalmente da danni derivanti dalla guerra e dalla successiva ricostruzione negli anni a seguire. Il loro spessore è variabile fino ad arrivare a un massimo di circa 3,00 m:

- argille ed argille limose coesive di origine Pliocenica (provenienti da sedimenti lacustri) a elevata plasticità, da rigide a molto rigide ( $I_L < 0,15$  e  $I_p > 0,4$ ). La permeabilità è molto bassa tale da considerare questa formazione impermeabile con un coefficiente di permeabilità pari a  $K = 10^{-9}$  m/s. La litologia può avere la presenza di lenti limoso sabbiose. Bassissima è la probabilità di trovare ciottoli o trovanti di varie pezzature, ad eccezione della parte più superficiale delle argille ad elevata plasticità. In condizioni di non completa saturazione, vi è la possibilità di un potenziale rigonfiamento;
- argille, limi argillosi, limi coesivi di origine Pliocenica (provenienti da sedimenti lacustri), da rigide a molto rigide ( $I_L < 0,15$  e  $I_p < 0,4$ ). La permeabilità è può essere considerata bassa e compresa tra  $K = 10^{-9} - 10^{-7}$  m/s. La litologia ha la presenza di lenti limoso sabbiose che possono presentare permeabilità più elevate. Bassissima è la probabilità di trovare ciottoli o trovanti di varie pezzature;
- sabbie fini e sabbie limose non coesive di origine pliocenica (provenienti da sedimenti lacustri), con presenza rara di sabbie a granulometria più elevata, con  $I_D > 0,7$ . La permeabilità compresa tra  $K = 10^{-6} - 10^{-4}$  m/s fa diventare questo strato potenzialmente permeabile. Bassissima è la probabilità di trovare ciottoli o trovanti di varie pezzature.

### La fase di diagnosi

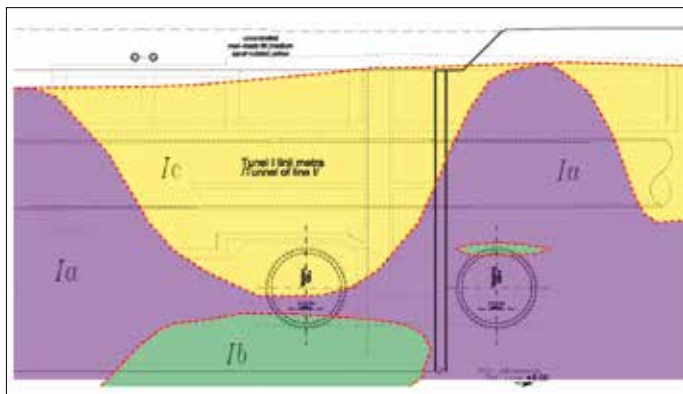
Sulla base delle risultanze della fase conoscitiva, in fase di diagnosi, come previsto dall'approccio ADECO-RS, si è analizzata la risposta deformativa del nucleo-fronte e del cavo a breve/lungo termine in assenza di misure di stabilizzazione, considerando attentamente anche il potenziale rischio per le pre-esistenze (fabbricati in superficie) e le corrispondenti categorie di danno [2]. Le analisi condotte hanno portato a definire due distinte situazioni, a seconda che ci si trovasse nella formazione Ic, con una componente più sabbiosa o all'interno della formazione la a componente prettamente argillosa.

I terreni di natura sabbiosa hanno portato a inquadrare la categoria di comportamento tenso-deformativo di tipo C, ossia comportamento a nucleo-fronte "instabile", con fenomeni deformativi che, in assenza di adeguati interventi di stabilizzazione, evolverebbero rapidamente in campo elasto-plastico fino a giungere al crollo del fronte e al conseguente collasso della cavità. Gli stati tensionali in gioco in rapporto alle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno da scavare non consentirebbero infatti la formazione per via naturale di effetti arco, né longitudinalmente, a cavallo del fronte, né trasversalmente al centro della cavità. Il tutto in un contesto reso assai delicato per la presenza di edifici a piano campagna. Analogamente, per l'attraversamento della formazione argillosa, i rischi connessi al richiamo esercitato dalla decompressione indotta dallo scavo hanno indotto a inquadra-

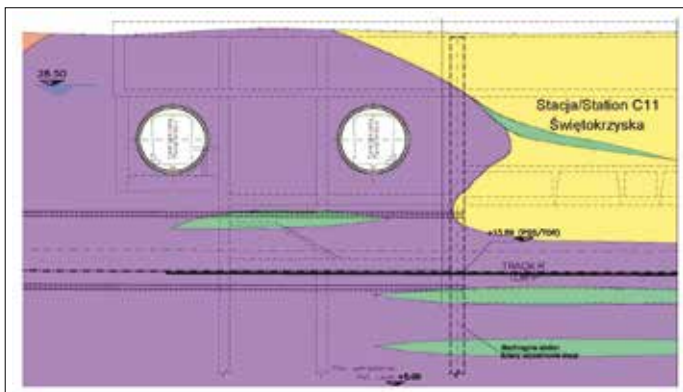




3. La planimetria con le nuove indagini

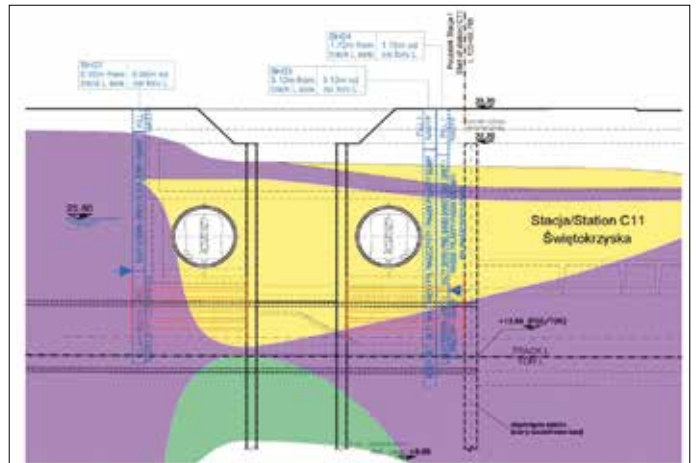


4. La sezione trasversale (sezione A-A)



5. La sezione in asse al binario pari (sezione B-B)

re anche questa situazione nella categoria di comportamento tenso-deformativo C, seppur con un rischio più limitato in termini di moti di filtrazione indotti dallo scavo, grazie alla bassa permeabilità di tale formazione. In entrambi i casi, quindi, al fine di garantire le indispensabili condizioni di stabilità della galleria a breve e a lungo termine, si è reso necessario adottare metodologie di scavo e interventi di stabilizzazione in grado di esercitare adeguate azioni di precontenimento del cavo per riportare la situazione di scavo dalla Categoria C (nucleo-fronte instabile) alla Categoria A (nucleo-fronte stabile).



6. La sezione in asse al binario dispari (sezione C-C)

In corrispondenza del sottoattraversamento della linea esistente, nel dettaglio dall'analisi dei dati geologici e geotecnici, sono emerse delle condizioni stratigrafiche eterogenee. In tale contesto, le condizioni dei terreni sono risultate coesive e non coesive. In particolare, la presenza dello strato di sabbie fini e argille limose (Ic), con una permeabilità più elevata rispetto alle argille ad alta plasticità (Ia), lato binario dispari, ha portato a commissionare delle ulteriori indagini geotecniche rappresentate in azzurro nella Figura 3, per meglio inquadrare le condizioni geologiche al contorno. La sezione geologica trasversale alla linea di nuova costruzione sezione A-A (Figura 4) e le sezioni geologiche longitudinali B-B in asse binario pari (Figura 5) e C-C in asse binario dispari (Figura 6) avevano confermato come, in asse binario dispari, ci fosse l'esistenza di una incisione più profonda della litologia meno coesiva e più permeabile (Ic).

