

Metropolitana di Torino, LINEA 1

Lo scavo della galleria con TBM-EPB nel Lotto 2 della seconda tratta

EMILIO AVITABILE ^a, GIACOMO BECCARIA ^b, GIAMPIERO CARRIERI ^b, VITTORIO GUGLIELMETTI ^c, PAOLO PEDICONI ^d, PIERO SARTORE ^d

La seconda tratta della Linea 1 della Metropolitana Automatica di Torino collegherà la stazione di Torino Porta Nuova con la Stazione Lingotto. Per una lunghezza pari a circa 3 km lo scavo della galleria è effettuato con una TBM-EPB. I lavori sono iniziati il 9 Aprile 2008 ed il 14 di ottobre 2008 è stato abbattuto l'ultimo diaframma della prima subtratta tra le Stazioni Marconi e Nizza. Tenedo conto delle peculiari caratteristiche dei terreni entro cui si realizza la galleria e sulla base dell'esperienza maturata durante la realizzazione delle prima tratta, nella prima parte della subtratta Marconi e Nizza, è stata effettuata un'ampia sperimentazione mirata all'ottimizzazione dei parametri di scavo, con particolare riferimento alla configurazione degli utensili sulla testa TBM ed al condizionamento del terreno. Il controllo dello scavo e l'effetto dello stesso sulle strutture esistenti e sulla sede viaria sotto cui è collocata la galleria, è stato sempre effettuato in tempo reale con l'ausilio del "Portale di Commessa" ovvero un sistema che permette l'acquisizione in continuo sia dei parametri TBM sia dei dati di monitoraggio e li mette a disposizione, attraverso una piattaforma Web GIS, di tutti gli addetti ai lavori. In questo modo è stato possibile individuare immediatamente le situazioni anomale ed agire prontamente con le necessarie azioni correttive

Le caratteristiche della Linea 1

La linea 1 della Metropolitana Automatica di Torino (Figura 1) si basa sul sistema VAL (Véhicule Automatique Léger) già utilizzato con successo nelle metropolitane di Parigi, Lille, Tolosa, Rennes, Chicago e Taipei. Con questo sistema la marcia dei treni, che non hanno a bordo alcun

conducente, è regolata da una serie di computers localizzati in un Posto Centrale Operativo, che per la Linea 1 è ubicato nei pressi della Stazione Fermi, costituente il centro del sistema di trasporto automatico. Il Committente dell'intera Linea 1 è: GTT Gruppo Torinese Trasporti S.p.A. Progetto Metro, il progetto e la relativa esecuzione sono stati suddivisi in 4 tratte:

- la prima, già in esercizio, è stata progettata dall'ATI Systra-Geodata, ha lunghezza di 9,5 km ed è compresa tra le stazioni Fermi e Porta Nuova; oltre alla galleria di linea include 15 stazioni, 15 pozzi di ventilazione

e 2 interconnessioni con le linee ferroviarie che attraversano la città. La realizzazione della galleria è avvenuta prevalentemente per mezzo di 3 frese a piena sezione del tipo a contropressione di terra (EPB-TBMs). I lavori di costruzione di questa prima tratta sono iniziati nel novembre del 2000. L'esercizio della linea tra le stazioni Fermi e XVIII Dicembre è avvenuta nel dicembre 2005, alla vigilia dei Giochi Olimpici Invernali "Torino 2006", mentre tra le stazioni XVIII Dicembre e Porta Nuova è avvenuta nell'ottobre 2007.

- la seconda tratta, attualmente in

^a GTT Gruppo Torinese Trasporti S.p.A. Progetto Metro, Torino

^b Geodata S.p.A, Torino

^c Freelance consultant, Piacenza

^d Ghella SpA - Tecnimont SpA Construction Consortium, Roma

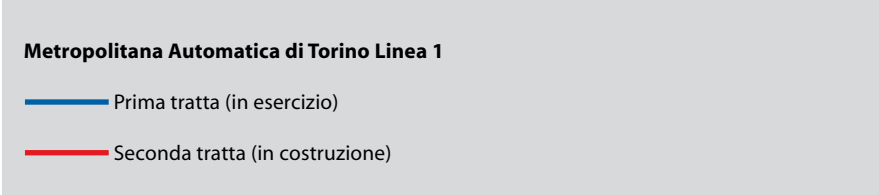


Figura 1 - Planimetria della prima e della seconda tratta della Linea 1 Metropolitana Automatica di Torino

costruzione, è stata progettata dall'ATI Systra-Geodata-Metropolitana Milanese - Studio Quaranta che svolge l'incarico di Direzione dei Lavori; la tratta ha lunghezza di circa 3,7 km, è compresa tra la stazione di Porta Nuova e la stazione Lingotto; include 6 stazioni, 7 pozzi di ventilazione ed una interconnessione con la linea ferroviaria;

- la terza e la quarta tratta, che costituiranno gli ulteriori prolungamenti verso sud e verso ovest sono attualmente in fase di progettazione.

La seconda tratta della Linea 1

Il tracciato della seconda tratta della Linea 1 si sviluppa pressochè interamente al di sotto di una delle arterie stradali più importanti di Torino (via Nizza), con affacci minimi tra gli edifici paria 14.00 m,

densamente trafficata e sulla quale si affacciano numerosissimi esercizi commerciali; conseguentemente le scelte progettuali relative all'ubicazione delle stazioni e dei pozzi, alle metodologie di scavo ed alle fasi costruttive, hanno tenuto il più possibile in conto della necessità di minimizzare l'impatto dei lavori. La tratta 2 è stata contrattualmente suddivisa in 2 lotti: il primo (Lotto 1) che si estende dalla stazione Porta Nuova (esclusa) alla stazione Marconi (esclusa), comprende

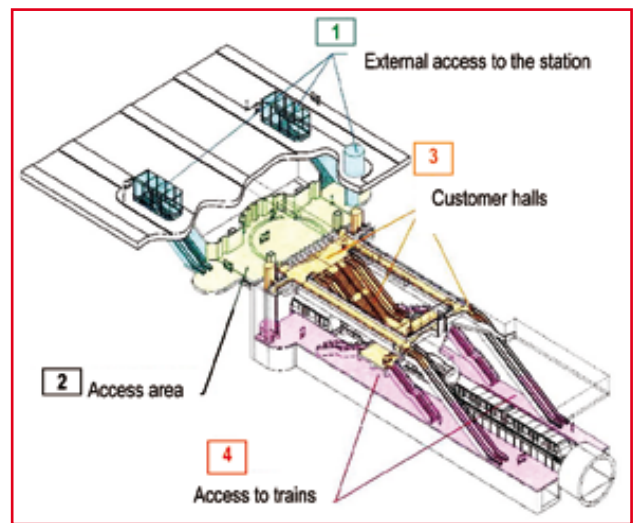


Figura 3 - Schema funzionale generale delle sei stazioni comprese nel Lotto 2 di una stazione tipo



Figura 2 - Il calaggio della testa TBM-EPB in stazione Marconi

circa 700 m di galleria sia naturale che artificiale ed attualmente è in avanzata fase di costruzione; il secondo (Lotto 2: dalla stazione Marconi alla stazione Lingotto) che è appaltato all'ATI Tecnimont S.p.A. e Ghella S.p.A, comprende circa 3 km di galleria naturale realizzata con l'utilizzo di una EPB-TBM (Figura 2).

