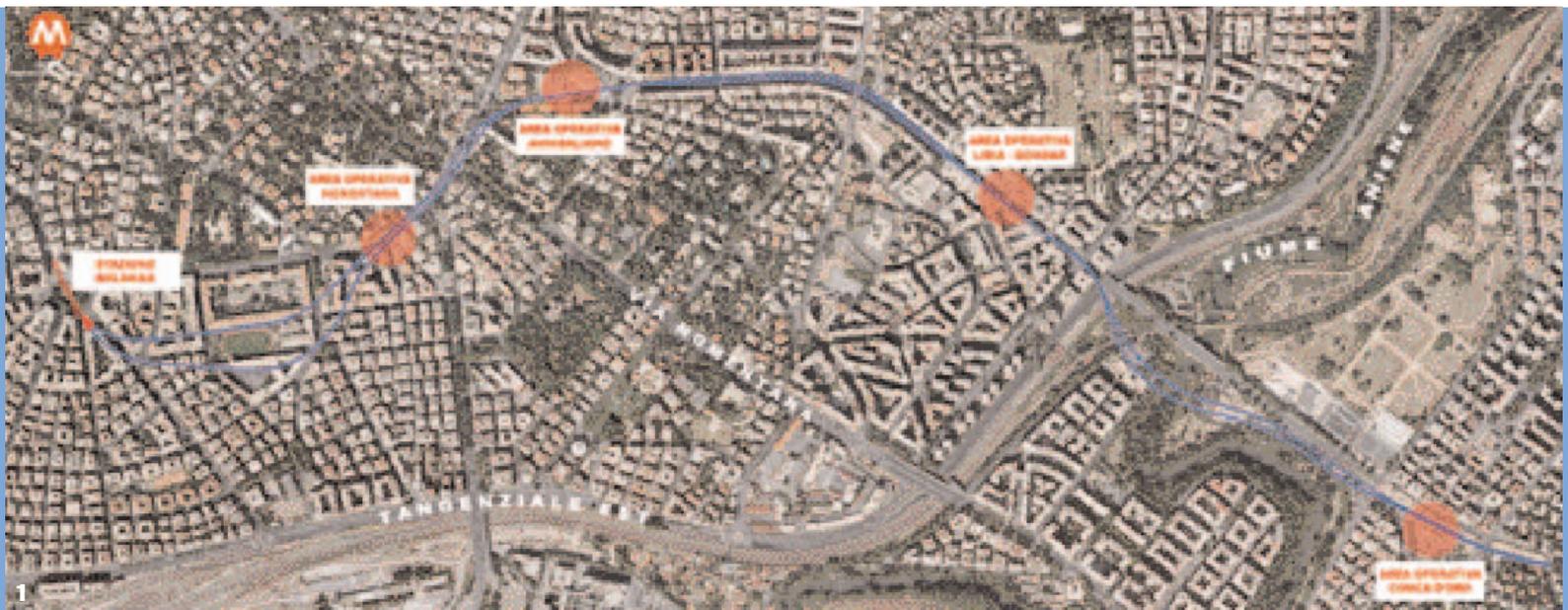


I cantieri della Linea B1 a Roma

La realizzazione di un'opera interrata di tali dimensioni in ambito urbano richiede necessariamente un'attenta valutazione della vulnerabilità del settore territoriale interessato, ed un'altrettanto avveduta determinazione delle modalità esecutive atte a garantire, nei confronti del territorio, la sicurezza in fase di realizzazione e l'idoneità ad opere ultimate. La scelta delle modalità esecutive si basa su due elementi, tra loro differenti ma di pari peso nelle valutazioni da condurre: la "scelta progettuale" e le "tecnologie costruttive". Entrambi tali fattori devono essere opportunamente valutati, in maniera integrata e complementare, ai fini della identificazione, per una determinata opera in uno specifico contesto, delle modalità esecutive ottimali.

É IN CORSO A ROMA LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIRAMAZIONE, LA "LINEA B1", DELLA LINEA B ESISTENTE CHE DALLA STAZIONE BOLOGNA DEVIÀ VERSO I QUARTIERI AFRICANO E MONTESACRO, LUNGO LA DIRETTRICE VIALE XXI APRILE, PIAZZA ANNIBALIANO, VIALE ERITREA, VIALE LIBIA, VIA DELLE VALLI, FINO AD INTESTARSI, AL MOMENTO, A PIAZZA CONCA D'ORO. AD OGGI SONO APERTI I CANTIERI PER L'ESECUZIONE DEI MANUFATTI DI STAZIONE, LA CUI REALIZZAZIONE PARZIALE È PROPEDEUTICA AL TRANSITO DELLE TBM (PER LO SCAVO DELLE GALLERIE DI LINEA).