### La fase di terapia

Dallo studio di diagnosi si era quindi evidenziata la necessità di mantenere il terreno al contorno dello scavo in condizioni pressoché indisturbate, in termini sia tensionali che deformativi. Questa esigenza ed altre considerazioni, fatte per tutta la Linea II, sia di tipo tecnico (quali lunghezza e caratteristiche geometriche della galleria da realizzare, tipo di terreni e presenza di acqua in pressione) sia di carattere economico hanno indirizzato le scelte attuate durante la fase di terapia. In particolare, si è deciso di avanzare con scavo meccanizzato utilizzando una TBM chiusa in grado di esercitare un'adeguata contropressione sul fronte di scavo (sistema EPB) per annullare, da un lato, l'effetto delle "perdite di volume" in fase d'avanzamento tipiche dello scavo meccanizzato (allentamenti nel terreno al contorno del cavo e risentimenti in superficie) e contrastare, dall'altro lato, l'ingresso di acqua in pressione in galleria, in corrispondenza delle zone a più elevata permeabilità. Esiste infatti una perfetta analogia tra l'effetto della "estrusione" del nucleo-fronte in una galleria scavata in convenzionale e l'effetto delle cosiddette "perdite di volume" in una galleria scavata in meccanizzato, mentre nel primo caso gli effetti indesiderati si curano attraverso il rinforzo e/o la protezione del nucleo-fronte, nel secondo caso è fondamentale esercitare un'adeguata azione di confinamento dello stesso. Questo è possibile regolando appropriatamente la

pressione interna alla camera di scavo della TBM: aumentandola, si producono sovrappressioni al fronte che contrastano le perdite di volume e possono addirittura determinare, in funzione delle condizioni di copertura, innalzamenti del piano campagna; al contrario, diminuendola, si esaltano le perdite di volume, generando cedimenti del piano campagna.

Inoltre, le condizioni geologico-geotecniche così eterogenee emerse anche dopo la campagna addizionale nella zona del sottoattraversamento della Linea I hanno portato alla valutazione di un'opera di presidio più opportuna per le critiche condizioni al contorno presenti. La presenza di una litologia permeabile e non coesiva (Ic), in asse binario dispari, la distanza così limitata nell'intersezione dei due tracciati pari a meno di 3,00 m e le caratteristiche strutturali della stessa Linea I, che presenta un rivestimento in conci in ghisa bullonati, hanno portato alla decisione di progettare un intervento di consolidamento e impermeabilizzazione attraverso iniezioni chimiche e cementizie a bassa pressione. Tale tipologia di consolidamento è stata pensata e progettata per limitare al massimo i volumi persi al di sopra della linea esistente. La scelta di pressioni di iniezioni ridotte è stata indotta per ridurre al minimo l'impatto di tali lavorazioni, in termini di spostamenti e conseguentemente di sollecitazioni, sulla linea in esercizio. La scelta di una tipologia di scavo appropriata mediante una TBM - EPB, associata ad un consolidamento del terreno su binario dispari, si sono rivelate le scelte più corrette ed efficaci per un tale tipo di problematica.

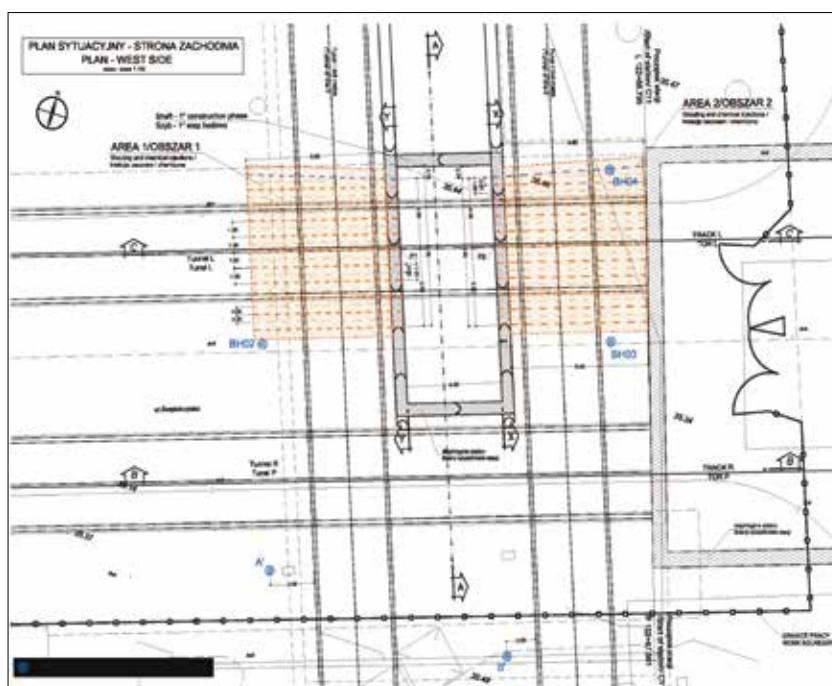
Il consolidamento è stato realizzato mediante iniezioni chimiche e cementizie a bassa pressione, eseguite orizzontalmente all'interno del pozzo denominato A14, propedeutico alla connessione Linea I-Linea II. Tali iniezioni sono state eseguite esclusivamente nell'area a cavallo del binario dispari, come indicato nelle Figure 6 e 7, nella zona dove si è evidenziata la presenza delle sabbie fini (Ic). Il diametro teorico scelto è stato pari a 1.200 mm, con una maglia pari a 0,90 m per 1,00 m. Come evidenziato nelle Figure 8 e 9, le iniezioni sono state eseguite su tre differenti fasi di ribasso.

INIEZIONI CEMENTIZIE	
Cemento	425R -525R superfine
Rapporto acqua cemento	2,0-2,5
Densità	1,26-1,31 g/cm <sup>3</sup>
Viscosità Marsh	1,26-1,31 g/cm <sup>3</sup>
Bleeding dopo 2 ore	<,5%
INIEZIONI CHIMICHE	
Densità	1,25-1,38 g/cm <sup>3</sup>
Viscosità dinamica	5-12 cps
Bleeding dopo 2 ore	< 0,5%

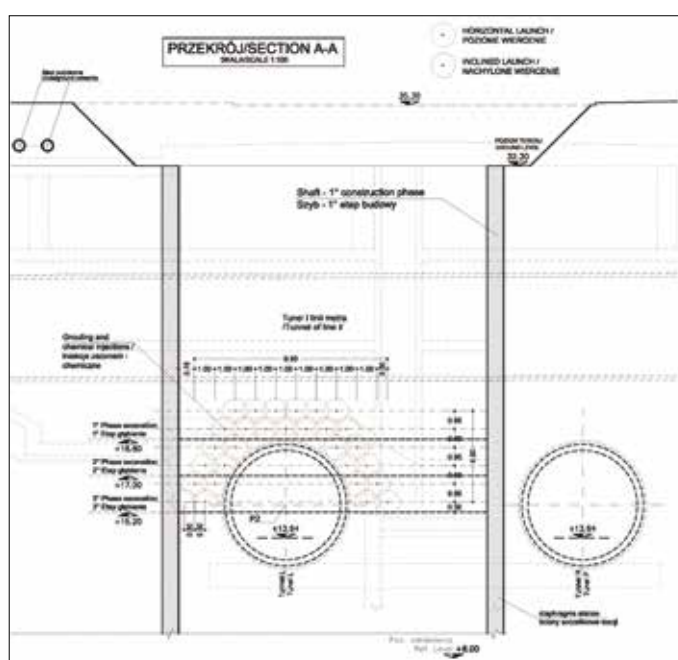
7A. I parametri delle caratteristiche delle miscele scelte

INIEZIONI CEMENTIZIE	
Volume di iniezione	25-30 l/vl
Pressione di rifiuto	4-6 bar
INIEZIONI CHIMICHE	
Volume di iniezione	45 -50 l/vl
Pressione di rifiuto	4-8 bar

