

Il prolungamento tra De Ferrari e Brignole

Prolungamento della Metropolitana di Genova

La Metropolitana di Genova si avvia, con il prolungamento tra le Stazioni De Ferrari e Brignole, ad assumere un ruolo strategico nell'ambito del sistema di trasporto pubblico della città, quale raccordo privilegiato tra la mobilità urbana di superficie ed il sistema ferroviario. Lo scorso gennaio, con la fine degli scavi in sotterraneo, si è effettuato un passo decisivo verso il completamento della nuova tratta, superando con successo l'impegnativa prova di realizzare un'opera in sotterraneo in ambito urbano, in presenza di modesti ricoprimenti e con significative interferenze in superficie. Rocksoil ha seguito la progettazione esecutiva e di dettaglio delle opere civili

* PROF. ING.

** DOTT. ING., ROCKSOIL SPA, RESPONSABILE DI PROGETTO

*** DOTT. ING., ROCKSOIL SPA, DIRETTORE TECNICO

PIETRO LUNARDI*

MARTINO GATTI**

GIOVANNA CASSANI***

L'opera

Il prolungamento metropolitano tra De Ferrari e Brignole segue, in una prima parte, un tracciato sotterraneo corrispondente a quello superficiale costituito da via Roma, via Santi Giacomo e Filippo e via Serra, fino a raggiungere Piazza Brignole. Nel primo tratto la linea metropolitana occupa le gallerie esistenti delle Grazie, mentre a partire da due cameroni di raccordo, situati in prossimità della galleria Mazzini, è prevista la realizzazione di una nuova galleria a doppio binario; le coperture sono variabili, in questa tratta, tra 8 e 20 m circa. In corrispondenza di via Santi Giacomo e Filippo, in adiacenza a Palazzo Albini, si collocherà la futura Stazione metropolitana di Corvetto; al momento si è prevista la realizzazione della sola galleria di stazione, oltre al pozzo di attacco degli scavi eseguito all'interno del parco dell'Acquassola; tale pozzo, in una prima



Figura 1 - Planimetria di inquadramento



fase di esercizio senza la stazione Corvetto, sarà impiegato quale punto di ventilazione e via di fuga (Figura 1).

La seconda parte del tracciato ha inizio da Piazza Brignole, prosegue sottopassando il fascio binari in avvicinamento alla stazione ferroviaria di Brignole, in presenza di coperture di circa 6 m, e supe-

rata la sede ferroviaria, prosegue in corrispondenza delle vie Montesano ed Imperia, con ricoprimenti iniziali di 6-8 m che salgono rapidamente fino a 35-40 m, per poi ridiscendere nel tratto terminale, una volta raggiunto corso Montegrappa, a 3-4 m. L'imbocco della galleria, lato Brignole, è impostato in corrispondenza del

muro di sostegno che separa corso Montegrappa dal rilevato ferroviario della stazione FS di Brignole.

La stazione terminale di Brignole, con banchine di lunghezza pari a 80 m, è ubicata, a cielo aperto, in corrispondenza del rilevato ferroviario della omonima stazione ferroviaria; la linea metropolitana occupa gli ultimi binari del rilevato, prossimi al Palazzo di Meccanizzazione Postale, al momento dimessi. Si è prevista la realizzazione di sottopassi di collegamento alla stazione ferroviaria, nell'ottica di favorire l'interscambio funzionale fra ferrovia e metropolitana (Figura 2). Infine, l'area del sovrappasso di via Canevari e del ponte sul Bisagno verrà impiegata quale tronchino di manovra. Nella tratta De Ferrari-Brignole è inoltre prevista la realizzazione

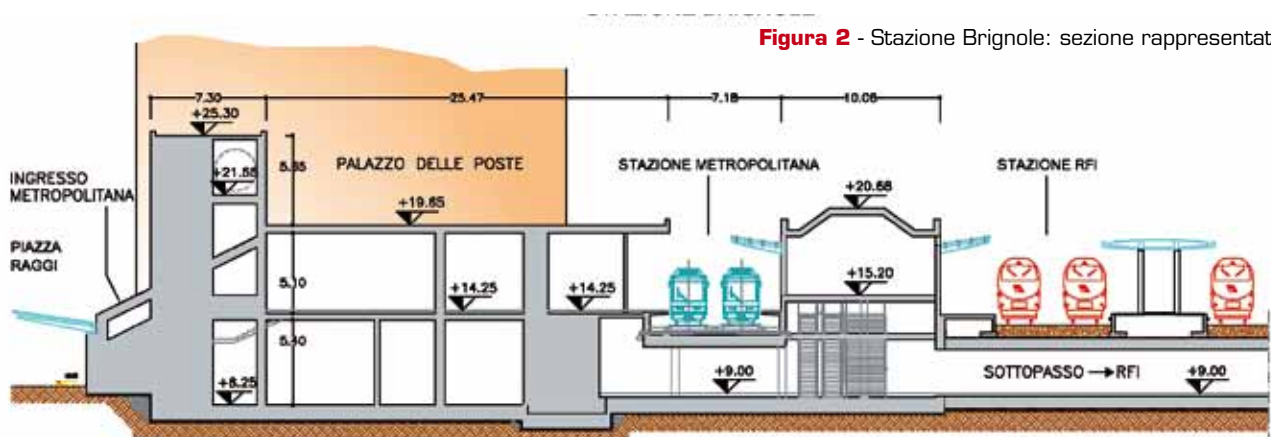
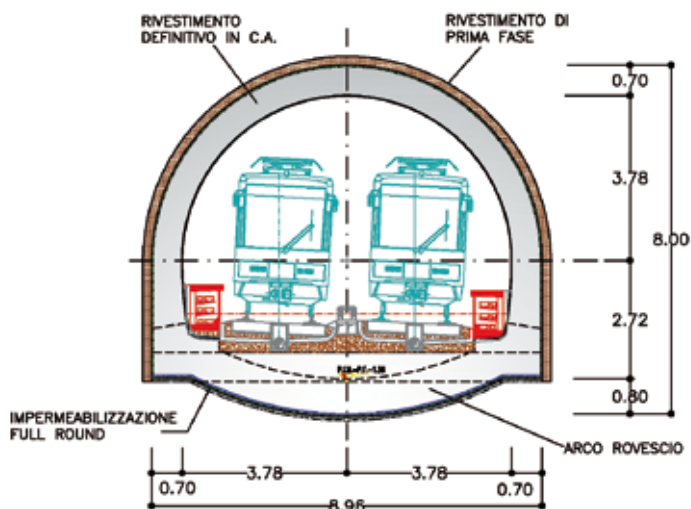


Figura 2 - Stazione Brignole: sezione rappresentativa

Figura 3 - Sezione galleria di linea



di due manufatti speciali, finalizzati all'esercizio della linea: i pozzi ubicati in Largo Lanfranco e Piazza Brignole, aventi funzione di camere per la ventilazione e per l'accesso dei Vigili del Fuoco.