Per un'opera la scelta progettuale, sulle base dei requisiti funzionali richiesti, ne definisce la tipologia realizzativa, le fasi esecutive, le caratteristiche geometriche e strutturali, nonché tutti gli ulteriori elementi atti a determinare compiutamente il "progetto" dell'opera: "insieme di calcoli, disegni, elaborati necessari a definire inequivocabilmente l'idea in base alla quale realizzare una qualsiasi costruzione".

Del progetto sono poi parte integrante le tecnologie costruttive da adottare per la realizzazione di singoli elementi e/o parti dell'opera in questione: la loro scelta, adeguata al contesto operativo (ambito, geologia, idrogeologia, geometrie, spazi a disposizione,), contribuisce in maniera significativa alla attuabilità della soluzione progettuale determinata.

In maniera del tutto analoga, fin dalla fase di progettazione, consci dei rischi connessi alla realizzazione di una tale opera in un contesto quale quello interessato, si è accentrata l'attenzione sull'impostazione e sulla definizione delle condizioni tecniche (e contrattuali) che consentissero in corso d'opera l'attuazione di un adeguato sistema di monitoraggio. L'obiettivo di tale sistema è quello di consentire una gestione integrata dell'enorme mole di dati raccolti progressivamente nella fase realizzativa, consentendo una valutazione, per quanto possibile esaustiva, nei tempi tecnici adeguati alle eventuali necessità di intervento. Come già evidenziato in altri lavori analoghi in Europa e nel mondo, nell'attuabilità di una soluzione progettuale per opere in sotterraneo in ambito urbano, il sistema di controllo in corso d'opera assume importanza e rilevanza pari a

quelle delle tecnologie costruttive più propriamente dette. Nel presente articolo si accentrerà in particolare l'attenzione su alcune delle tecnologie costruttive in corso di applicazione nei cantieri della Linea B1, che sono state individuate, fin dalla fase di progettazione, come elementi imprescindibili per la sicurezza delle opere e del contesto urbano nella fase realizzativa. In virtù di tale importanza, per tali lavorazioni si è curata in maniera specifica, congiuntamente con l'Appaltatore e con le Imprese sub-appaltatrici specializzate, la messa a punto dei "piani di controllo qualità" da utilizzare sul campo quale strumento per l'attuazione e la registrazione di tutti i controlli (documentali, diretti, indiretti) atti a garantire la conformità del "prodotto" ai requisiti progettuali (e contrattuali). Si farà cenno poi delle modalità con le quali si sta gestendo il monitoraggio tecnico in corso d'opera.

CARATTERISTICHE DELL'OPERA E PROBLEMATICHE REALIZZATIVE

La Linea B1 è una diramazione dell'esistente linea B, della lunghezza complessiva di circa 4 km, che va ad interessare un bacino di utenza significativamente esteso in considerazione della intensa edificazione e urbanizzazione dell'area interessata. Allo stesso tempo un tale contesto richiede necessariamente una forte attenzione al rispetto delle pre-esistenze, sia in fase di esecuzione dei lavori (cedimenti, rumori,) che a opera ultimata e esercizio ferroviario avviato (vibrazioni). Dal punto di vista geologico-geotecnico l'allineamento del tracciato, dettato dalla necessità di