Le 6 stazioni comprese nel Lotto 2 (si veda lo schema funzionale riportato in Figura 3) saranno tutte in sotterraneo; realizzate tra paratie in diaframmi scavati con idrofredde.

Contemporaneamente ai diaframmi vengono realizzati i consolidamenti sia del fondo stazione che delle zone di in-out TBM. Successivamente, dopo aver costruito la soletta di copertura e restituito alla città le aree di superficie, si procede con gli scavi di approfondimento intervallati dalle solette intermedia e di fondo; infine si realizzano le fodere interne e quindi gli impianti e finiture. Il tracciato

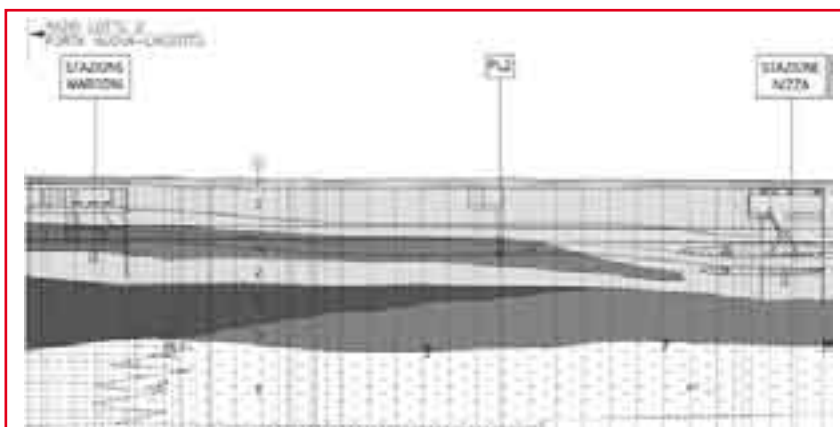


Figura 5 - Profilo geotecnico della subtratta Marconi - Nizza: in grigio chiaro i terreni a predominanza della componente ghiaiosa (unità 2), in grigio scuro quelli a predominanza della componente sabbioso-ghiaiosa (unità 3)

del Lotto 2 ha un andamento pressoché rettilineo, nella sua parte terminale, in approccio alla stazione Lingotto, sono presenti curvature orizzontali e verticali di raggio minimo pari a 600 m circa. La necessità di rispettare alcune preesistenze non modificabili, quali collettori fognari di grande diametro, sottopassi stradali, ecc. hanno imposto la realizzazione di tratti con forte pendenza longitudinale (fino al 6%).

Il contesto geologico del Lotto 2

Il terreno di Torino

Il territorio di Torino si estende per circa l'80% su un'area semi-pianeggiante costituita dagli apporti successivi delle conoidi alluvionali poste allo sbocco delle valli alpine della Dora Riparia e della Stura di Lanzo. Le conoidi alluvionali sono costituite da depositi di

origine fluvioglaciale, successivamente rimaneggiati e rimodellati, almeno nei livelli più superficiali, dai corsi d'acqua che attraversano il territorio comunale (Figura 4). Gli apporti di materiali a granulometria più fine (limi sabbiosi e/o argillosi), presenti in lenti all'interno delle ghiaie, sono attribuibili al fiume Po, caratterizzato in questa tratta da una limitata capacità di trasporto. I depositi di origine fluvioglaciale e fluviale formano lo strato superficiale di vasta parte del territorio comunale di Torino. Le ghiaie, che rappresentano la frazione avente la maggior rilevanza in termini percentuali, si accompagnano a ciottoli (anche di dimensioni pluridecimetriche), sabbie medio-grossolane e livelli lentiformi limoso-argillosi (Figura 5). Le dimensioni dei ciottoli sono molto variabili, potendo raggiungere, talvolta, carattere di veri e propri trovanti. Il diametro di 10-30 cm è quello maggiormente rappresentato. Marconi - Nizza: in grigio chiaro i terreni a predominanza della componente ghiaiosa

(unità 2), in grigio scuro quelli a predominanza della componente sabbioso-ghiaiosa (unità 3). La peculiarità di questi depositi è data dalla presenza di cementazione, che varia di grado sia in profondità che lungo lo sviluppo complessivo dell'opera.

Nel caso specifico, le indagini svolte hanno evidenziato l'esistenza di livelli a differente

grado di cementazione. È da sottolineare anche la presenza localizzata di lenti costituite prevalentemente da ciottoli in matrice sabbiosa, caratterizzate da cementazione molto elevata (la così detta "puddinga"), questo tipo di terreni ha causato numerose difficoltà negli scavi delle stazioni sino ad oggi eseguiti.

Aspetti geotecnici ed idrogeologici

La complessità del progetto ed il particolare contesto geologico hanno richiesto numerose indagini nonostante il quadro conoscitivo delle precedenti fasi progettuali e l'esperienza realizzativa della prima tratta. In particolare in corrispondenza delle stazioni e lungo la galleria sono stati realizzati sondaggi geognostici a carotaggio continuo che, unitamente a prove di laboratorio su campioni prelevati dai medesimi, hanno permesso la caratterizzazione in "Unità geotecniche" riportata nella Tabella 1.



Figura 4 - Il "tipico" terreno presente nel sottosuolo di Torino (ghiaie e sabbie con ciottoli e trovanti in una matrice siltosa)

Unità ed descrizione	γ_s (kN/m ³)	R^* (MPa)	ν	ϕ^* (°)	c^* (kPa)	c_u (kPa)
Unit 1 - Superficial ground	17 - 19	8 - 17	0,30 - 0,35	30 - 38	0	
Unit 2 - Gravel and sand, loose or slightly cemented	15 - 21	150 - 170	0,30 - 0,35	35 - 37	0 - 20	
Unit 2a - Silt and sand, slightly clayey	18 - 20	5 - 15	0,30 - 0,35	28 - 30	5 - 15	50 - 10
Unit 3 - Gravel and sand, low to medium degree of cementation	19 - 22	170 - 200	0,30 - 0,35	35 - 37	20 - 50	
Unit 4 - Gravel and sand, medium to high degree of cementation	19 - 22	200 - 260	0,20 - 0,40	35 - 42	50 - 140	
Unit 5 - Silt, with traces of clay, sand and gravel	19 - 21	50 - 105	0,30 - 0,35	20 - 25	40 - 45	100 - 150
Unit 6 - Sandy silt, slightly clayey	18 - 20	60 - 125	0,30 - 0,35	27 - 36	25 - 35	100 - 300

Tabella 1 - Le Unità geotecniche ed i relativi parametri riconosciute lungo il tracciato della seconda tratta Linea 1