La galleria metropolitana di linea è costituita, in sotterraneo, da un unico fornace a doppio binario, con interasse binari di 3.10 m e raggio interno in calotta pari ad $R=3.78$ m. La sezione libera interna risulta pari a circa 40 m^2 ; lo scavo è stato eseguito "in tradizionale", con sezione di circa 68 m^2 e diametro di scavo di 9.0 m

rispondenza di ogni binario è previsto un tubo di drenaggio (diametro 250 mm), con pozzetti di ispezione ogni 25 m. Le banchine di emergenza sono da realizzarsi mediante elementi prefabbricati, come pure la soletta di regolamento, avente spessore di 20 cm (Figura 3). I cameroni di raccordo alle gallerie delle Grazie, da eseguirsi per una lunghezza di 120 m, hanno diametro di scavo di 15.0 m e 11.5 m. La galleria di stazione Corvetto, di lunghezza pari a 80 m, presenta un diametro di scavo di 17.0 m (Figura 4).

L'inquadramento geologico-geotecnico (Fase conoscitiva)

Dal punto di vista geologico regionale, l'area metropolitana di Genova viene inquadrata nell'edificio appenninico e ne costituisce il margine nord-occidentale al contatto con la Zona Sestri Voltaggi. Le unità del substrato vengono riferite alle Unità Liguridi e sono costituite dai Flysch calcarei (Formazione dei "Calcari del Monte Antola"), di età cretacea superiore, seguiti da un lungo "hiatus" (intervallo di non deposizione) e ricoperti dalle "Marni di Piccapietra" (Formazione delle "Argille di Ortovero"), deposte durante la trasgressione Pliocenica. Lungo il tracciato della metropolitana genovese, si riconoscono queste due formazioni geologiche principali, separate da un orizzonte di "brecce", di spessore generalmente plurimetrico, di natura calcarea, talora inglobate in matrice marnoso-argillosa. In superficie sono poi presenti depositi alluvionali fluviali, localmente di origine marina; in particolare nella zona di Brignole si rinvenivano i depositi alluvionali del Bisagno.

Il profilo geologico-geotecnico lungo il tracciato delle gallerie in sotterraneo, nonché la caratterizzazione geomeccanica delle unità interessate dagli scavi, sono stati messi a punto a seguito di diverse campagne geognostiche, a partire dal 1992; gli esiti dei sondaggi condotti, con frequenza ogni 80-100 m lungo il tracciato, e delle prove eseguite in situ (prove pressiometriche, dilatometriche e di permeabilità) e di laboratorio hanno consentito la ricostruzione di un quadro geotecnico di previsione assai affidabile, che è stato del tutto confermato durante la realizzazione delle opere (Figura 5).

A partire dai cameroni di raccordo con le gallerie delle Grazie, lo scavo ha interessato interamente le marni argillose della Formazione delle "Marni di Piccapietra" per l'intero tratto di galleria lungo via Roma, piazza Corvetto e via Santi Giacomo e Filippo; nel tratto compreso tra Via Serra e Piazza Brignole, lo scavo ha incontrato la zona di transizione tra le