1. Tracciato e aree operative

2. Cantiere di piazza Annibaliano

3. Cantiere di viale Libia



seguire per quanto possibile la richiesta di trasporto e le principali direttrici viarie già esistenti (minimizzazione del rischio cedimenti e vibrazioni), porta ad interessare alcuni dei terreni a peggiori caratteristiche del sottosuolo di Roma (Paleotevere, Alluvioni recenti del fiume Aniene, riporti). Il substrato di tali formazioni, non interessato dall'opera, è costituito dalle argille limose e limi argillosi grigio-azzurri di ambiente marino, di età pliocenica (Argille azzurre Vaticane). Le profondità della linea e delle stazioni vengono quindi dettate da un compromesso tra la necessità tecnica di ridurre al minimo i potenziali disturbi indotti in superficie e sulle pre-esistenze, e la necessità gestionale di non realizzare stazioni e accessi alla linea troppo profondi e quindi di scarsa ricettività. Nella soluzione progettuale individuata come ottimale, partendo dal punto di bivio della stazione Bologna, dove la profondità del piano ferro è dettata da quella dell'attuale linea B (12 m minimo), il tracciato si sviluppa plano-altimetricamente fino a raggiungere i circa 35-40 m di profondità in corrispondenza del sotto-attraffersamento di via Nomentana (alto morfologico). Le profondità diminuiscono poi leggermente in corrispondenza di piazza Annibaliano (circa 20 m minimo per la galleria superiore) per poi aumentare fino ai 25 m minimi (per la galleria superiore) riscontrabili al di sotto di viale Libia, propedeutici all'ulteriore approfondimento in corrispondenza del sotto-attraffersamento del fiume Aniene (circa 40 m al di sotto della quota degli argini, e quindi circa 20 m sotto l'alveo attuale). In corrispondenza di piazza Conca d'Oro la linea risale fino ad una profondità minima di circa 20 m dal piano campagna attuale. Tale andamento plano-altimetrico e la situazione idrogeologica dell'area portano a situazioni di battente idraulico insistente sulle opere da realizzare anche di 3-3,5 bar.

SOLUZIONI TECNOLOGICHE INDIVIDUATE IN SEDE DI PROGETTAZIONE

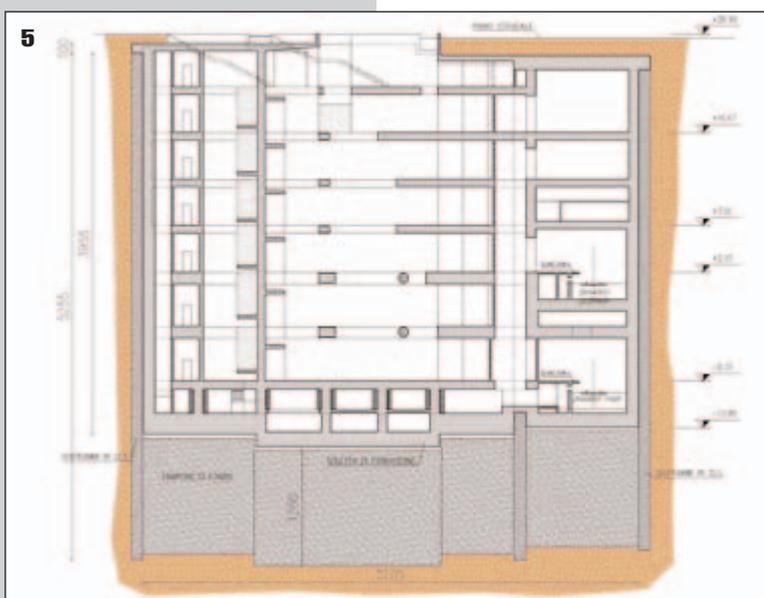
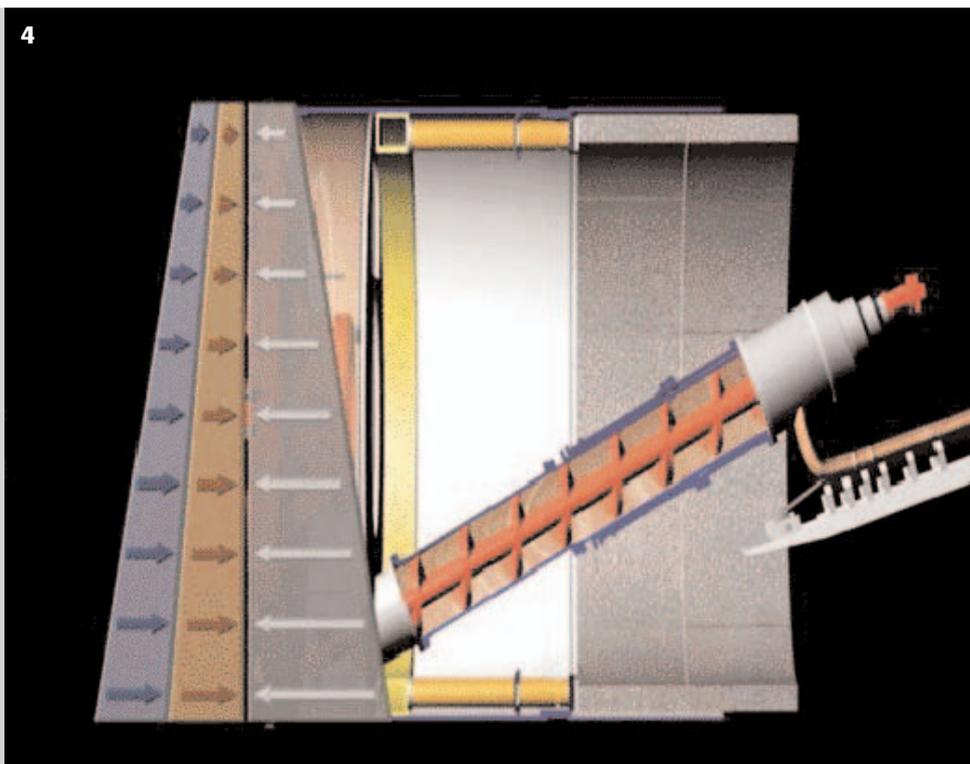
La scelta dei sistemi costruttivi con cui si è previsto di realizzare le opere costituenti la nuova Linea metropolitana è mirata alla riduzione della interferenza con le preesistenze, soprattutto in termini di cedimenti indotti in superficie.