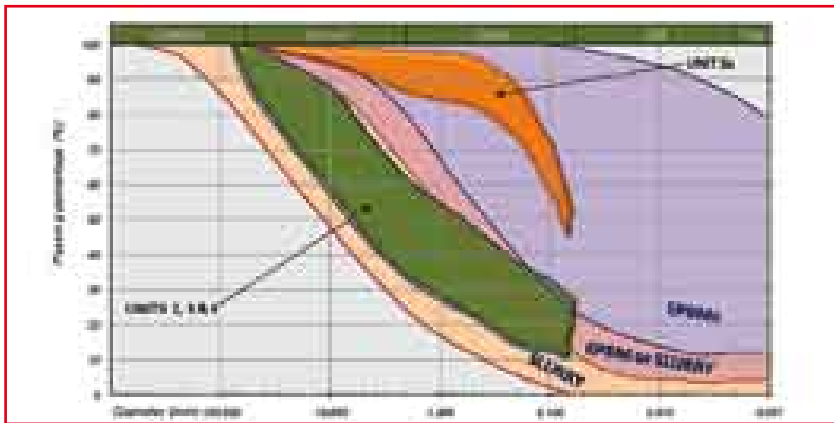


Figura 6 - Distribuzione granulometrica dei terreni interessati dai lavori di scavo galleria nel Lotto 2 con evidenza dei limiti di applicazione per TBM tipo EPB e SLURRY

I terreni interessati dai lavori sono stati classificati anche in funzione del loro grado di cementazione, parametro che ha notevole influenza sul comportamento meccanico, tanto a livello di resistenza che di deformabilità. La presenza di cementazione, insieme alle caratteristiche granulometriche, ha condizionato infatti la scelta della metodologia di scavo, degli interventi di consolidamento e la definizione stessa dei parametri geotecnici. Le prove di laboratorio hanno messo in evidenza l'elevata eterogeneità granulometrica del terreno di Torino con netta prevalenza delle frazioni più grossolane (si veda la Figura 6). In particolare i terreni appartenenti alle Unità geotecniche 2, 3 e 4 sono granulometricamente al "limite" del campo di applicazione di TBM tipo EPB.

Nonostante questa condizione, e sulla base dell'esperienza maturata in un contesto analogo nella realizzazione delle gallerie nella prima tratta, anche per lo scavo della galleria compresa nel Lotto 2 è stata scelta una TBM del tipo EPB, pertanto hanno assunto importanza fondamentale: lo studio del corretto condizionamento del terreno da scavare, la conformazione geometrica della testa fresante e la relativa disposizione degli utensili di scavo, nonché il controllo dei parametri di scavo. Relativamente agli aspetti idrogeologici, data la prevalente frazione grossolana del terreno, la permeabilità è sempre molto elevata, variando tra 1×10^{-3} m/s e 1×10^{-4} m/s.

Il tetto della falda più superficiale si colloca a una profondità variabile tra i 14 e 16 metri

dal piano campagna interessando quindi la galleria con pressioni idrostatiche massime pari a 1 bar. L'oscillazione massima stagionale della falda misurata nei diversi fori di sondaggio attrezzati a piezometro è contenuta entro un metro.

Lo scavo della galleria con TBM

Caratteristiche della TBM

La costruzione della galleria tra le stazioni Marconi e Lingotto è eseguita con una Herrenknecht EPBMs (modello S-415, si

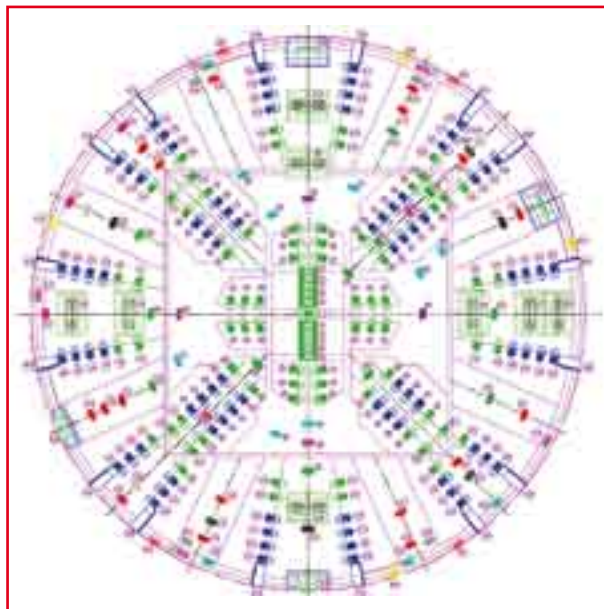


Figura 7 - La testa della EPBMs S415 nella sua configurazione originale: sono presenti 80 rippers, 132 scrapers e 12 cutters



Figura 8 - La testa della EPBMs S415 in fase di montaggio

vedano le principali caratteristiche elencate in Tabella 2) che è già stata impiegata per realizzare 4.650 m di galleria metropolitana a Tolosa e 1.800 m di condotta fognaria a Parigi. Conseguentemente prima del suo utilizzo a Torino, la TBM è stata sottoposta a revisioni (le principali sul cuscinetto, la testa fresante, e martinetti di spinta),

modifiche (sull'erettore, sulla coclea e i sensori di pressione). Inoltre, è stata progettata ed adattata al quadrante centrale la parte esterna della testa fresante (Figure 7 e 8). La necessità di adattare i parametri di condizionamento alle variabilità delle condizioni incontrate ha reso necessario un sistema estremamente flessibile, in grado di utilizzare e dosare con precisione differenti prodotti contemporaneamente. Quanto sopra ha portato ad installare sulla TBM tre diversi impianti, in grado di lavorare autonomamente o contemporaneamente, quindi

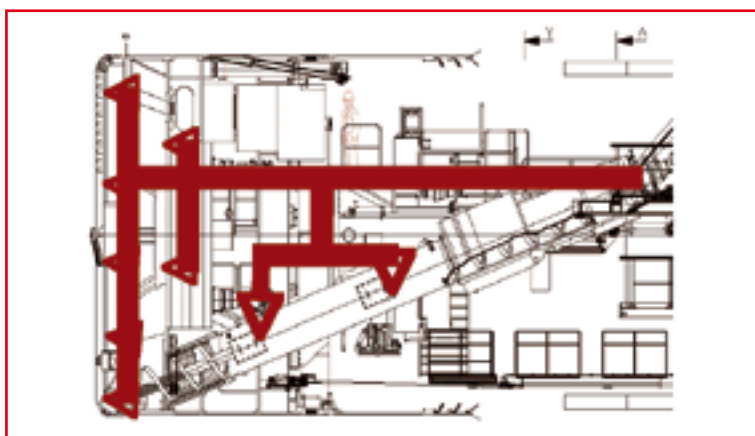


Figura 9 - Sezione della EPBM S415 con evidenza dei punti di iniezione per il condizionamento del terreno scavato: testa, camera e coclea

in grado di gestire contemporaneamente differenti agenti condizionanti, miscelandoli o utilizzandoli separatamente attraverso linee di iniezione presenti: al fronte di scavo, nella camera di scavo e lungo la coclea di estrazione (Figura 9).

Le linee per le schiume sono 9, di cui 4 sul perimetro esterno al quadrante centrale in testa, 1 sul “naso”, 2 interna alla camera di scavo e 2 all’interno della coclea.

Prima di affrontare i terreni di Torino, la EPBM S415 è stata altresì dotata di una linea supplementare per l’iniezione (automatica) di bentonite in camera di scavo da attivare nel caso si verificano riduzioni di pressione oltre i limiti di attenzione stabiliti.

La testa fresante è stata “vestita” prestando particolare attenzione alla protezione dalle usure.

Gli utensili sono stati studiati per poter essere facilmente adattati alle locali condizioni del terreno previste tra due stazioni successive. In particolare la disposizione dei disc cutters è intercambiabile con i rippers.