Figura 4 - Pozzo e galleria di stazione Corvetto

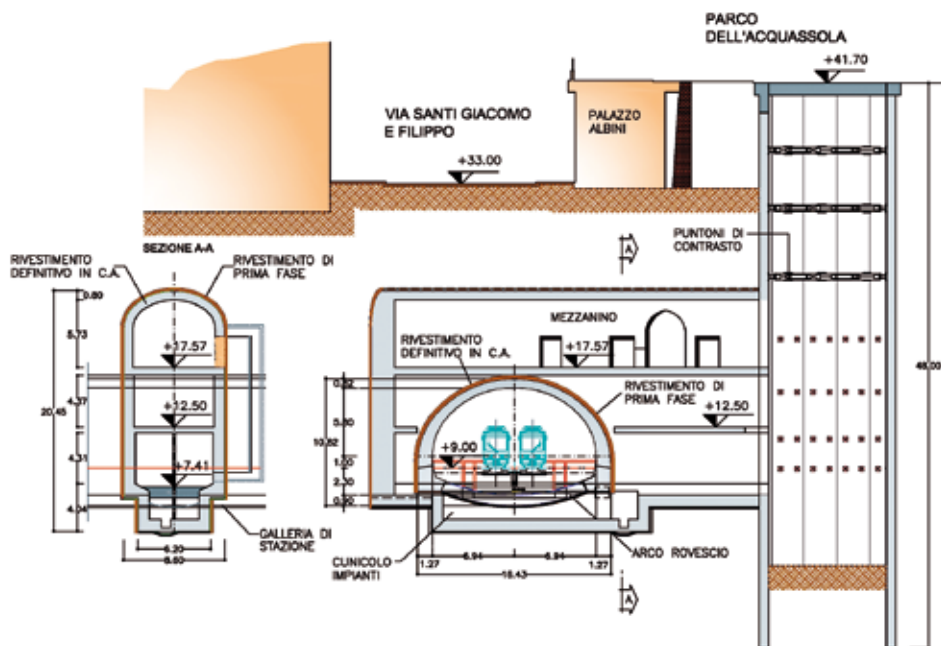
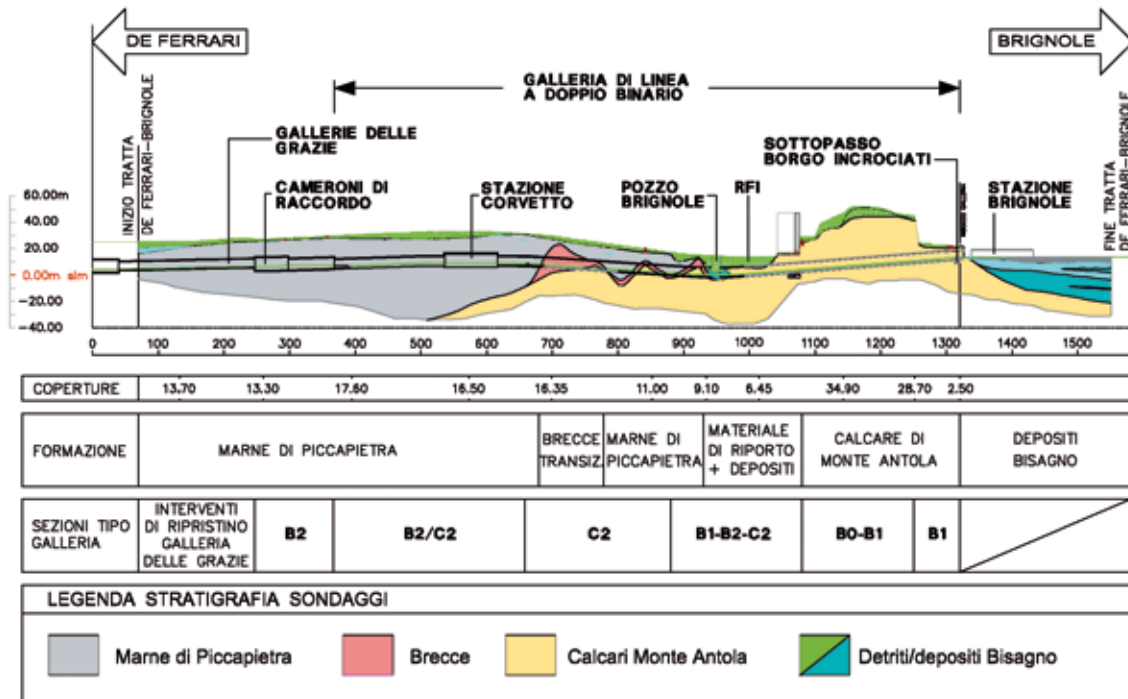


Figura 5 - Profilo geologico-geomeccanico



Marne di Piccapietra ed i Calcari di Monte Antola, attraverso un orizzonte plurimetrico di breccie. Nell'area di piazza Brignole si è riscontrata, come da previsione, una depressione morfologica del tetto dei calcari, data la presenza in superficie dei depositi alluvionali del Bisagno. Superata piazza Brignole, l'avanzamento ha presentato un fronte misto, con la parte bassa del fronte, fino alle reni, costituita dai calcari e la parte di calotta interessata dai depositi di superficie e dai riporti del rilevato ferroviario. La porzione di detrito in calotta è andata a ridursi verso il muro di contenimento del rilevato di Brignole, lato via Montesano, fino a che l'intero scavo è stato realizzato nella Formazione dei Calcari del Monte Antola. Infine, in corrispondenza dell'imbocco lato stazione ferroviaria di Brignole, i modesti ricoprimenti tra la calotta galleria e corso Montegrappa, pari a 3-4 m, hanno riportato il fronte di scavo ad interessare i detriti di superficie per una modesta porzione in calotta. L'ultima parte del tracciato, a cielo aperto, si sviluppa interamente all'interno dei depositi alluvionali del Torrente Bisagno, che in questa zona, presen-

tano una potenza di circa 30 metri. Relativamente alla situazione idrogeologica, la formazione delle Marne di Piccapietra ha mostrato valori di permeabilità assai bassi ($1 \div 3 \times 10^{-8}$ m/s), tali da rendere pressoché nulla la circolazione idrica

in sotterraneo; diversamente, nella formazione dei Calcari del Monte Antola e soprattutto nella fascia di transizione delle breccie, è stato stimato un valore di permeabilità superiore ($10^{-5 \div 6}$ m/s), con venute in galleria talora significative (2-5 l/s).



Riguardo alla falda, i controlli piezometrici, condotti prevalentemente in fase progettuale, hanno evidenziato livelli pressoché contenuti entro 2-6 m da piano campagna, localmente 10 m da p.c., con battenti in calotta galleria di 1-1.5 bar. In merito alla caratterizzazione geotecnica-geomeccanica, tenuto conto degli esiti delle prove di laboratorio, delle valutazioni condotte sui valori di RMR e GSI stimati dai sondaggi (questo specie per la formazione dei calcari), nonché delle informazioni disponibili in letteratura, si sono impiegati i parametri progettuali riportati in Tabella 1.

Tabella 1

Litologia	Peso di Volume γ (kN/m ³)	Angolo di attrito ϕ (°)	Coesione c (MPa)	Modulo Elastico E (GPa)	Coefficiente di Poisson ν
Materiale di riporto (r)	20	32	0	0,02-0,05	0,3
Depositi alluvionali costituiti prevalentemente da sabbie e limi (aLS-L)	19-20	30	0,02-0,03	0,02-0,03	0,3
Marne di Piccapietra (PIC)	19-21	30	0,2-0,6	0,05-0,10	0,3
Brecce eterometriche (Br)	20	30	0	-	0,3
Calcari di Monte Antola (FAN') estremamente fratturato	24-25	28-30	0,2-0,6	2,0-4,0	0,3
Calcari di Monte Antola (FAN)	25-26	30-38	0,6-2,0	5,0-13,0	0,25