7B. I parametri operativi



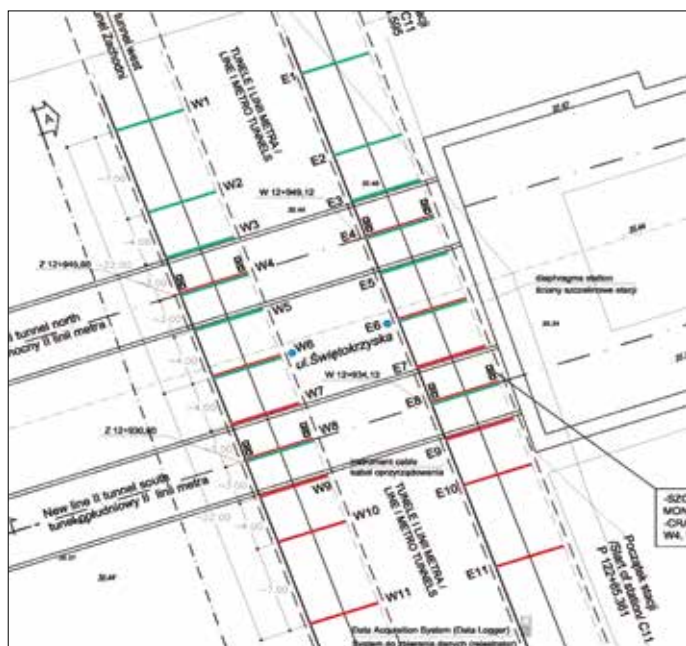
8. La planimetria della zona dei trattamenti di iniezione



9. La sezione della zona dei trattamenti di iniezione

I tubi di iniezione sono stati scelti pari a 1" e 1/8. Si è scelto di avere quattro valvole al metro e di iniettare con un doppio packer e preventer, quest'ultimo per evitare ingresso di acqua all'interno del pozzo durante le fasi di perforazione e iniezione. I parametri operativi principali sono stati tarati durante l'esecuzione, attraverso l'analisi dei dati provenienti dall'importante sistema di monitoraggio, previsto all'interno del tunnel esistente della Linea I, sia per la fase delle lavorazioni propedeutiche allo scavo sia per il controllo delle operazioni di scavo stesse.

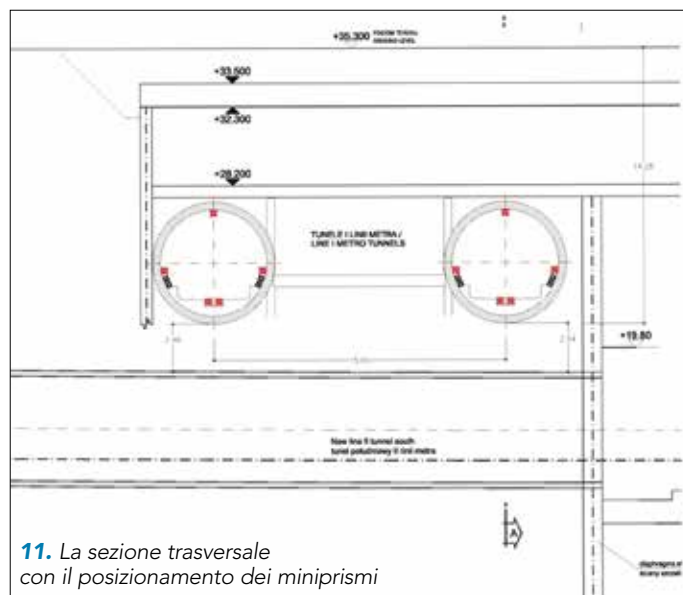
In particolare, il monitoraggio previsto e installato per le operazioni propedeutiche al sottoattraversamento ha compreso 11 sezioni di miniprismi su binario 1 e binario 2 della metropolitana esistente (Figura 10). Ogni sezione di monitoraggio è stata realizzata ponendo cinque miniprismi letti in automatico da due differenti stazioni totali all'interno delle gallerie esistenti (Figure 11 e 12). Per la verifica strutturale delle gallerie, nuove ed esistenti, sono state effettuate analisi numeriche utilizzando il programma alle differenze finite Flac 5.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua).



10. La planimetria delle sezioni di monitoraggio



12. La Linea I esistente



11. La sezione trasversale con il posizionamento dei miniprismi

Per analizzare tutti i possibili scenari dovuti al sottoattraversamento della Linea I, con la nuova Linea II, sono state eseguite tre differenti analisi. Le prime due sono state eseguite con una sezione di calcolo piana con le gallerie sovrapposte. Tali simulazioni hanno permesso di verificare lo stato tensionale del rivestimento della nuova galleria in costruzione e di quella esistente, massimizzando le sollecitazioni sui rivestimenti. La prima condizione presenta una stratigrafia prevalentemente con le sabbie fini Ic, con la modellazione dell'intervento di consolidamento. La seconda analisi presenta esclusivamente con le Argille Pliocenice Ia.

Per la verifica della galleria di nuova costruzione, le verifiche sono state eseguite in accordo all'EUROCODE n° 2 UNI ENV 1992-1-1. Le fasi principali di calcolo per queste due analisi sono state:

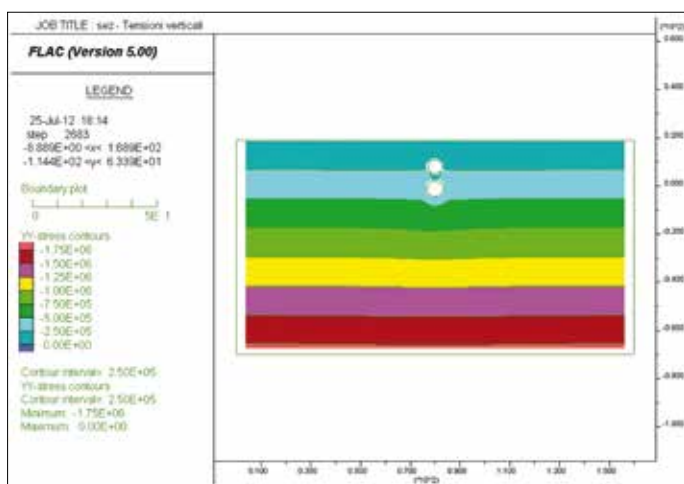
- geostatico;
- scavo e costruzione della Linea I esistente;
- applicazione del consolidamento, con un incremento del modulo elastico pari a 1,5 volte quello iniziale;
- scavo e costruzione della galleria della Linea II.

Per la prima analisi, le ipotesi geotecniche e stratigrafiche fatte sono descritte nella Figura 13. In Figura 14 sono mostrate le tensioni totali. Analogamente, per la seconda analisi le ipotesi geotecniche e stratigrafiche sono descritte nella Figura 15 mentre in Figura 16 sono mostrate le tensioni totali verticali.

Condition:		maximum overburden			
Overburden:	16,5m				
Water table:	-9 m (from ground level)				
From ground surface to the end of the model	Alternance of sands and gravel (SG), quaternary silty and clayey soils (QSC), Pliocene clay (PC)	$\gamma$	$E$	$c'$	$\phi$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[kPa]	[°]
	from G.L. to -3.55m: anthropic fills	18	12.2+0.8z	5	28
	from -3.55 m to -18 m : SG	20.9	20+4.5z	0	41
	from -18 m: PC	20.6	70+2.25z	10	20

13. La stratigrafia (analisi di calcolo 1)

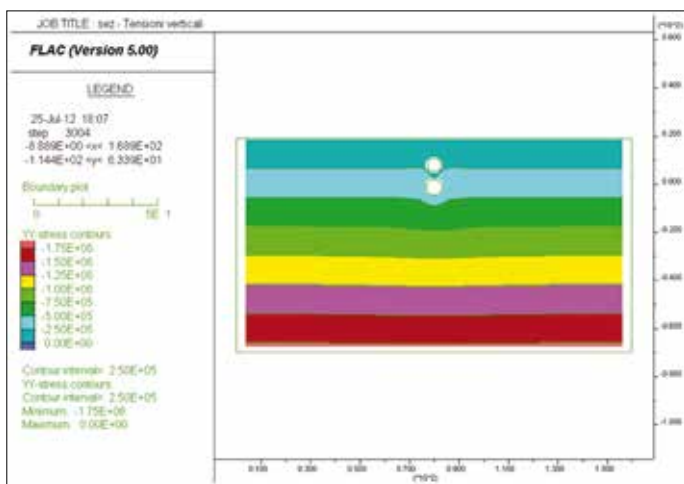




14. Le tensioni totali (analisi di calcolo 1)

<b>Condition:</b>	maximum overburden				
<b>Overburden:</b>	16,5m				
<b>Water table:</b>	-9 m (from ground level)				
<b>From ground surface to the end of the model</b>	Alternance of sands and gravel (SG), quaternary silty and clayey soils (QSC), Pliocene clay (PC)	$\gamma$	$E$	$c'$	$\phi$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[kPa]	[°]
	from G.L. to -3.55m: anthropic fills	18	12.2+0.8z	5	28
	from -3.55 m: PC	20.6	70+2.25z	10	20