Il rivestimento della galleria

Il rivestimento della galleria è costituito da anelli (diametro esterno 7480 mm) formati da 6 conci (denominati: A1, B1, C1, E1, C2, B2, si veda la Figura

10) prefabbricati di tipo universale (spessore 30 cm, lunghezza media 1,400; min. 1380 mm, max. 1420 mm).

Il collegamento anello – anello è ottenuto tramite 15 connettori tipo “Biblock” mentre tra concio e concio dello stesso anello è presente una barra guida in PVC. Ciascun anello pesa oltre 23,6 t ed ha un volume di circa 9,5 m³.

I conci sono prefabbricati nello stabilimento della IPA Precast S.p.A. di Pavia (Figura 11) e vengono trasportati via gomma al cantiere della stazione Marconi.

La massima tolleranza dimensionale prevista per i conci è pari a ± 1 mm

per la lunghezza e ± 0,5 mm per la larghezza.

L’impermeabilizzazione del rivestimento è ottenuta tramite guarnizioni tipo T128 - 50 ShA posizionate su ciascuno lato di tutti i conci.



Figura 10 - I sei conci prefabbricati che formano un anello completo per il rivestimento della galleria 2



Figura 11 - Particolare di uno dei casseri utilizzati nello stabilimento della IPA Precast di Pavia per la produzione dei conci di rivestimento galleria Lotto 2

General data	
Type of machine	EPB shield
Installed power	2995 kW
Total length (shield + backup)	89 m
Weight	342 t
Minimum curvature radius	200 m
Cutterhead	
Excavation diameter	7750 mm
Weight	75 t
Cutter discs (double)	12
Cutter discs diameter	432 mm (17")
Rippers	134
Engine description	
Electric motors	5
Power	2000 kW
Maximum number of rotations per minute	3 rpm
Torque (nominal)	7 031 kNm (240 bar)
Torque (maximum)	11 718 kNm (240 bar)
Torque for breakthrough	14 648 kNm (300 bar)
Number of main thrust cylinders	15 x 2
Stroke	2000 mm
Total thrust force	55 750 kN (350 bar)
Shield characteristics	
Frontal shield diameter	7750 mm
Frontal shield length	625 mm
Tail shield diameter	7730 mm
Tail shield length	4 000 mm
Screw conveyor characteristics	
Power	415 kW
Maximum rotation speed	22,4 rpm
Maximum torque	217,9 kNm (275 bar)
Torque for breakthrough	237,7 kNm (300 bar)
Conditioning Lines	2
Grout Lines	4
Exciter type	Vacuum system

Tabella 2 - Le principali caratteristiche tecniche della TBMS-415 che realizza la galleria del Lotto 2

La cantierizzazione

I cantieri a servizio della costruzione galleria con TBM sono localizzati essenzialmente in Largo Marconi (cioè in corrispondenza della futura stazione Marconi) e in Corso Marconi.

In Largo Marconi sono collocati:

1. tutti gli impianti a servizio della TBM (gru a torre, mixer, cabina elettrica, autotrasformatore, torre di raffreddamento, impianto di depurazione delle acque, impianto di ventilazione);
2. i conci di rivestimento galleria (circa 200 conci pari a 35 anelli);
3. gli impianti di smarino (carro-ponte e carosello) ed il vascone di raccolta per successivo allontanamento.

Lungo il sedime centrale di Corso Marconi, sono stoccati altri conci (circa 60 anelli) e trovano posto anche le officine ed i depositi degli ulteriori elementi indispensabili per garantire il lavoro con TBM (schiume, grassi, inserti, ecc.).

Inizialmente era stato previsto anche un impianto per la produzione della malta da collocarsi in prossimità dell'asola sud stazione Marconi, ma in funzione dell'impossibilità di operare in deroga ai

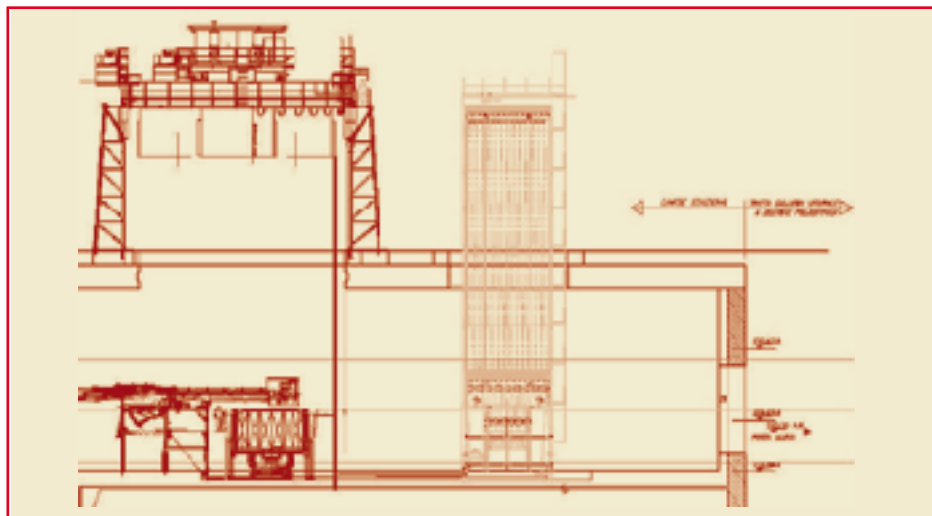


Figura 12 - Sezione della parte terminale di stazione marconi in fase di costruzione della galleria. Si notino il sistema di raccolta marino in cassoni, il carro-ponte per il sollevamento dei medesimi, la torre nastro

limiti di emissioni rumorose imposti dai regolamenti comunali, è stato necessario rivedere il lay-out del cantiere rinunciando anche all'impianto per le malte.

Il trasporto del marino, dalla TBM all'esterno, è realizzato tramite un sistema di nastri che, correndo all'altezza delle reni galleria, collega la macchina al sito di raccolta al fondo della stazione Marconi. Quest'ultimo è costituito da una serie

di cassoni montati su slitte: una volta che un cassone è stato riempito, viene automaticamente spostato per far posto ad uno vuoto, e sollevato fino in superficie tramite un carro ponte automatizzato che lo svuota all'interno di un vascone (vedere schema generale in Figura 12). Dati i modesti spazi a disposizione, il vascone è in grado di contenere il marino proveniente al massimo da due giorni di produzione.