L'approccio progettuale ADECO-RS

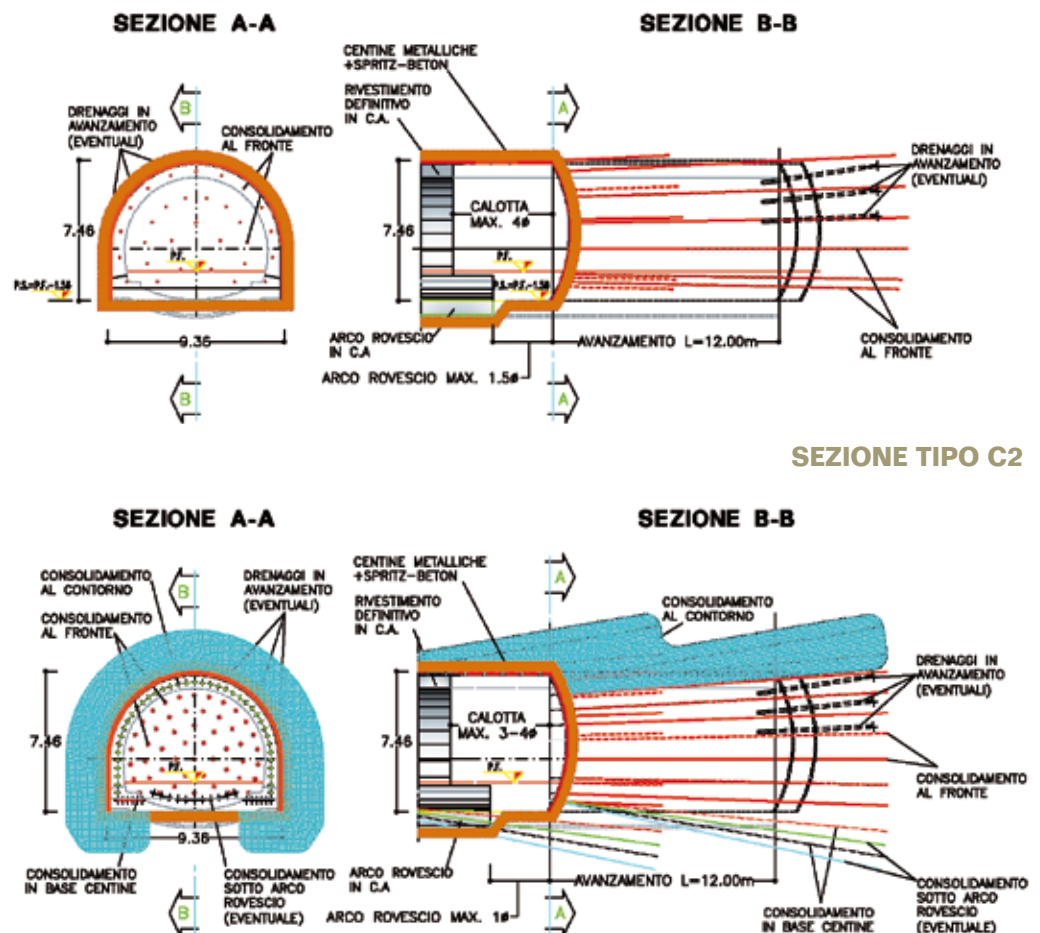
L'opera da realizzare in sotterraneo presentava le caratteristiche di una "scavo urbano" con modesti ricoprimenti, da condursi prevalentemente sotto strada ed in adiacenza a fabbricati talora di notevole importanza, quali ad esempio gli edifici storici di galleria Mazzini e di via Roma. Particolarmente delicati apparivano anche lo scavo della galleria di Stazione Corvetto, a partire dal pozzo di attacco dell'Acquassola, ed il sottoattraversamento del rilevato ferroviario di Brignole.

L'approccio progettuale, in un simile contesto, non poteva che considerare "il controllo del comportamento deformativo" del sistema "nucleo-fronte-galleria", quale punto chiave per assicurare l'assenza di risentimenti in superficie a seguito degli scavi, secondo la filosofia dell'Approccio ADECO-RS. Innanzitutto si è operata la scelta di realizzare una galleria a singolo fornice, così da ridurre l'estensione del possibile bacino di subsidenza in superficie rispetto all'ipotesi di adottare due gallerie a singolo binario. Si è poi esaminato, in considera-

zione del quadro geologico-geotecnico ed idrogeologico approfondito in fase conoscitiva e delle geometrie di scavo, il comportamento del "nucleo-fronte" a seguito dell'apertura dello scavo, individuando, per ciascuna tratta omogenea

dal punto di vista geotecnico, le parti a comportamento tenso-deformativo omogeneo, nell'ambito delle tre categorie di comportamento fondamentali: "nucleo-fronte stabile", "nucleo-fronte stabile a breve termine", "nucleo-fronte instabile"

Figura 6 - Sezioni tipologiche di scavo



(fase di diagnosi). Infine si sono definiti gli interventi di pre-confinamento e di confinamento necessari, per ciascuna delle tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo, per regimare i fenomeni deformativi attesi e guidare gli avanzamenti verso condizioni di sicurezza sia nel breve sia nel lungo termine (fase di terapia), prevedendo per ciascun caso, attraverso il calcolo, l'entità dei fenomeni deformativi (estrusioni, convergenze) da attendersi ai fini del controllo, in corso d'opera, della validità del progetto e della buona esecuzione della costruzione (fase di verifica e messa a punto del progetto in corso d'opera).

Nel dettaglio, per la Formazione delle Marne di Piccapietra si è individuato un comportamento del "nucleo-fronte" di tipo "stabile a breve termine", con modesti valori di convergenza, pari a 10-15 mm, e livelli di plasticizzazione assai contenuti per la sagoma di linea, tali da prevedere unicamente il confinamento del cavo mediante la posa in opera di centine metalliche, inglobate in uno strato di spritz-beton: sezione tipo B0. Considerando la sagoma dei cameroni e della galleria di stazione, le analisi hanno invece evidenziato valori di convergenza radiale decisamente più elevati, pari già a 30 mm circa all'apertura del fronte per evolvere fino a 40 mm, tali da prevedere, in aggiunta al confinamento

del cavo, anche un intervento di pre-confinamento del nucleo mediante elementi strutturali in vetroresina: sezione tipo B2 (Figura 6 e 7).