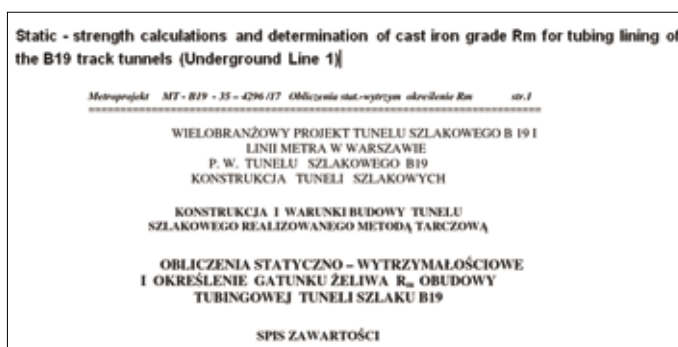
15. La stratigrafia (analisi di calcolo 2)



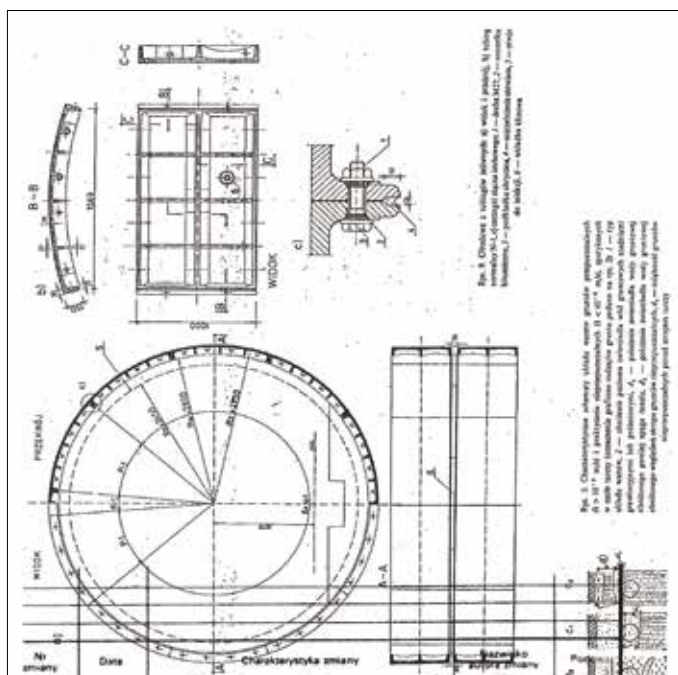
16. Le tensioni totali (analisi di calcolo 2)

Le verifiche effettuate sono risultate tutte soddisfatte per le gallerie di nuova realizzazione.

Per la modellazione delle gallerie esistenti, le caratteristiche geometriche e strutturali dei segmenti della Linea I, realizzati in conci in ghisa bullonati, sono state ricavate dalla documentazione originale tecnica di progetto della Linea I (Figure 17 e 18). Nella Figura 19, si riporta la ricostruzione della sezione trasversale relativa ad un singolo conio della Linea I.



17. La relazione di calcolo originale

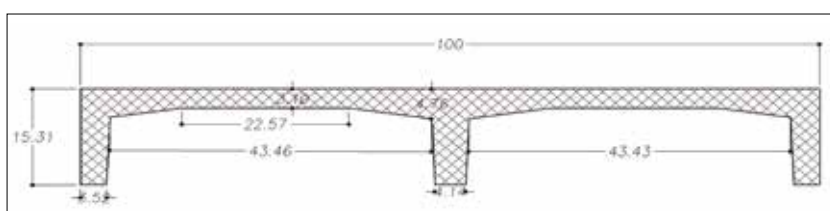


18. La geometria dei conci della Linea I esistente

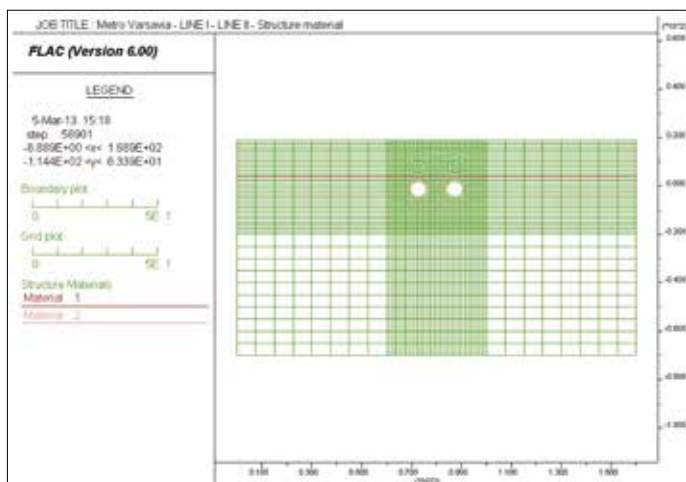
Le caratteristiche ricavate dalla documentazione precedentemente indicata hanno portato a prendere i seguenti parametri per modellare e verificare la Linea I esistente:

- area segmenti = 490 cm<sup>2</sup>;
- W = Modulo resistenza = 1.330 cm<sup>3</sup>.

Nella documentazione originale tecnica è stata ricavata la resistenza ammissibile del materiale utilizzato (ghisa), pari a 250 MPa. A valle di questa indagine le verifiche strutturali delle sollecitazioni indotte dal sottoattraversamento sono state soddisfatte. Considerando un momento massimo pari a 21,21 kNm/m e uno sforzo normale pari a 498 kN/m, la sollecitazione risultante è stata pari a 26,8 MPa, di molto inferiore ai 250 MPa di progetto.



19. La ricostruzione della sezione del conio in ghisa della Linea I

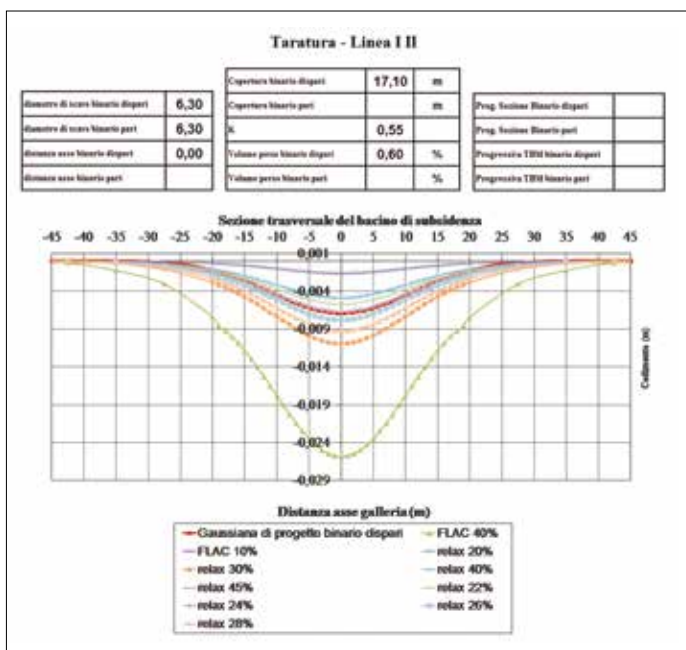


20. Gli effetti per lo spostamento longitudinale della Linea I esistente

Una terza analisi è stata eseguita introducendo su un modello piano, per verificare gli effetti dovuti allo spostamento longitudinale della Linea I esistente, una trave longitudinale di rigidità equivalente alla galleria esistente (Figura 20). Le fasi principali di calcolo per queste due analisi sono state:

- geostatico;
- inserimento della trave equivalente alla Linea I esistente;
- scavo e costruzione della galleria della Linea II.