Tra le evidenze più importanti emerse dalle indagini e dalle prove in sito effettuate (quest'ultime anche a scala paragonabile a quella dell'opera da realizzare) vi è sicuramente la verifica dell'importanza di un assoluto idrostatismo nelle fasi esecutive, in

quanto un seppur minimo drenaggio e conseguente abbattimento della falda più superficiale (all'interno dei riporti e/o dei depositi fini superiori) si traduce a stretto giro in una subsidenza del piano campagna. Di conseguenza sono state previste tecniche e tecnologie costruttive specifiche per l'esecuzione delle gallerie a foro cieco e dei manufatti tra paratie tali da garantire la tenuta idraulica del profilo di scavo e dei giunti anche nelle fasi di scavo.

Nella scelta della tipologia del sistema di scavo da utilizzare per la realizzazione delle gallerie di linea sono stati considerati vari fattori quali: il tracciato plano-altimetrico, per la valutazione delle interferenze con le preesistenze e delle problematiche di inserimento geometrico della sezione di scavo nel contesto stratigrafico ed idrogeologico; i risultati delle indagini geotecniche effettuate, con particolare riguardo: alle distribuzioni granulometriche comprese le frazioni fini, ai limiti di Atterberg, ai coefficienti di permeabilità ed alla posizione della falda con le relative escursioni stagionali; le possibilità offerte dalle diverse tecniche di scavo (in tradizionale e meccanizzato); nell'ambito dello scavo meccanizzato le problematiche di natura tecnologica dei diversi sistemi (scudo aperto, a pressione di fango, a pressione di terra) o, mirate all'ottenimento dei seguenti risultati: maggiore garanzia di stabilità del fronte di scavo e di conseguente contenimento delle deformazioni indotte nell'ammasso; minimizzazione dei cedimenti superficiali indotti dallo scavo; maggiore affidabilità dello scavo sotto falda; velocizzazione delle fasi di scavo e di rivestimento; industrializzazione delle fasi operative. La valutazione degli aspetti di cui sopra ha indirizzato la scelta verso una soluzione con scavo meccanizzato, realizzato mediante scudo a pressione di terra bilanciata (tipo EPBS, "Earth Pressure Balance Shield"), attualmente tra le tecnologie più moderne disponibili nel settore. Lo scavo in tradizionale è stato escluso quale metodo realizzativo delle gallerie di linea, in quanto richiederebbe notevoli opere sistematiche di pre-consolidamento e consolidamento, con conseguenti ridotte velocità di avanzamento ed elevati costi, senza peraltro raggiungere le stesse garanzie di controllo dei cedimenti e quindi dei rischi di danno alle opere preesistenti in superficie ottenibili con uno scavo meccanizzato con contropressione al fronte.