Nella zona di transizione tra le formazioni delle marne e dei calcari, specie in presenza di importanti spessori di breccie, si è individuato un comportamento del "nucleo-fronte" di tipo "instabile", a causa delle modeste caratteristiche di resistenza a taglio dei terreni e della presenza di una significativa circola-



Figura 7 - Galleria di stazione Corvetto: formazione Marne di Piccapietra

zione d'acqua sotterranea, la quale gioca un ruolo decisamente negativo riguardo alle condizioni di stabilità del fronte. In questo contesto, presente in corrispondenza del tratto terminale di Via Serra, si è ritenuto di adottare, in aggiunta al pre-confinamento del nucleo, anche la realizzazione di un intervento di consolidamento al contorno del cavo, mediante elementi strutturali in VTR valvolati ed iniettati ad alta pressione con miscele cementizie e, lo-

calmente, integrative impermeabilizzanti: sezione tipo C2. Infine, per la formazione dei Calcari del Monte Antola, è stato individuato un comportamento del fronte di tipo "stabile a breve termine", con deformazioni trascurabili, tali da adottare il solo confinamento del cavo: sezione tipo B0 (Figura 8).

Solo in presenza di basse coperture, ad esempio all'imbocco lato Brignole, si è impiegato un intervento di pre-sostegno, mediante la posa di una coronnella di tubi metallici in calotta. Nella scelta delle tecnologie di consolidamento, si è evitato di effettuare lavorazioni dalla superficie, in modo da ridurre al minimo il disturbo al traffico veicolare e pedonale delle zone interessate.

Lungo tutto il tracciato lo scavo è stato eseguito a "piena sezione", per sfondi di 1.0-1.5 m, così da consentire, a seguito dell'avanzamento, la tempestiva stabilizzazione del cavo mediante la realizzazione dell'arco rovescio definitivo e delle murette, gettati in

Figura 8 - Galleria di linea: formazione calcari di Monte Antola



opera, nei contesti più delicati, a ridosso del fronte di scavo. A completamento della galleria, si è prevista la realizzazione di un sistema di impermeabilizzazione "full-round", in modo da evitare l'effetto drenante che la galleria inevitabilmente avrebbe nei confronti delle falde, ed il getto dei rivestimenti di calotta in calcestruzzo armato, in considerazione delle modeste coperture, delle pressioni idrostatiche e della possibilità di carichi asimmetrici legati alla presenza in superficie di edifici.

L'interferenza con le opere in superficie

La problematica dell'interferenza tra gli scavi in sotterraneo e le preesistenze in superficie ha riguardato tutto il tracciato dell'opera, ma si vuole qui evidenziare in particolar modo due situazioni che, sotto questo punto di vista, presentavano, a livello progettuale, notevole difficoltà: lo scavo dei camerone in corrispondenza degli edifici storici di galleria Mazzini e via Roma, con coperture di 7-8 m, ed il sottoattraversamento del rilevato ferroviario di Brignole, eseguito in presenza di ricoprimenti pari a 5-6 m.

La soluzione progettuale adottata è stata finalizzata, in entrambi i casi, al massimo contenimento del comportamento deformativo del fronte e del cavo, nell'ottica di minimizzare il "volume perso" durante la realizzazione della galleria, dalla fase di scavo fino al getto dei rivestimenti definitivi. Le modalità di avanzamento sono state verificate mediante analisi alle differenze finite, stimando in particolare i bacini di subsidenza attesi e l'entità dei cedimenti ad essi associati. In Figura 9 si riporta, a titolo esemplificativo, l'analisi condotta per lo scavo del camerone di raccordo nella Forma-

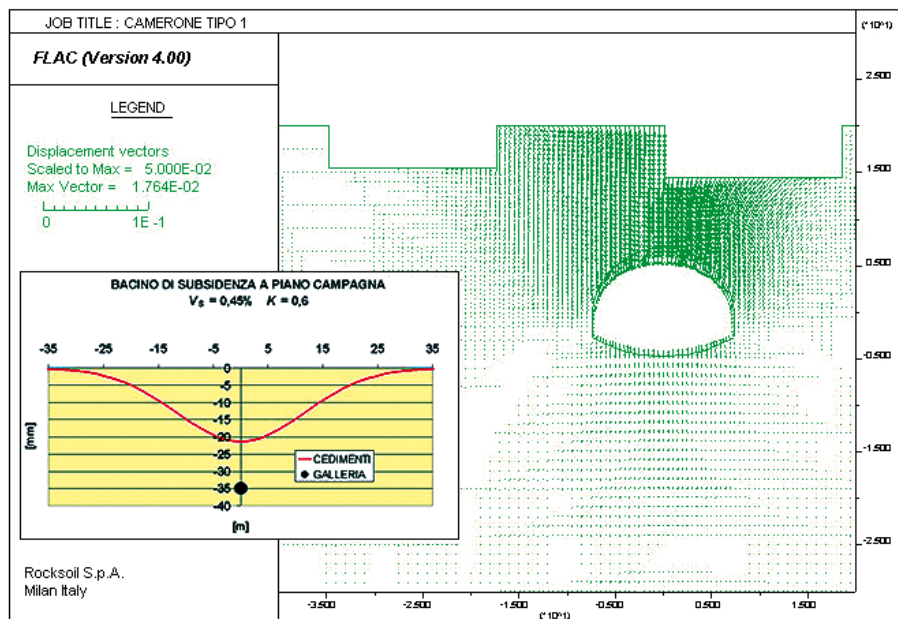


Figura 9 - Valutazione cedimenti attesi

zione delle Marne di Piccapietra: l'analisi ha evidenziato un valore di convergenza, in chiave galleria, pari a circa 25-30 mm, con cedimenti a piano campagna, in corrispondenza degli spigoli edifici, pari a 6 mm e 20 mm. Interpretando il bacino di subsidenza, così determinato, mediante le "formulazioni empiriche" (Peck 1969, O'Really&New 1982), si ottiene un valore del volume perso pari allo 0.45% del volume scavato, valore molto ridotto per una modalità di scavo convenzionale; l'ampiezza del bacino risulta adeguatamente fittata assumendo un parametro di forma "k" pari a 0.60. Le previsioni di cedimento

sono quindi state impiegate per condurre analisi di rischio nei confronti dei fabbricati presenti (Mair, Taylor e Burland 1996), determinando "categorie di danno" 0 e 1 (Boscardin e Cording 1989), indicative di rischi potenziali assai contenuti. In generale le misure di monitoraggio, condotte a piano campagna in corso d'opera, hanno mostrato valori di cedimento ancor più contenuti, con valori assoluti massimi pari a 4-6 mm. Le analisi condotte a ritroso a partire dai dati di campagna, hanno evidenziato, nella tratta di galleria scavata nelle marne, valori dei volumi persi in fase di scavo compresi nel range 0.35-0.45%,

a testimoniare l'efficacia degli interventi progettuali previsti (ad esempio presso lo scavo della galleria di stazione Corvetto si sono osservati cedimenti pari a 10-15 mm, localmente 25 mm nella zona del camerone). Valori di cedimento millimetrici si sono registrati, come prevenibile, per gli scavi nei calcari. Sempre inferiori al cm sono risultate anche i valori di convergenza.