MONITORAGGIO DELLA COSTRUZIONE

IL CONTROLLO IN TEMPO REALE DELLA COSTRUZIONE

Lo strumento principale utilizzato per la gestione del corso d'opera, con particolare riferimento al controllo dello scavo con TBM, è il Geodata Master System (GDMS: si veda lo schema concettuale riportato in Figura 16). Esso si basa sulla registrazione in continuo ed immediata visualizzazione

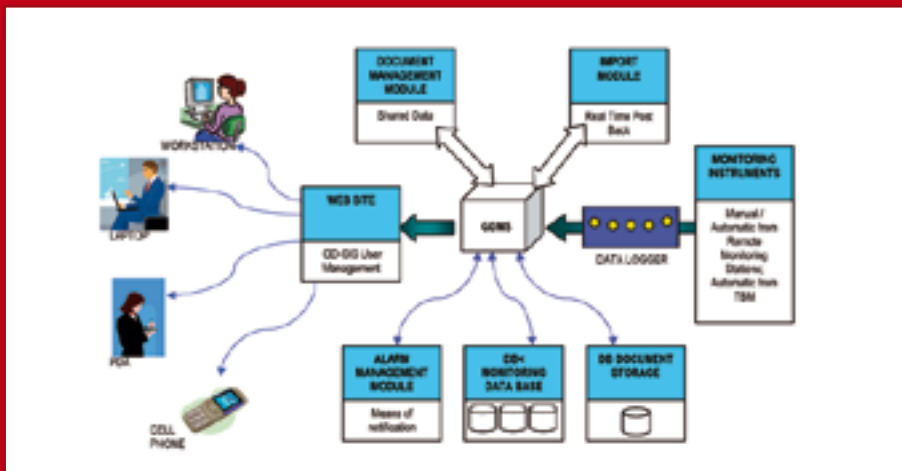


Figura 16 - Schema concettuale del GDMS

di tutti i parametri di scavo della TBM e di tutti i dati di monitoraggio su un apposito sito Web (Portale di Commessa), fruibile da tutti gli utenti autorizzati.

Attraverso il Portale di Commessa è possibile visualizzare in tempo reale ed in modo semplice tutti i parametri di scavo della TBM (per un totale di 125 parametri con 3 acquisizioni al minuto circa) nonché di metterli in relazione con i risultati dei monitoraggi; in questo modo è possibile una rapida interpretazione dei fenomeni in atto e quindi intervenire tempestivamente qualora necessario.

Particolare attenzione è rivolta all'analisi dei parametri macchina più impattanti sulla gestione della sicurezza dello scavo e direttamente correlati all'eventuale insorgenza di fenomeni deformativi in superficie.

Il peso di materiale estratto, le pressioni al fronte, la pressione e il volume di iniezione longitudinale sono costantemente sotto controllo e devono

Le acque che si raccolgono nel vascone, prima dell'immissione nella rete di scarico comunale, vengono depurate.

Il sistema di stoccaggio del nastro di smarino è di tipo verticale (torre nastro) ed ha una capacità di 450 m, in grado quindi di garantire un avanzamento in galleria per 225 m. Questo sistema è stato scelto perchè rispetto alla tipologia più classica "orizzontale", permette di superare le limitazioni dovute alla collocazione in spazi angusti, quali pozzi ed appunto stazioni interrato. Nel dettaglio, il trasporto del marino avviene con la seguente modalità:

- Il nastro riempie il cassone sotto il quale è posizionata una cella di pressione che fornisce un segnale al raggiungimento del peso previsto;
- L'operatore, ricevuto il consenso dal sistema, avvia il ciclo di cambio dei cassoni che avviene, in modo automatico;
- L'operatore aggancia il cassone pieno (sistema idraulico) ed appena ricevuto il consenso, il carro ponte lo solleva in superficie e si attesta in corrispondenza del vascone di smarino;
- L'operatore, tramite una telecamera,

visualizza l'area e rilascia il carico;

- Automaticamente il cassone si riporta nella posizione di attesa con il cassone in sospensione sopra i binari;
- Riprende il ciclo.

Le dimensioni all'interno dell'anello finito, che tenendo conto della carpenteria del back-up TBM, portano la larghezza utile a circa 2.20 m, unitamente alle relativamente elevate pendenze longitudinali, hanno portato alla scelta di mezzi gommati per il trasporto dei conci e della malta di intasamento, scelta che ha anche garantito la minimizzazione delle vibrazioni indotte dalla costruzione alla galleria.

Lo stesso principio ha portato alla scelta di effettuare l'allontanamento del marino tramite nastri.

Il montaggio della TBM

I lavori sono stati consegnati nel gennaio 2007 e dopo lo spostamento dei pubblici servizi, alla fine di maggio 2007 è iniziata la costruzione della stazione Marconi con la realizzazione delle paratie di contenimento degli scavi. Dopo la realizzazione del "corpo" stazione, nella seconda metà del

gennaio 2008 è iniziato il montaggio della TBM che ha permesso l'avvio dello scavo galleria il 09 aprile dello stesso anno.

Le operazioni di montaggio della EPBMs S415 hanno comportato un periodo di lavoro di 58 giorni, ed hanno compreso: il montaggio delle carpenterie, degli scudi, della testa fresante, i test propedeutici all'avvio.

La TBM è stata assemblata nella stazione di partenza (Marconi), in quanto non è stato possibile effettuare pre-montaggi per le limitazioni derivanti dalle norme di circolazione stradale.

La realizzazione della stazione Marconi ha tenuto conto della sua funzione di "cantiere TBM"; il solettone superiore della stazione ospita infatti tre asole aventi diverse funzioni: contenere la torre del nastro trasportatore (asola nord), permettere lo smarino (asola centrale) permettere l'approvvigionamento dei conci di rivestimento galleria e della malta di intasamento in fase di lavoro nonché delle diverse componenti in fase di montaggio della TBM e del back-up (asola sud, la più grande: 16 x 12 m).

Complessivamente la macchina di scavo comprende quattro carri di back-up sui quali

essere mantenuti entro le fasce di attenzione e allarme fissate da progetto.

Il controllo dei pesi estratti per anello è eseguito in avanzamento per mezzo della visualizzazione diretta sul pannello di controllo della TBM, da parte dell'operatore, della percentuale di sovra/sotto estrazione e il relativo controllo in remoto tramite Portale di Commessa del grafico risultante (Figura 17). Il peso di materiale effettivamente estratto dalla coclea durante lo scavo è costantemente confrontato con il valore teorico atteso, quest'ultimo calcolato utilizzando il volume di scavo e il peso di volume del terreno previsti da progetto. Una differenza tra i due valori maggiore del 2,5%



Figura 17 - Grafico dal sito del Portale di Commessa per il controllo del peso di materiale estratto

del teorico determina il superamento della soglia di attenzione e quindi l'immediato intervento dell'operatore o del tecnico di macchina per correggere tempestivamente l'estrazione.

Al superamento del 5% si innesca invece una procedura di verifica della presenza di sovrascavi, organizzata su diversi livelli di intervento in relazione all'andamento del parametro durante lo più scavi successivi. Il diagramma seguente (Figura 18) riporta il risultato finale dell'analisi riferita ad un anello completato.

La sovraestrazione su 2 anelli consecutivi determina l'intervento dalla superficie con perforazione e successiva iniezione di malta a gravità.

I casi isolati di sovraestrazione vengono invece trattati con semplici perforazioni dall'interno della galleria e successiva iniezione di completamento con boiaccia cementizia.

Alla base di tale analisi è fondamentale l'affidabilità del sistema di pesatura del materiale ubicato sul nastro primario.

sono alloggiati i principali servizi, più il così detto “bridge” che collega il back-up alla TBM, e la TBM in senso stretto (scudi, corpo e testa fresa).

I limitati spazi a disposizione hanno costretto ad una partenza con macchina non completa, ovvero con TBM + bridge + 2 soli carri di back-up (carro motori idraulici e carro pompe e malta). Durante le prime fasi di scavo il trasformatore è stato ubicato in superficie. I restanti due carri, sono stati calati in stazione appena l'avanzamento della TBM ha consentito la creazione dello spazio necessario.