Lo scavo meccanizzato con contropressione al fronte di scavo (vedi schema in fig. 4) è invece in grado di ottenere (e mantenere), con un corretto funziona-



4. Schema funzionamento TBM tipo EPB

5. Stazione Libia/Gondar - sezione indicativa

6. Stazione Conca d'Oro - sezione indicativa

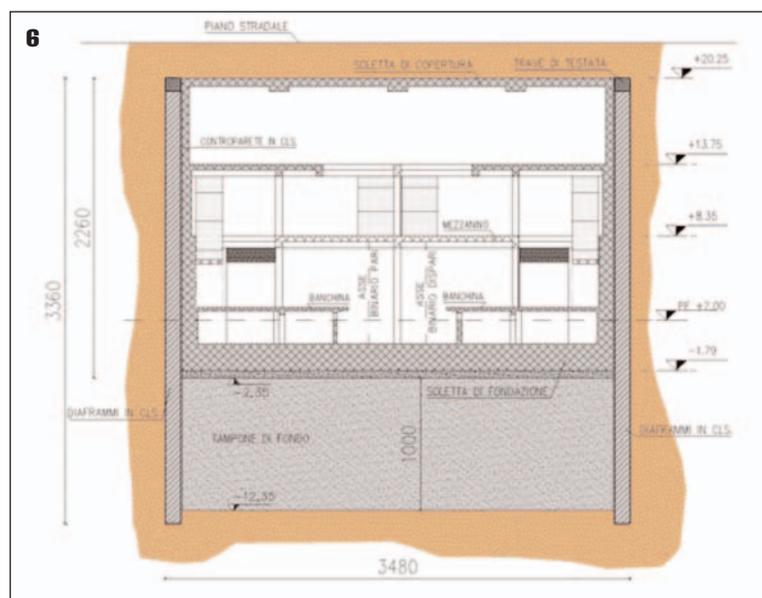
mento della macchina e con un attento controllo in corso d'opera, valori di cedimento superficiale accettabili, entro i limiti imposti progettualmente. Tale sistema garantisce infatti la possibilità di applicare una corretta pressione sul fronte di scavo in modo continuo e modulabile in ogni fase di lavorazione non consentendo così la decompressione del nucleo di terreno in avanzamento (controllo dei cedimenti in superficie), e contrastando la pressione esercitata dall'acqua (riduzione del drenaggio indotto).

La scelta di un "EPBS" deriva da una maggiore velocità di adattamento alle possibili diverse situazioni

litologiche, ad un miglior controllo della pressione al fronte anche in zone a maggiore permeabilità, ai minori ingombri necessari e costi legati alla cantierizzazione, alla più facile ed immediata trasportabilità dello smarino.

Per le stazioni non realizzate a foro cieco la soluzione costruttiva individuata prevede lo scavo sotto copertura, protetto da paratie di sostegno in c.a. eseguite da piano campagna, procedendo per campioni e realizzando al termine di ogni step un orizzonte definitivo (soffitto in c.a.) o provvisorio (puntoni metallici) di contrasto. Ciò fino ad arrivare al fondo dello scavo, protetto da un tampone di fondo realizzato da piano campagna, e poter così realizzare il solettone di fondo della stazione. Le pareti della "scatola" ed il completamento delle strutture interne orizzontali saranno realizzate in risalita, dopo aver posto in opera la prevista impermeabilizzazione.

In fig. 5 è riportata una sezione indicativa della stazione Libia/Gondar in corrispondenza dell'intersezio-



ne tra il pozzo di linea (con le banchine di accesso ai treni, ed i locali tecnologici) ed il pozzo di stazione, all'interno del quale sono ubicati tutti i collegamenti verticali tra piano stradale e banchine. Nella fig. 6 è invece riportata una sezione indicativa della stazione Conca d'Oro.

Per le opere più profonde (anche 45 m di scavo) e/o ubicate nelle aree a maggiore rischio (pre-esistenze immediatamente a ridosso degli scavi) è stato previsto l'utilizzo della tecnologia dell'idrofresa per la realizzazione delle paratie perimetrali, puntando alla massima garanzia possibile per la tenuta idraulica dei

giunti tra pannelli adiacenti. Per le opere più superficiali, per le quali è previsto l'utilizzo delle benne mordenti classiche, si è comunque prescritto l'utilizzo di particolari accorgimenti per la chiusura dei suddetti giunti (tubo-spalla, water-stop, iniezioni,.....). Per tutte le opere tra paratie è stato comunque previsto, e opportunamente dimensionato dal punto di vista statico e "idraulico", un tampone di fondo realizzato con la tecnologia del *jet-grouting*.