La realizzazione del tratto di sottopasso al rilevato ferroviario ha comportato



Camerone di raccordo con le gallerie delle Grazie

non solo la definizione degli interventi progettuali, ma soprattutto la messa a punto, in fase costruttiva, dei parametri operativi di esecuzione degli interventi di pre-sostegno e di pre-confinamento, in termini di pressioni e portate di iniezione, valori di assorbimento e mix-design delle miscele cementizie. Data la presenza di depositi superficiali nella porzione superiore del fronte di scavo, le modalità di avanzamento hanno infatti previsto la creazione di una fascia di terreno consolidato al contorno del cavo, allo scopo di creare artificialmente la formazione dell'effetto arco di scarico; la presenza di una coronella di tubi metallici ha consentito un incremento dei fattori di sicurezza, specie nei confronti di instabilità locali del profilo di scavo (Figura 10).

Il rischio di operare sollevamenti del piano campagna in fase di iniezione, ha reso necessario il controllo topografico di mire ubicate sulla sede ferroviaria, mediante sistema automatizzato con frequenza di lettura oraria, nell'arco delle 24 ore; in questo modo è stato possibile monitorare lo "sghembo" dei binari, confrontandolo con le soglie di attenzione (3.5 per mille) e di allarme (5.0 per mille) definite, con base di controllo 3.0 m, dall'Eserci-

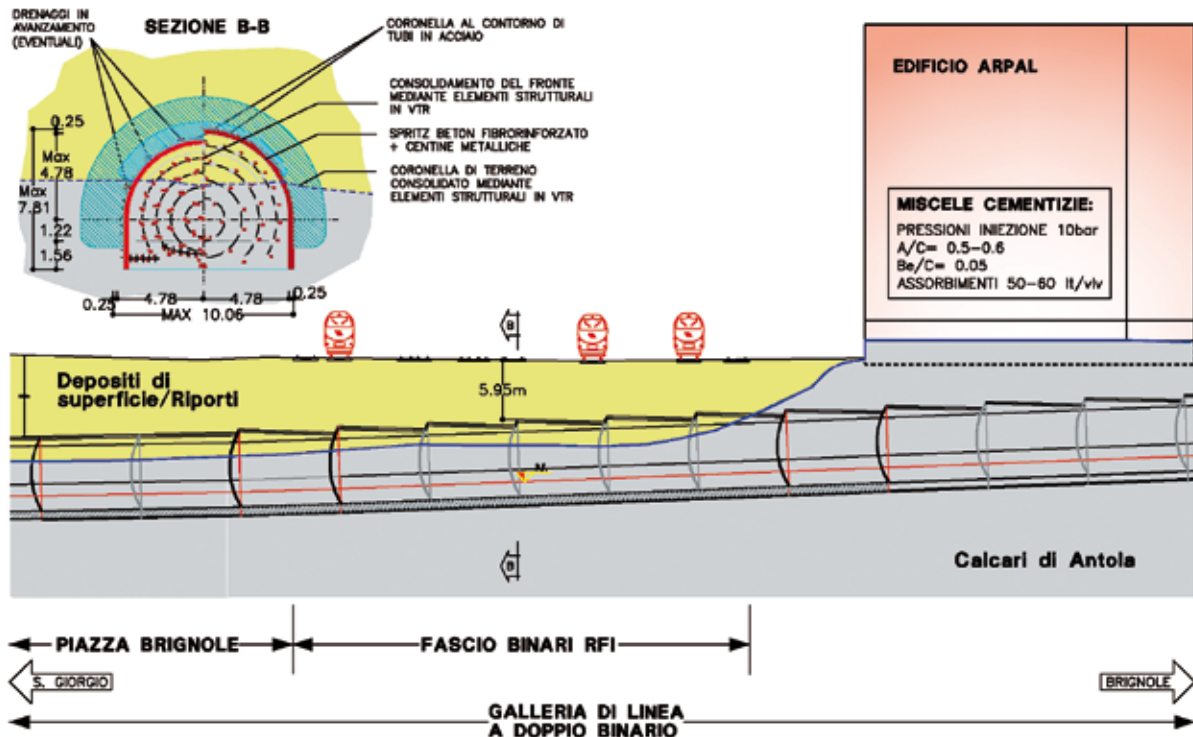


Figura 11 - Monitoraggio rilevato ferroviario

zio RFI; al superamento della soglia di attenzione, il protocollo di intervento prevedeva il controllo/adequamento delle modalità operative (ritaratura delle pressioni e portate di iniezione), mentre al superamento della soglia di allarme si attivava l'interruzione dell'esercizio ferroviario

(situazione che non si è mai verificata) (Figura 11). Anche l'ispezione visiva, in continuo, della sede ferroviaria, consentendo di individuare eventuali fughe di miscela a piano campagna, ha permesso una sorveglianza degli esiti delle lavorazioni in sottoterraneo.