I lavori di costruzione della galleria

L'avvio dei lavori con TBM si è rivelato particolarmente difficoltoso. Nonostante il terreno fosse stato preventivamente consolidato attraverso iniezioni cementizie eseguite dalla superficie topografica per 100 m di galleria, si sono verificate frequenti anomalie: coppia elevata, “impaccamento” della testa con conseguente necessità di numerosi interventi di pulizia, difficoltà

di mantenimento delle pressioni di progetto in camera di scavo e sovrascavi puntuali.

Quanto sopra ha comportato un notevole rallentamento della produzione rispetto al previsto.

La presenza di trovanti lapidei anche di notevoli dimensioni (diametro fino a 50-60 cm) ha causato innalzamenti puntuali della coppia e danneggiamenti o perdita degli utensili.

Inoltre l'elevata abrasività dei terreni scavati (con particolare riferimento alla componente sabbiosa) ha comportato un notevole consumo di utensili. Si sono resi necessari infatti numerosi interventi in camera di scavo (in condizioni iperbariche), per la pulizia e la sostituzione di molti utensili sulla testa di scavo già in questa prima subtratta di galleria (da stazione Marconi a stazione Nizza).



Figura 13 - Fuoriuscita della coclea di materiale con buone caratteristiche di omogeneità

Parallelamente sono stati effettuati numerosi test per il condizionamento ottimale del terreno in scavo.

Le presenza del terreno consolidato e l'assenza della falda nella tratta iniziale hanno reso necessaria la predisposizione di due ugelli di uscita delle schiume in camera di scavo, direzionati sull'asse centrale, collegati con delle tubazioni ad una pompa per acqua in pressione di 300 bar.

La taratura della bilancia viene infatti eseguita sistematicamente ogni due giorni di avanzamento oppure ogni qualvolta siano registrate sovra/sotto estrazioni. Analogamente le pressioni al fronte sono monitorate in continuo (Figura 19). Il rispetto delle soglie di progetto, è garantito in avanzamento regolando la portata di estrazione dalla coclea e la velocità di avanzamento dello scavo, mentre durante la fase di montaggio dell'anello o di fermo macchina dal sistema di iniezione della bentonite in camera di scavo. L'altro fondamentale aspetto sottoposto ad analisi in continuo è quello legato al riempimento del vuoto anulare tra rivestimento e contorno di scavo.

L'iniezione longitudinale della malta avviene da quattro linee di iniezione poste sull'estremità dello scudo. Per garantire il corretto riempimento del vuoto creato in avanzamento, il volume di malta iniettato deve essere maggiore del volume del vuoto teorico e inoltre i valori di pressione devono

mantenersi costantemente al di sopra di un limite fissato da progetto, funzione della pressione di terra applicata al fronte. Il calo della pressione di iniezione a zero o a valori ad esso prossimi, a seguito della fine dell'iniezione, indica la presenza di una cavità non riempita.

Vengono pertanto incrociati i diagrammi di pressione e di impulsi di iniezione, in modo tale da avere una semplice visualizzazione e riscontrare le eventuali anomalie (Figura 20).



Figura 18 - Grafico per il controllo del peso di materiale estratto



Figura 19 - Grafico dal sito del Portale di Commessa per il controllo delle pressioni applicate al fronte

Sono state provate le seguenti combinazioni, sempre con un FIR pari a 90-120%, nell'ordine:

- schiumogeno Mapei – FER 1:16 + acqua in pressione
- schiumogeno + disperdente premiscelati Sipag – FER 1:13 + acqua in pressione
- schiumogeno + disperdente premiscelati Condat – FER 1:10 + acqua in pressione
- schiumogeno Condat + disperdente Sipag premiscelati – FER 1:8 + acqua in pressione

Tutte le prove sopra elencate hanno portato a risultati insoddisfacenti sia in termini di avanzamento, sia in termini di controllo delle pressioni di sostegno al fronte, sia in termini di gestione delle terre.

Dall'inizio di Agosto si è proceduto utilizzando il seguente mix:

- schiumogeno Mapei su 5 linee + stabilizzante, viscosizzante Mapei sulla linea n.3 con uscita al fronte (la variabilità di terreno fine al fronte viene gestita semplicemente intervenendo sulla portata

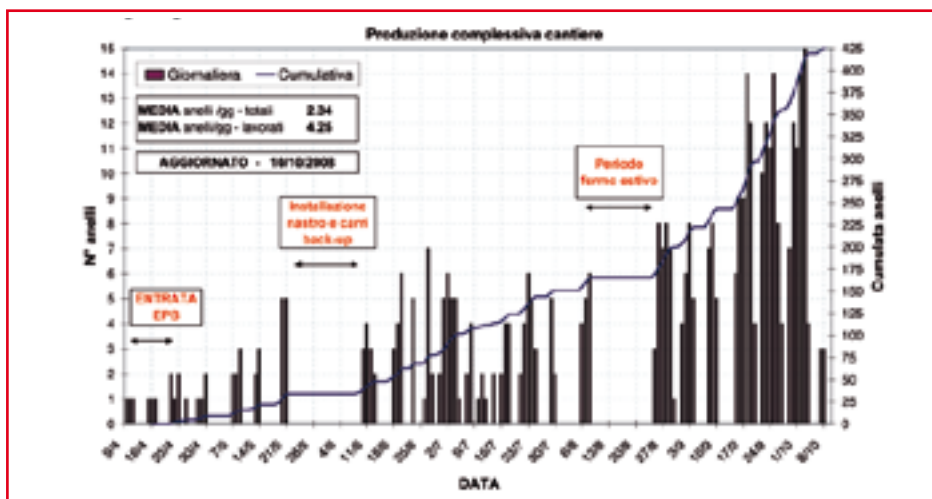


Figura 14 - Avanzamento della TBM in funzione del tempo per la subtratta Marconi – Nizza con evidenza dei fermi per interventi manutentivi straordinari

di questa linea).

I risultati ottenuti sono stati nettamente migliori.

In particolare l'omogeneità del materiale in camera di scavo ha permesso di ottenere buone velocità di avanzamento, con ridotte coppie alla testa fresante, e di garantire l'ottimale controllo delle pressioni al

fronte (Figura 13).

Il periodo di avvio, includendo la learning curve e le tempistiche di manutenzione e riparazione predette, si è protratto fino ai primi giorni di agosto 2008.

Da tale data, le produzioni sono aumentate fino al breakthrough in stazione Nizza dello scorso 7 ottobre (Figura 14).

L'eventuale presenza di vuoti così determinata viene prima verificata con perforazioni dall'interno della galleria e successivamente con iniezione in bassa pressione di boiaccia cementizia.

IL MONITORAGGIO DELLA SEDE VIARIA

Lo scavo della galleria viene realizzato con traffico veicolare in esercizio, assume pertanto importanza centrale il monitoraggio delle deformazioni della sede stradale che viene eseguito attraverso una serie di sezioni strumentate raggruppate in "Sezioni di Controllo" (SdC). In corrispondenza delle SdC sono installati una serie di strumenti che permettono l'acquisizione automatica dei dati ed il loro invio al GDMS per la visualizzazione nel Portale di Commessa. La SdC tipo "SC" (Figura 21) è costituita da 5 target ottici (CTC) per la misura delle convergenze 3D e 5 punti di livellazione

superficiale (CPL) per la misura dei cedimenti.