Per lo sviluppo di tutte le analisi è stata eseguita una taratura del modello ipotizzando vari scenari possibili. Per il binario dispari è stato tarato il rilassamento delle



21. La taratura del modello con 0,6% del volume perso teorico

forze di scavo del modello in funzione del volume perso teorico dello 0,6%. Per il binario pari è stato tarato un rilassamento delle forze di scavo in funzione di un volume perso teorico pari a 0,3%. Nella Figura 21 si riporta la taratura del modello con lo 0,6%.

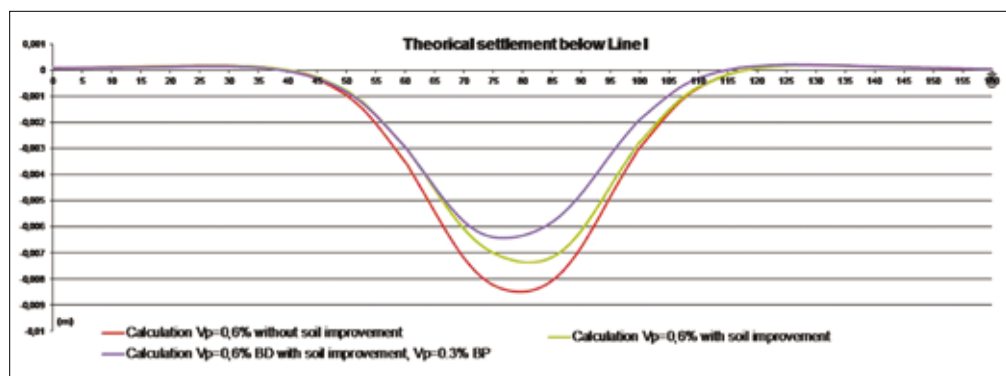
Per le tarature sono state prese in considerazione le formulazioni classiche da letteratura [3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9].

La terza analisi Flac effettuata ha preso in considerazione i seguenti scenari:

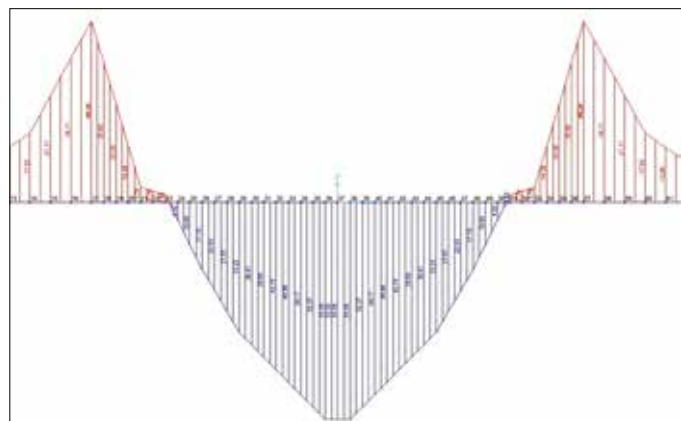
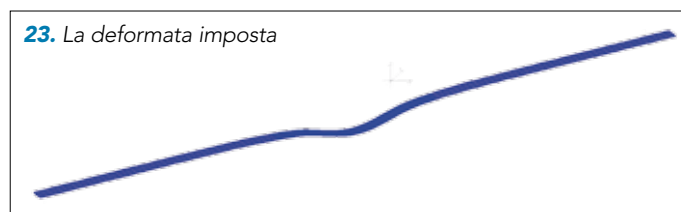
- rilassamento del cavo per entrambe le gallerie con un volume perso pari allo 0,6%, senza intervento di consolidamento;
- rilassamento del cavo per entrambe le gallerie con un volume perso pari allo 0,6% con intervento di consolidamento;
- rilassamento del cavo per il binario pari con un volume perso dello 0,3% e del binario dispari dello 0,6% con intervento di consolidamento.

In Figura 22 sono riassunte le deformate ricavate.

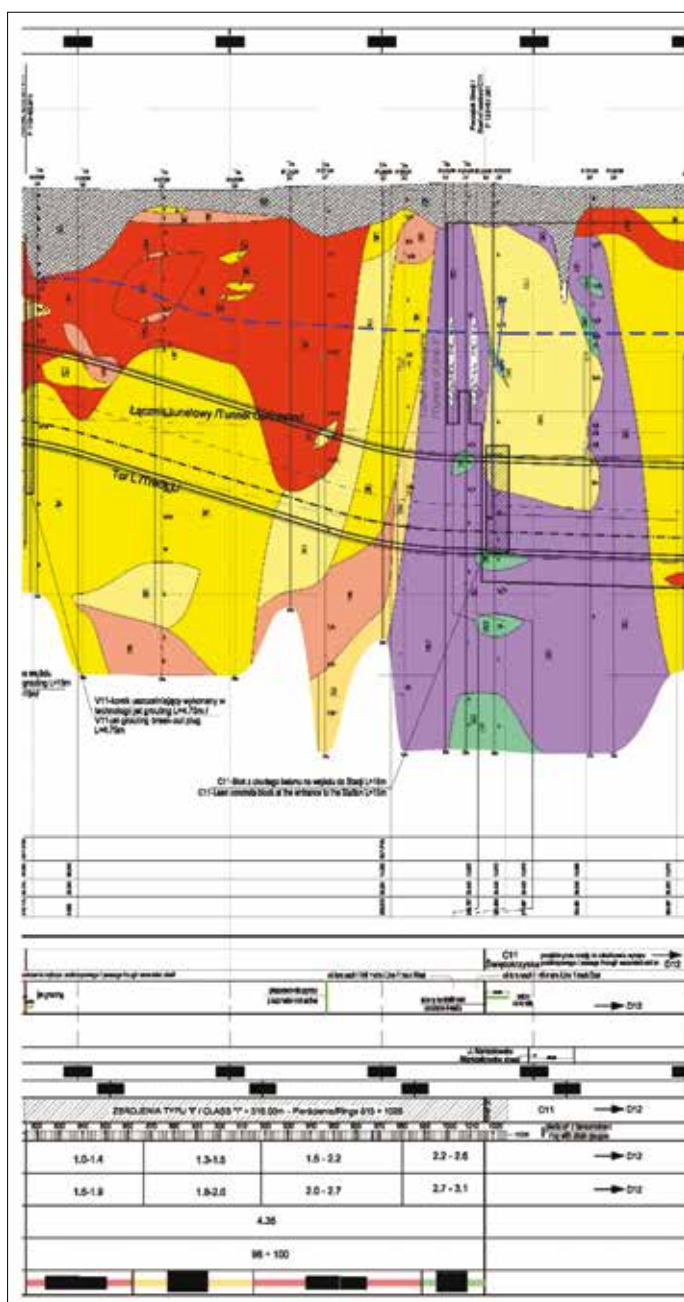
La verifica della galleria in senso longitudinale ha riguardato essenzialmente la struttura di fondazione contenente i binari della Linea I. Cautelativamente, ai fini della verifica, si