Figura 10 - Sottoattraversamento rilevato ferroviario di Brignole



L'organizzazione del cantiere e l'attacco degli scavi

La realizzazione delle opere in sotterraneo è stata effettuata a partire da due punti di attacco degli scavi: il pozzo realizzato all'interno del Parco dell'Acquassola (pozzo Corvetto) e l'imbocco in prossimità della stazione ferroviaria di Brignole. Dal pozzo Corvetto, il Cantiere ha gestito lo scavo della galleria di stazione e due fronti di avanzamento, uno verso De Ferrari, il quale ha consentito la realizzazione dei cameroni di raccordo; l'altro verso piazza Brignole, che ha permesso lo scavo della galleria metropolitana lungo via SS Giacomo e Filippo e via Serra. Dall'imbocco lato Brignole si è operato lo scavo della galleria sotto via Imperia e Montesano, nonché il sotto-at-traversamento del rilevato ferroviario. La realizzazione del pozzo Corvetto, avente dimensione in pianta di 10x12 m, ha comportato l'esecuzione di diaframmi, mediante idrofresa, di notevole lunghezza, pari a 48.0 m; l'impiego di attrezzature all'avanguardia ha consentito la loro esecuzione con errori di verticalità ridottissimi, inferiori a 5 cm; il contrasto dei pannelli in fase di scavo è stato effettuato



Foto 12
Pozzo Corvetto

mediante contrasti metallici (Foto 12) e, più in profondità, mediante tiranti in trefoli. Dal pozzo, in più fasi, si è proceduto alla realizzazione del camerone di attacco degli scavi, realizzato in direzione ortogonale alla linea; a seguito di ogni fase di scavo, che ha comportato la posa in opera preventiva di in-



(in basso)
Foto 13 e 14
Attacco scavi
Corvetto: fasi
di scavo e getto



terventi di pre-confinamento del fronte mediante elementi in VTR, si è proceduto al getto del rivestimento definitivo in c.a., per sottomurazione, al fine di stabilizzare il cavo (Foto 13 e 14). Al riguardo si evidenzia che il camerone presenta un'altezza di scavo di 18 m, con calotta a circa 8 m dal piano stradale e 5 m dalle fondazione dei fronti edifici di Via SS Giacomo e Filippo. Il sito dell'Acquassola ha funzionato quale base logistica principale del Cantiere, con uffici ed officine. L'imbocco Brignole è situato in corrispondenza del muro di contenimento tra Corso Montegrappa ed il rilevato ferroviario. Al fine di realizzare questo imbocco senza interferire con la soprastante sede stradale di Corso Montegrappa, alquanto trafficata e sede di importanti sottoservizi (ad esempio un cavo ENEL da 132 kV), e considerata l'inclinazione della parete del muro rispetto al tracciato metropoli-

tano, si è operato mediante la realizzazione di una protesi in c.a. che, opportunamente ancorata agli ammassi calcarei presenti a tergo del muro mediante chiodature, ha permesso di determinare un fronte di attacco per l'attacco degli scavi della galleria (Figura 15 e 16).

I primi campi di avanzamento sono stati condotti mediante protezione di tubi metallici in calotta, data la ridottissima copertura rispetto alla sede stradale, 4-5 m.

In questo tratto la galleria sovrappassa, a raso, anche il cunicolo pedonale di Borgo Incrociati, all'interno del quale è stato eseguito, preventivamente, un intervento di rinforzo strutturale con camicia in c.a. La demolizione dei fronti di scavo è stata condotta, lungo tutto il tracciato della galleria, mediante ripper nelle marni e martellone da 3.5 ton nei calcari; non si sono verificati disturbi vibrazionali e di rumore particolarmente gravosi per gli abitanti, ad eccezione di un tratto, in corrispondenza di via Imperia, nei calcari, dove la compattezza della roccia ed il conseguente rumore all'abbattimento (60-70 dBA in superficie), ha indotto a sospendere le attività di scavo in orario notturno. Le produzioni giornaliere medie sono risultate pari a 1.2-1.4 m/giorno di galleria finita nella formazione delle marni e pari a 1.5-2.0 m/giorno nei calcari. Un significativo rallentamento degli avanzamenti si è registrato nella fase di attraversamento del rilevato ferroviario, in quanto le ridotte portate di iniezione per il controllo dei sollevamenti richiedevano due settimane circa per il consolidamento del campo di avanzamento da 9 m.

Durante il momento della costruzione, nello spirito dell'Approccio ADECO-RS, si è seguita la fase operativa, di applicazione degli interventi di stabilizzazione previsti in progetto, e si è operato il controllo e la verifica della risposta deformativa attesa, in galleria e a piano campagna, così da procedere, nel caso, alla messa a punto del progetto. Non si sono rese necessarie modifiche significative alla sezioni tipo di progetto, salvo qualche adeguamento al contesto geologico-geomeccanico locale.

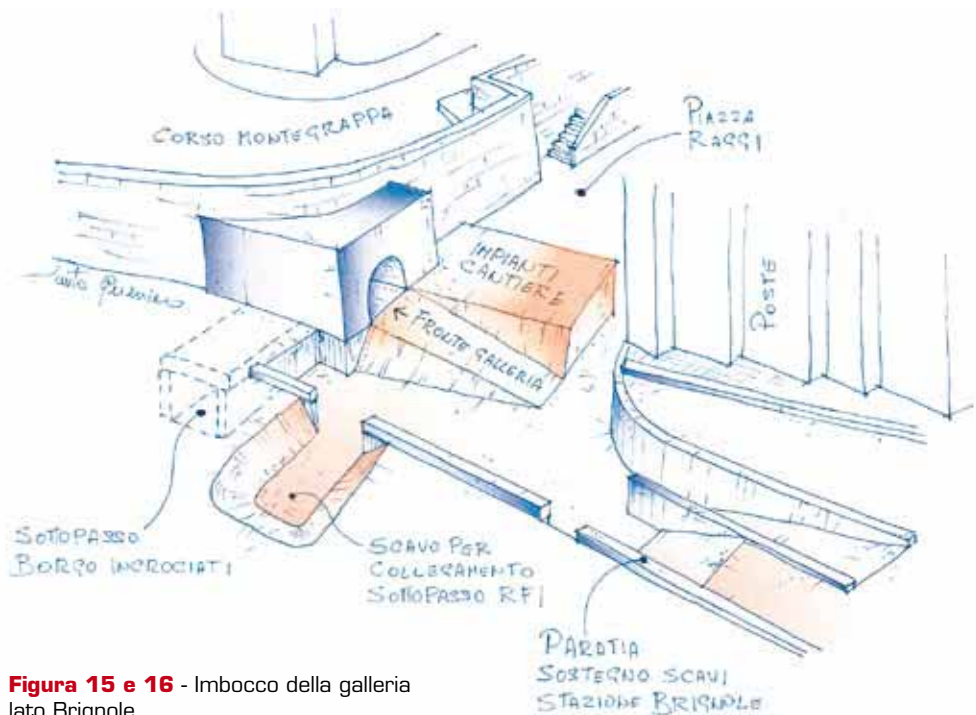


Figura 15 e 16 - Imbocco della galleria lato Brignole

Il sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è risultato uno strumento irrinunciabile per controllare, durante lo svolgimento dei lavori, il comportamento deformativo della galleria, i movimenti nel terreno e la loro propagazione in superficie, nonché i cedimenti e