La SdC tipo "SPA" (Figura 22) è costituita dalle stesse installazioni della tipo "SC", con in aggiunta 3 estenso-inclinometri automatici (EIN-A), costituiti da un tubo attrezzato con anelli magnetici e sonda verticale che permette di rilevare e quantificare le deformazioni a diverse profondità. La SdC tipo "SPB" è dotata della stessa strumentazione presente nella "SPA" con in aggiunta un anello strumentato, equipaggiato

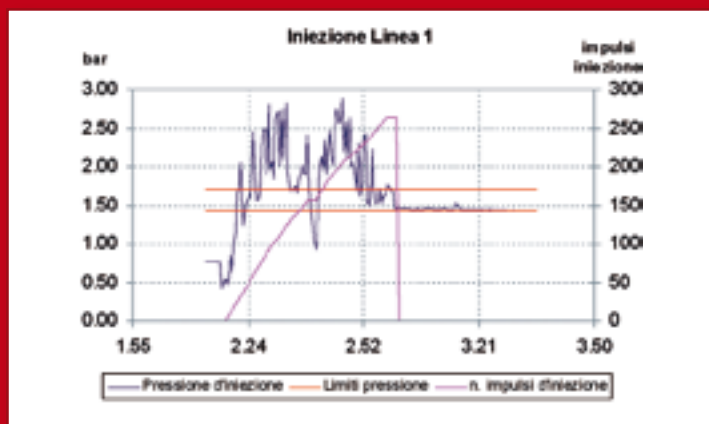


Figura 20 - Grafico per il controllo dell'iniezione longitudinale di malta cementizia

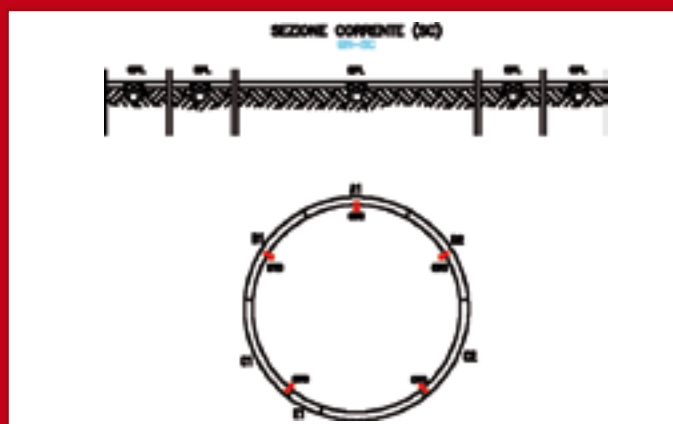


Figura 21 - Sezione di monitoraggio GN-SC

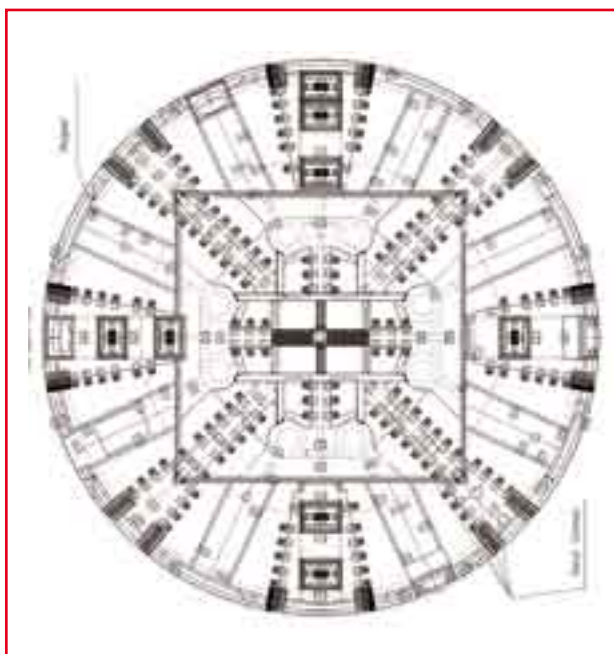


Figura 15 - Nuova disposizione degli utensili sulla testa fresante a partire dalla stazione Nizza

In funzione dell'esperienza maturata in questi primi 600 m circa di scavo con TBM si è ritenuto necessario intervenire sulla testa di scavo (Figura 15). L'intervento manutentivo straordinario



Figura 25 - L'arrivo della TBM in Stazione Nizza

modificherà sostanzialmente la tipologia e disposizione degli utensili: il numero dei rippers viene aumentato del 25% e vengono montati nuovi supporti che faciliteranno la sostituzione dei rippers dall'interno della

camera di scavo.

Inoltre, vista la presenza variabile di matrice limosa, che favorisce il fenomeno di sticking (determinante nelle difficoltà iniziali incontrate per lo scavo), una

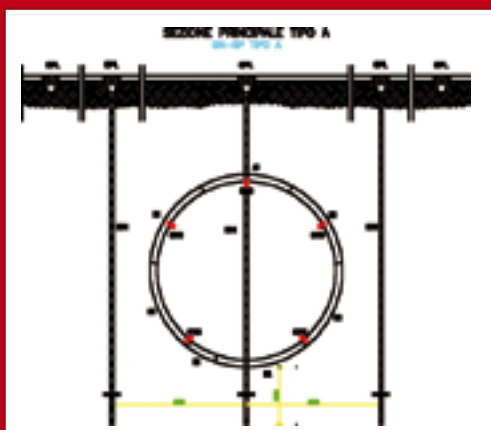


Figura 22 - Sezione di monitoraggio GN-SPA

volto a verificare in tempo reale gli effetti indotti dallo scavo della galleria sugli edifici medesimi. Nella sub-tratta Marconi – Nizza sono stati monitorati 30 edifici progettualmente identificati come "sensibili". La strumentazione utilizzata, fornita da Leica Geosystems, è costituita da punti di livellazione superficiale (CPL), punti di livellazione installati a parete alla base degli edifici (L), clinometri a parete (CL), sismografi 3D e fessurimetri elettrici (Figura 23).

I RISULTATI DEI MONITORAGGI

Lo scavo dei primi 600 m di galleria con TBM, non ha determinato l'insorgere di cedimenti della sede stradale e degli edifici adiacenti alla linea al di sopra delle soglie di allarme progettualmente prefissate. In "condizioni normali" ovvero quando i cedimenti rilevati sono rimasti al di sotto dei limiti di attenzione, la frequenza delle letture topografiche è

con 4 celle di pressione radiali (CPR), 1 cella di pressione tangenziale (CPT), 20 estensimetri a corda dotati di sensori termici (BE) e collocate in posizione circonferenziale, 6 estensimetri a corda longitudinali (BL).