22. Le deformate ricavate della Linea I



24. Il momento risultante sulla struttura di fondazione



	Layer No.	Main type of soil	I <sub>v</sub> /D <sub>r</sub>	I <sub>v</sub> /I <sub>l</sub>	I <sub>p</sub>	Number of layer	Prevailing kind of soil (acc. PN-86/B-02480)
Tertiary	Ia	L, I <sub>n</sub> , G <sub>z</sub>	-	<0.15	>0.1	Ia	High plasticity clays, high plasticity silty clays and more plastic clays
	Ib	G, G <sub>n</sub> , II	-	<0.15	<0.4	Ib	Clays, silty clays and silts
	Ic	P <sub>n</sub> , Pd, Ps	>0.7	-	-	Ic	Medium, fine and silty sands
Quaternary	IIa	P <sub>n</sub> , Pd	<0.4	-	-	IIa	Fine and silty sands
	IIb		0.4-0.7	-	-	IIb	
	IIc		>0.7	-	-	IIc	
	IIIa	P <sub>s</sub> , Pr	<0.7	-	-	IIIa	Medium and coarse sands
	IIIb		>0.7	-	-	IIIb	
	IV	P <sub>o</sub> , Z	>0.5	-	-	IV	Gravels and sand-gravel mixtures
	Va	G, G <sub>p</sub>	=	>0.25	<0.2	Va	Clays and Sandy clays
	Vb		-	<0.25	<0.2	Vb	
	Vc	G <sub>n</sub> , G <sub>x</sub>	-	<0.2	>0.2	Vc	More plastic clays, more plastic silty clays, silty clays
	VI	P <sub>g</sub> , II	-	>0.1	<0.2	VI	Sandy clays, silts
	VIIa	N <sub>mp</sub>	>0.3	-	-	VIIa	Sandy muds
	VIIb	N <sub>mg</sub>	-	>0.1	-	VIIb	Clayey muds
VIII	nN	-	-	-	VIII	Anthropogenic fills	

25. Il profilo con parametri di scavo

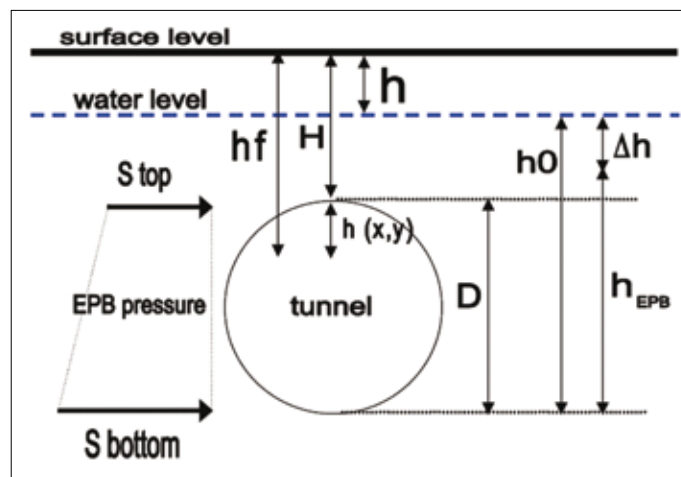
è deciso di tenere in considerazione lo scenario peggiore, ossia senza l'effetto benefico dell'intervento di consolidamento, per verificare la struttura secondo la deformata longitudinale più conservativa.

I cedimenti longitudinali ricavati dall'analisi Flac condotta sono stati inseriti in un modello della soletta di fondazione sviluppato con il programma di calcolo Sap 2000. In particolare, una volta modellata la struttura di fondazione sono stati imposti gli spostamenti a simulare la deformata calcolata con le analisi numeriche Flac. La struttura di fondazione, in accordo con le reali condizioni presenti, è stata modellata con una sezione di 3,00 m per 0,45 m. In Figura 23 viene mostrata la deformata imposta. Nella Figura 24 viene mostrato il momento risultante da questa modellazione (massimo pari a 555.600 daNm).

La massima sollecitazione calcolata è risultata essere pertanto pari a  $S_{ct} = M/W = 555.600 \text{ daNm} / [(300 \cdot 452) / 6] \text{ cm}^3 = 5,5 \text{ daN/cm}^2 = 0,55 \text{ MPa}$ . Considerando un fattore amplificativo di 1,35, relativo ai carichi permanenti, la verifica finale è risultata  $S_D = 0,55 \text{ MPa} \cdot 1,35 = 0,74 \text{ MPa} < f_{ctd} = 0,86 \text{ MPa}$  e pertanto soddisfatta, essendo stata considerata molto cautelativamente - ai fini della verifica - la classe di calcestruzzo C16/20.

Un ulteriore importante passaggio progettuale ha riguardato la determinazione dei parametri macchina da utilizzare. Come già evidenziato nello studio di diagnosi, si era evidenziata la necessità di mantenere il terreno al contorno e al fronte di scavo in condizioni il più possibile indisturbate, in termini sia tensionali che deformativi. La scelta di avanzare utilizzando una TBM chiusa in grado di esercitare un'adeguata contropressione sul fronte di scavo (sistema EPB) per annullare, da un lato, l'effetto delle "perdite di volume" in fase d'avanzamento tipiche dello scavo meccanizzato (allentamenti nel terreno al contorno del cavo e risentimenti in superficie) e contrastare, dall'altro lato, l'ingresso di acqua in pressione in galleria, in corrispondenza delle zone a più elevata permeabilità era sicuramente sembrata la scelta più adeguata.

I parametri di spinta sono stati ricavati utilizzando il principio delle tensioni efficaci, utilizzando una media tra il coefficiente di spinta a riposo e il coefficiente di spinta attiva. Tali parametri sono stati tarati anche con le modellazioni numeriche effettuate,



26. La pressione idraulica rispetto al sensore di riferimento



descritte in precedenza, per verificare la congruenza tra le formulazioni empiriche e i parametri derivanti dalle analisi numeriche stesse. I due valori così ricavati sono stati presi come il limite di allarme inferiore e superiore delle pressioni che le TBM hanno dovuto mantenere all'interno della camera di scavo. I parametri di iniezione della miscela bicomponente a tergo dello scudo, sono stati definiti aumentando tali valori di 0,5 bar:

$$\sigma'_h = [\gamma_{nat}(H+h(x,y)) - \gamma_w \cdot H_f] \cdot (K_0 - K_a); \sigma_h = \sigma'_h + u \quad (1)$$

dove (Figura 26):

$\gamma_{nat}$  = peso specifico del terreno;

$\gamma_w$  = peso specifico dell'acqua;

$h_{(x,y)}$  = distanza tra il sensore di riferimento e la calotte del tunnel;

$H$  = copertura rispetto alla calotte del tunnel;

$H_f$  = battente idraulico sul sensore di riferimento;

$u$  = pressione idraulica rispetto al sensore di riferimento.

I parametri determinati sono stati rappresentati in un profilo geomeccanico (Figura 25).

### La fase di verifica e di controllo in corso d'opera

Come prescritto dall'approccio ADECO-RS, le pressioni di progetto sono state verificate in corso d'opera attraverso un monitoraggio eseguito in tempo reale. In particolare, il normale approccio per tutta la linea scavata a Varsavia è stato quello di controllare e graficizzare due tipologie principali di parametri.

I parametri puntuali acquisiti ogni 10 secondi e graficizzati per ogni tipo di spinta (process) e i parametri di spinta medi sono acquisiti come valori minimi massimi e medi su tutta l'intera durata della spinta. Per ogni spinta si è controllata la rispondenza tra i parametri di progetto e quelli reali in termini di:

- pressioni al fronte;
- pressioni a tergo della miscela bicomponente;
- volume di miscela iniettata;
- volume di scavo del materiale estratto.

Inoltre, per avere un controllo su ulteriori parametri di spinta sensibili per ogni avanzamento si sono verificati:

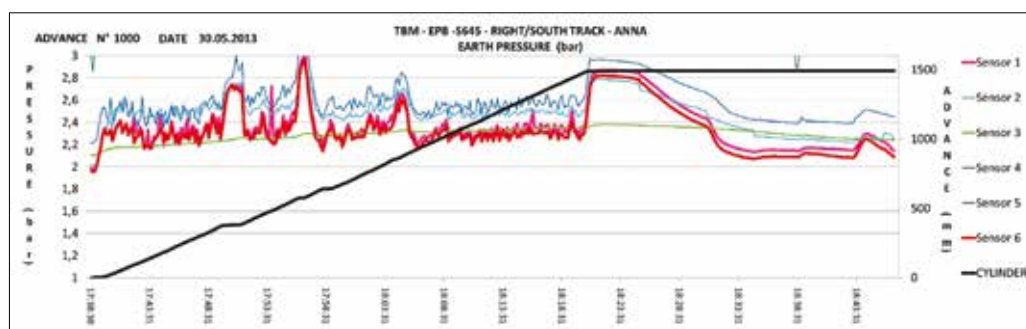
- quantità di schiume e acqua iniettata;
- forza e coppia di penetrazione della TBM;

- forza totale di spinta;
- velocità di avanzamento;
- velocità e coppia dello screw conveyor.