le rotazioni degli edifici e dei manufatti prossimi al tracciato metropolitano. Il programma è stato predisposto allo scopo di validare od eventualmente adeguare le modalità di avanzamento previste in progetto, a seguito del confronto tra le grandezze previste in progetto e quelle osservate durante i lavori; il superamento



di predeterminate soglie di allarme consente infatti di adottare eventuali provvedimenti correttivi agli interventi previsti, in termini di numero, sovrapposizione dei consolidamenti, passi delle centine, successione delle fasi di lavoro, in particolare le distanze di getto dal fronte dei rivestimenti definitivi, arco rovescio e calotta. Si sono predisposte attività di monitoraggio in galleria ed in superficie eseguite dalla società Stone Spa (Figura 17).

Monitoraggio in galleria:

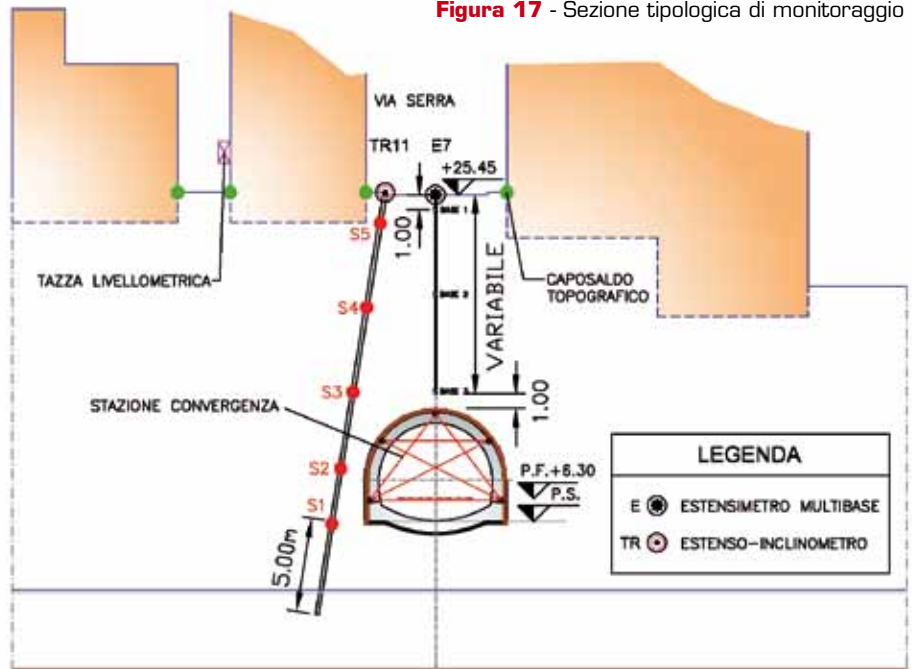
- redazione di rilievi geomeccanici per la restituzione delle caratteristiche geologico-strutturali dell'ammasso al fronte di scavo;
- stazioni di misura delle convergenze, a cinque mire, per il rilevamento tridimensionale degli spostamenti del profilo di scavo, disposte ogni 10-50 m in funzione dei contesti geomeccanici;
- stazioni di misura dello stato tensionale nei rivestimenti mediante barrette estensimetriche da posizionarsi sull'anima del profilato centinato per i rivestimenti di prima fase e sulle armature metalliche per i rivestimenti definitivi.

Monitoraggio di superficie:

- reticolo topografico costituito da capisaldi o basi per livellazioni topografiche di precisione, ubicati principalmente in corrispondenza di edifici, della sede stradale e ferroviaria ed in testa agli strumenti profondi;
- catene livellometriche ubicate sul fronte di alcuni edifici significativi prospicienti la linea, in circuiti da 5-6 tazze ciascuno;
- estensimetri multibase, a 3 basi di lettura, ed estensoinclinometri, con basi di lettura ogni metro, per misure il movimento all'interno del terreno;
- stazioni con clinometri di parete, per la misura della rotazione di alcuni edifici più elevati, rappresentativi lungo il tracciato;
- fessurimetri su lesioni preesistenti per valutare l'evoluzione nel tempo.

Le frequenze di lettura degli strumenti è risultata variabile in funzione della distanza del fronte di scavo dallo strumento: giornaliera per distanze del fronte di avanzamento pari a 30 m prima e 50 m oltre la sezione di controllo e successivamente

Figura 17 - Sezione tipologica di monitoraggio



con cadenza da settimanale a mensile. Gli strumenti del monitoraggio di superficie hanno usufruito di alcune letture anticipate per il controllo dei "disturbi di sottofondo" (background monitoring). Considerato che nei confronti di manufatti esistenti, ancor più critico dei cedimenti assoluti risultano le distorsioni, tale grandezza è stata assunta per la definizione delle soglie di controllo, considerando una distorsione angolata di 1/400 quale soglia di attenzione e di 1/500 quale soglia di allarme (Figura 18). ■

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare l'Ansaldo STS, Concessionaria della linea metropolitana, e Metrogenova Scarl, Impresa affidataria dei lavori, per la proficua collaborazione durante la realizzazione dell'opera. Un ringraziamento particolare ai colleghi Ing. Valerio Torricelli, dott. Fiorenza Pennino e Arch. Santo Guerriero per il prezioso contributo nella messa a punto del progetto costruttivo.

Figura 18 - Catene livellometriche in via Roma