IL MONITORAGGIO DEGLI EDIFICI

A seguito di una analisi di rischio svolta in fase di progettazione e della conseguente classificazione degli edifici in funzione delle loro caratteristiche statiche, è stato definito un piano di monitoraggio

stata quella riportata in Tabella 3. Quando si è verificato il superamento delle soglie di attenzione o quando il comportamento deformativo è apparso anomalo rispetto a quanto atteso, le letture sono state intensificate e/o aggiunti ulteriori strumenti di monitoraggio. I movimenti della sede viaria più importanti sono stati registrati in corrispondenza



Figura 23 - Fessurimetro elettrico su edificio lungo il tracciato

Sensibilità strumentazione		Consolidazione strumentazione
During consolidation crossing		1 per day
After the end of consolidation, till stabilization		1 per week
Travel arrangement		
Distance of instrument to excavation face, d (m)		
Ahead of the face		Behind of the face
d > 50	-	2 per day
10 < d < 50	-	1 per day
d < 10	-	2 per day
-	d < 10	2 per day
-	10 < d < 50	1 every two days
-	d > 50	1 per week till stabilization

Tabella 3 - Frequenza delle letture in "condizioni normali"

delle 4 linee esterne dell'impianto di condizionamento del terreno verrà spostata nella parte più centrale sulla testa di scavo.

Conclusioni

Lo scavo della galleria con TBM tra le stazioni Marconi e Nizza è stato completato dopo un periodo di apprendimento più lungo del previsto. Nonostante l'esperienza maturata nella precedente tratta (lotti 3, 4 e 5) le difficoltà legate al condizionamento del materiale scavato, alla puntuale cementazione ed abrasività dei terreni attraversati, hanno determinato la necessità di eseguire numerosi interventi in camera di scavo per manutenzioni straordinarie sulla testa della TBM. L'abbattimento dell'ultimo diaframma (Figura 25) è avvenuto dopo 182 giorni solari di lavoro, con avanzamento medio sulla tratta pari a 3,27m/giorno, ampiamente

delle sezioni SPA2 ed SPB2 entrambe ubicate all'uscita del blocco consolidato dei primi 100m. I cedimenti massimi rilevati in asse alla galleria (20 mm, si veda la Figura 24) sono stati causati da un sovrascavo in galleria dovuto al malfunzionamento del sistema di pesatura del marino. Anche il comportamento degli edifici monitorati è risultato poco influenzato dal passaggio della TBM: nonostante la ridotta distanza tra galleria ed edifici (valore minimo pari a 13 m) non si sono manifestati movimenti maggiori di 3 mm.

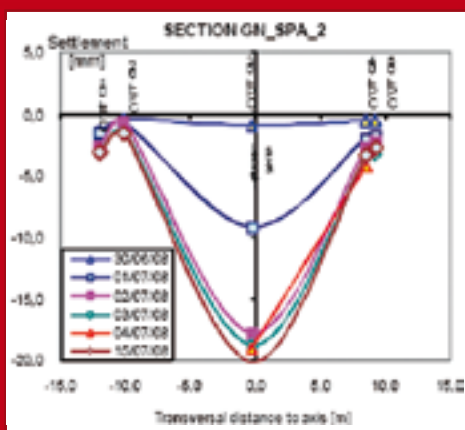


Figura 24 - I cedimenti della sede viaria reistrati tra il 01/07/08 e il 15/07/08 in corrispondenza della sezione SPA2



Figura 26 - Le tempistiche di lavorazione della TBM sulla prima sub-tratta Marconi-Nizza

al di sotto delle attese. Analizzando infatti i tempi di lavorazione emerge che il 74% delle ore a disposizione per lo scavo corrispondono a fermo macchina, mentre soltanto il 12% del totale è stato effettivamente utilizzato per l'avanzamento (Figura 26). Dopo i primi 150 anelli si quindi è assistito all'aumento della velocità di avanzamento favorita dal sensibile calo dei tempi di spinta sino ad un minimo di 35-40 min/anello (Figura 27). Tale miglioramento, ottenuto principalmente con gli accorgimenti al sistema di condizionamento del materiale scavato già descritti, dimostra che anche in condizioni al

limite dell'utilizzo, lo scavo con EPBs possa fornire buoni risultati, sia in termini di produttività sia in termini di sicurezza e impatto sul tessuto urbano. ■

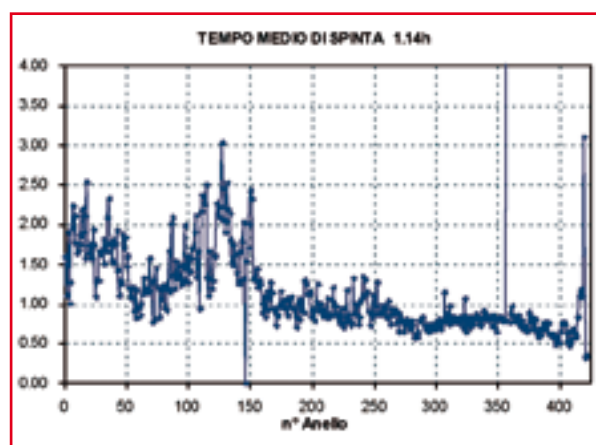


Figura 27 - Evoluzione del tempo necessario per lo scavo di 1 anello con TBM

Bibliografia

- I. Signoretti, J. De La Menardiere, P. Grasso. *Special works for the Torino Metropolitan Railway system.* ACUUS 2002 International Conference, Torino
- G. Carrieri, R. Crova, P. Grasso, V. Guglielmetti. *Torino Metro Line 1, The Tunnels Excavation Of The First Section.* ITA 2002 International Conference, Torino
- Tapia M. *Mechanized tunnelling in urban area: The control of the settlements and the induced effects on the surrounding structures for the tunnel of the Turin Metro.* COREP Politecnico di Torino, Torino, ottobre 2008
- Camposinhos Rui Pedro, 2008. *Mechanized tunnelling in urban area: The procedures to operate the tunnel excavation in EPB mode.* COREP Politecnico di Torino, Torino, ottobre 2008
- A. Sorlini, D. Arduino. *La metropolitana automatica di Torino. Coordinamento della sicurezza di un'opera complessa. Metodologie e risultati.* Convegno SIG "Le gallerie nelle grandi opere di comunicazione e di servizio. Il cantiere e le problematiche - SAIE 2006, Bologna
- A. Sorlini, G. Amoretti. *Close underpass of ancient tunnels during the construction of the Turin automatic metro line: methodology and results.* ITA-AITES World Tunnel Congress 2007 "Underground Space - the 4th Dimension of Metropolises" Prague, 5-10 May, 2007
- G. Ricci, R. Enrione, A. Eusebio, R. Crova. *Numerical modeling of the interference between underground structures and aquifers in urban environment.* The Turin subway - Line 1 ITA-AITES World Tunnel Congress 2007 "Underground Space - the 4th Dimension of Metropolises" Prague, 5-10 May, 2007
- A. Sorlini, G. Fantini. *Il manuale d'emergenza della Metropolitana Automatica di Torino* Rivista "Gallerie" n.84, December 2007
- A. Sorlini, D. Arduino. *Turin Automatic Metro - Safety Coordination of a complex project - Methodologies and result* First European conference on health and safety coordination in the construction industry, Barcellona, 21-22 February 2008
- G. Carrieri, R. Crova, P. Grasso, V. Guglielmetti. *Torino Metro Line 1, tunnels excavation of the first section* GEAM Int. Congr. Mechanised Tunnelling: "Challenging Case Histories" Turin, 16-19 November, 2004
- P. Grasso, E. Fornari. *Turin Metro Line 1: An Example of Successful Use of EPB/TBM for Tunnelling in Unfavourable Ground Conditions and Vulnerable Context* Congrès International de l'AFTES 2005: "Les Tunnels, Clé d'une Europe durable" Chambéry, 10-12 Octobre 2005