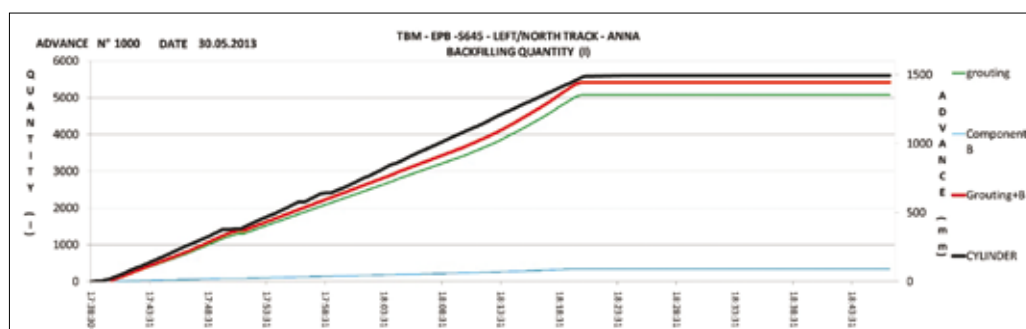
Ogni cambio dei parametri standard per ogni spinta è stato analizzato con il management della TBM in tempo reale.

In Figura 27 viene mostrato un grafico tipo della pressione al fronte. A parte qualche piccola fluttuazione, si nota come i parametri dei sensori 1 e 6 (sensori superiori) rispettino le condizioni di progetto date tra i 2,2 bar e 2,6 bar. Anche il volume di terreno scavato e le quantità di miscela iniettata a tergo sono stati verificati in tempo reale. Le quantità di miscela bicomponente iniettate sono risultate in linea o superiori con quelle teoriche, indice di un riempimento uniforme del gap tra profilo di scavo e estradosso anello (Figura 28). Il volume di materiale scavato, controllato mediante le due bilance all'uscita della coclea, è nei valori compresi tra le soglie di attenzione (Figura 29).

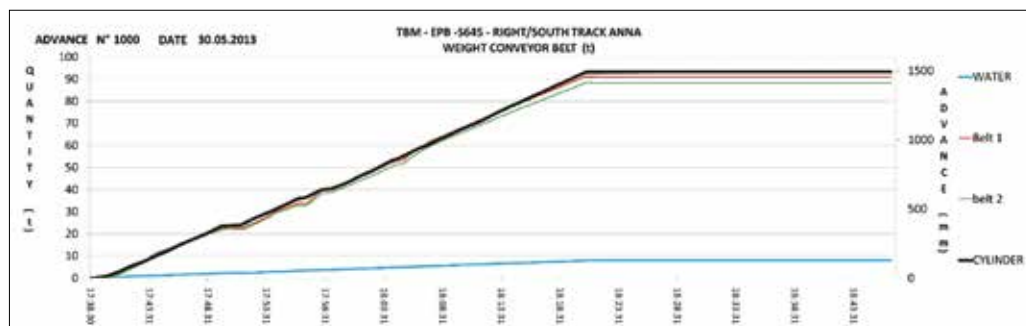
Nelle Figure 30, 31, 32, 33 e 34 vengono riportate le risultanze del monitoraggio su alcuni dei principali allineamenti presenti all'interno delle gallerie esistenti. Al passaggio delle due TBM, il



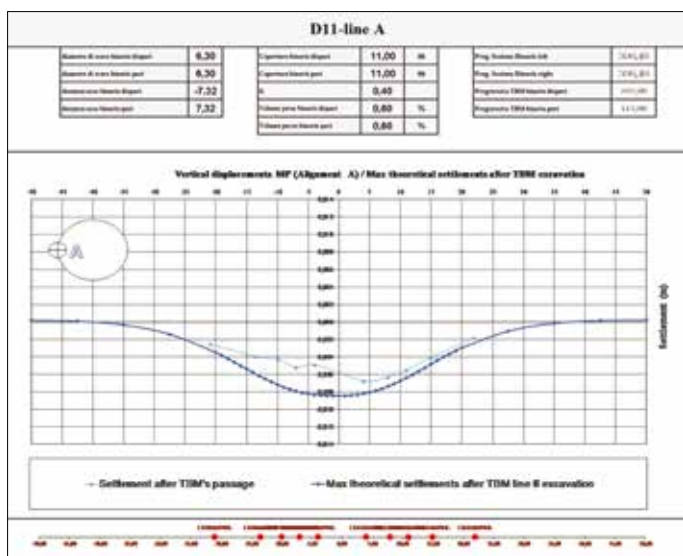
27. Un grafico tipo della pressione al fronte



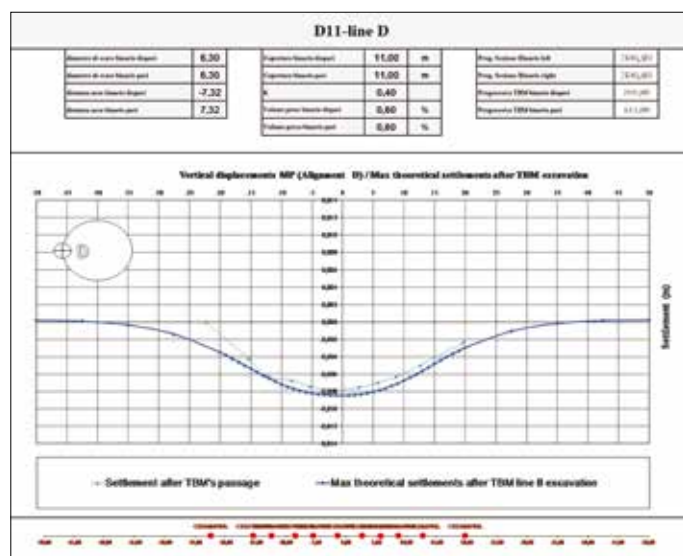
28. L'indice di un riempimento uniforme del gap tra profilo di scavo e estradosso anello



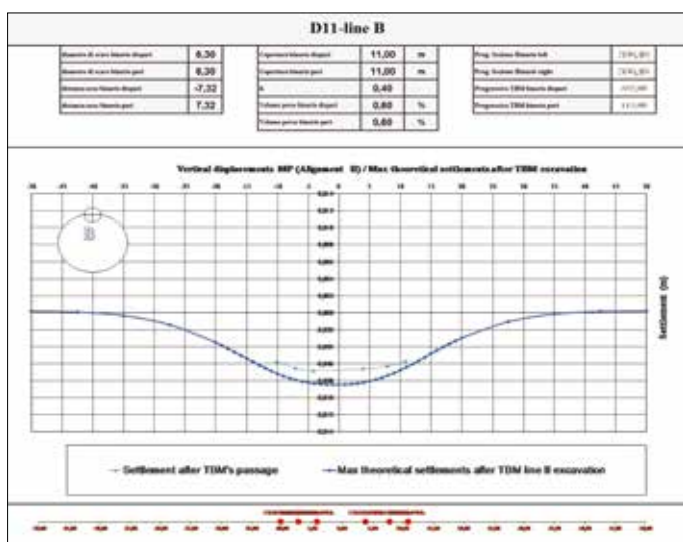
29. I valori compresi tra le soglie di attenzione



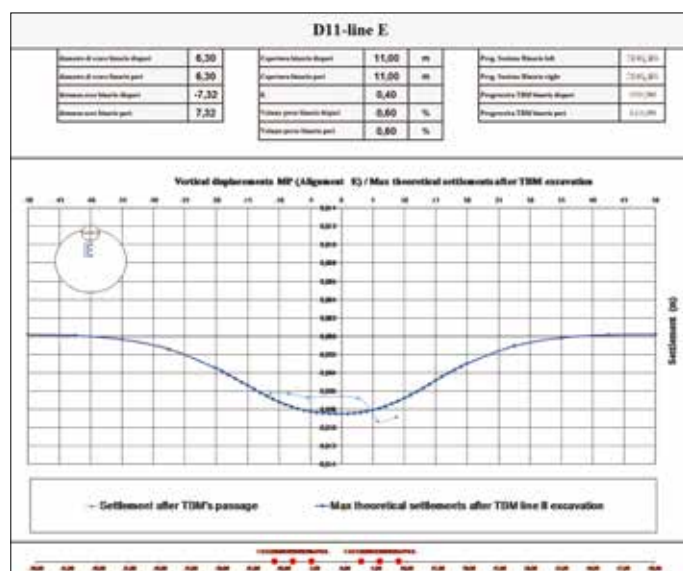
30. Il monitoraggio della linea esistente (allineamento A)



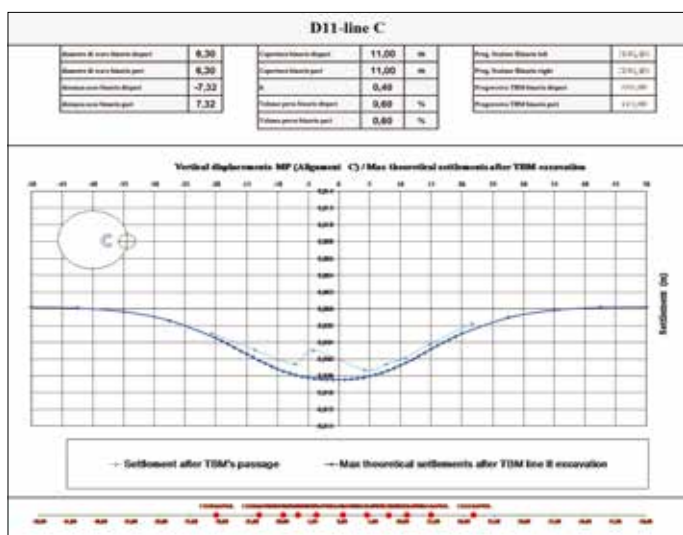
33. Il monitoraggio della linea esistente (allineamento D)



31. Il monitoraggio della linea esistente (allineamento B)



34. Il monitoraggio della linea esistente (allineamento E)



32. Il monitoraggio della linea esistente (allineamento C)

cedimento massimo è risultato in linea con quello previsto in fase di progetto. Infatti, i cedimenti registrati sono stati dell'ordine medio degli 8 mm, come previsto in progetto.

**CONCLUSIONI**

Per la realizzazione delle gallerie della Linea II della nuova Metropolitana di Varsavia si sono dovuti eseguire diversi sottopassaggi difficili. Uno dei più critici è stato quello al di sotto la Linea I esistente, eseguito in scavo meccanizzato, costituita da conci in ghisa bullonati tra loro, con una distanza tra le gallerie nuove e quelle esistenti di soli 3,00 m.

Il progetto, sviluppato secondo l'approccio progettuale ADECO-RS, ha rappresentato un successo in termini di risultati attesi. In particolare, tutte le previsioni progettuali sono state confermate e ciò ha consentito di realizzare il sottopassaggio con normali livelli di produzione e con l'interruzione del servizio della Linea I esistente limitato a pochi giorni.





35. Il break in della TBM alla stazione Świętokrzyska

La nuova linea della metropolitana è stata rivestita con segmenti prefabbricati aventi le seguenti caratteristiche:

- diametro esterno: 6,00 m;
- diametro interno: 5,4 m;
- spessore rivestimento: 0,30 m;
- lunghezza media dei segmenti: 1,50 m;
- numero di segmenti: 5+1 (chiave).

<sup>(1)</sup> Amministratore Delegato di Rocksoil SpA

<sup>(2)</sup> Direttore Tecnico di Rocksoil SpA

<sup>(3)</sup> Project Manager di Rocksoil SpA

<sup>(4)</sup> Responsabile Assistenza Tecnica in sito di Rocksoil SpA

## Ringraziamenti

Un ringraziamento all'Ing. Fabrizio Carriero di Astaldi SpA e all'Ing. A. Wudzka di Rocksoil SpA. Si ringraziano anche gli Ingg. F.P. Scaglione, A. Cattaneo e F. Bizzi del Consorzio AGP. Un ringraziamento particolare va a tutto il Team TBM di AGP nelle persone dei Geom. F. Concio, M. Gasbarra e degli Ingg. M. Barbanti, D. Atzori, T. Grosso, A. Ozturk e L. Magaldi e a tutti gli operatori che si sono distinti durante tutte le lavorazioni. Un ulteriore ringraziamento a tutto il Team di monitoraggio IMG nelle persone di Pasquale Melillo, Marco Bonanno, Leonardo Lia e Gianluca Natalia per la competenza e la dedizione dimostrate.

## DATI TECNICI

**Stazione Appaltante:** Comune di Varsavia

**Contraente Generale:** Consorzio AGP Metro Polska

**Project Manager:** Francesco Scaglione del Consorzio AGP (Direzione), Marco Barbanti del Consorzio AGP (TBM) e Andrea Canzoneri di Rocksoil SpA (progettazione)

**Progetto preliminare:** Konsorcjum, lider Metroprojekt Sp. z o.o. AMC członek Andrzej M. Chołdzyński Sp. z o.o.

**Progetto definitivo:** ILF Consulting Engineers Polska Sp. z o.o.

**Progetto esecutivo:** ILF Consulting Engineers Polska Sp. z o.o.

**Collaudo:** Wojewódzki Inspektor Nadzoru Budowlanego Jaromir Grabowski

**RUP:** Dariusz Kostaniak e Leszek Mrozik

**Direzione dei Lavori:** Metro Varsavia

**Responsabile Sicurezza:** Marcin Borek

**Direzione di Cantiere:** Paweł Skorupa

**Esecutori dei Lavori:** AGP Metro Polska Astaldi SpA, Gülermak Ağır Sanayi İnşaat ve Taahhüt A.Ş., Przedsiębiorstwo Budowy Dróg i Mostów Mińsk Mazowiecki, sp. z o.o. s.c.

**Importo dei lavori:** 800.000.000 Euro

**Data di consegna:** 8 Marzo 2015

## Bibliografia

- [1]. P. Lunardi - "Progetto e costruzione di gallerie", Hoepli, 2006.
- [2]. P.B. Attewell, I.W. Farmer - "Ground deformations resulting from tunneling in London Clay", Canadian Geotechnical Journal, vol. 11, n° 3, pp. 380-395, 1974.
- [3]. G. Anagnostou - "The effect of tunnel advance rate on the surface settlements", The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advance in Geomechanics (IACMAG), 1-6 Ottobre 2008, Goa, India.
- [4]. M. D. Boscardin, E. J. Cording - "Building response to excavation-induced settlement", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 115, n° 1, pp. 1-21, 1989.
- [5]. J.B. Burland, C.P. Wroth - "Review paper: settlement of buildings and associated damage", Proceedings of the Conference on Settlement of Structures, Cambridge, 611-654, Pentech, London, 1974.
- [6]. M.P. O'Reilly, B.M. New - "Settlements above tunnels in the United Kingdom - Their magnitude and prediction", Proc. Tunneling '82 Symp., London, pp. 173-181, 1982.
- [7]. R.B. Peck - "Deep excavation and tunnelling in soft ground", Proc. 7th ICSMFE, Mexico City, State-of-the-Art Volume, pp. 225-290, 1969.
- [8]. B. Schmidt - "Settlements and ground movements associated with tunnelling in soil", PhD Thesis, University of Illinois, pp. 224, 1969.
- [9]. R.J. Mair, R.N. Taylor, J.B. Burland - "Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground", eds. R.J. Mair and R.N. Taylor, Balkema, Rotterdam, 713-718, 1996.