La complessità del lavoro ed il contesto di realizzazione accentuano inoltre l'importanza ed il ruolo del monitoraggio geotecnico-strutturale-ambientale per a gestione in corso d'opera delle modalità esecutive, delle tecniche applicate, delle attrezzature utilizzate, delle fasi di lavoro adottate in funzione del rispetto e della sicurezza del contesto e delle pre-esistenze. In quest'ottica, un valido supporto alle decisioni è rappresentato dai Sistemi Informativi, ovvero sistemi in grado di gestire ed elaborare grandi quantità di dati e da essi produrre informazione, che possa essere utilizzata a scopo di pianificazione e gestione. Nello specifico, risultano particolarmente indicati i Sistemi Informativi Geografici (abbreviati in GIS), che sono speciali sistemi informativi adatti alla manipolazione e visualizzazione di dati spazialmente distribuiti, riferiti ad elementi (territoriali), attività, eventi o valori. L'insieme di questi dati viene tradizionalmente riferito alla superficie terrestre e quindi ad uno spazio bidimensionale caratterizzato da una coppia di coordinate; nel caso del monitoraggio di un'opera come quella in oggetto, risulta necessario considerare anche la dimensione tempo. Si è quindi prevista l'implementazione e l'utilizzo in corso d'opera di un Sistema Informativo Geografico per la gestione del Monitoraggio con lo scopo di archiviare, rendere consultabili ed elaborabili i dati derivanti dal monitoraggio geotecnico-strutturale-ambientale in tempo reale dei lavori di avanzamento della linea B1, consentendone un confronto tra loro in un intorno significativo rispetto all'opera/parte d'opera/lavorazione in esame, fornendo così un supporto alle eventuali decisioni/azioni correttive da adottare.

FASE ATTUATIVA. DA NOVEMBRE 2005 A LUGLIO 2007

A partire dal mese di novembre 2005 (consegna dei lavori) l'Appaltatore (ATI tra Salini Costruttori Spa, Maire Engineering Spa, Icop Spa, TPM Srl) ha avviato le attività propedeutiche ai primi lavori di esecu-

zione delle opere: cantierizzazioni, deviazioni del traffico, bonifica ordigni bellici, indagini archeologiche, testimoniali di stato, predisposizione monitoraggio. Tali attività si sono sviluppate nel tempo in maniera differenziata per le quattro aree operative principali, a seguito di peculiarità note (rischio archeologico, impatto dei cantieri sulla viabilità,....) e/o problematiche sopraggiunte (interferenze pp.ss, bonifiche ambientali, interventi compensativi,...), specifiche di ciascuna di esse. In generale le lavorazioni afferenti direttamente le prime opere da realizzare sono iniziate nella primavera 2006, con l'esecuzione dei primi diaframmi perimetrali di stazioni e pozzi. Relativamente alle "tecnologie costruttive" sopra descritte, al mese di agosto 2007 risultano eseguiti circa 43.000 m² di diaframmi realizzati con idrofresa, circa 13.000 m² di diaframmi realizzati con benna mordente, circa 85.000 m di trattamenti *jet-grouting* per i tamponi di fondo.

In particolare la tecnologia dell'idrofresa è stata utilizzata per la realizzazione dei diaframmi per la stazione Annibaliano (figg. 7, 8), ad oggi completati. Si tratta di elementi di spessore variabile pari a 0,80 m (diaframmi centrali) e 1,20 m (diaframmi perimetrali), della larghezza di 2,80 m e della profondità dal piano campagna variabile tra 40 e 45 m. All'interno di ciascuno di tali elementi, una volta completato lo scavo eseguito in presenza di fanghi bentonitici, è stata inserita una gabbia di armatura a tutta altezza del peso di circa 40.000 Kg. A seguire è stato realizzato il getto (volume circa pari a 150 m³) con cls avente Rck ≥ 30 MPa. Per quanto riguarda i tempi di esecuzione del singolo elemento, dai riscontri sul campo si possono evidenziare le seguenti durate medie delle fasi elementari di lavoro: scavo circa 4-6 h, posa armature circa 3 h, getto circa 4 h. I controlli effettuati in fase di esecuzione hanno evidenziato che nessun pannello ha superato lo scostamento massimo dalla verticale teorica prescritto progettualmente (0,5% della profondità): dei 212 pannelli solo il 10% circa ha registrato deviazioni superiori allo 0,2%. La tecnologia del *jet-grouting* per la realizzazione del tampone di fondo è in corso di applicazione in maniera estensiva nei cantieri della stazione Conca d'Oro (fig. 9) e della stazione Annibaliano (fig. 10). Nella prima area si prevede la realizzazione di un tampone di fondo di altezza variabile tra 7,5 e 10,0 m, alla profondità di circa 22 m dall'attuale piano campagna (quota testa tampone). In considerazione degli esiti dei campi prova appositamente realizzati, si è opta-

7. idrofresa

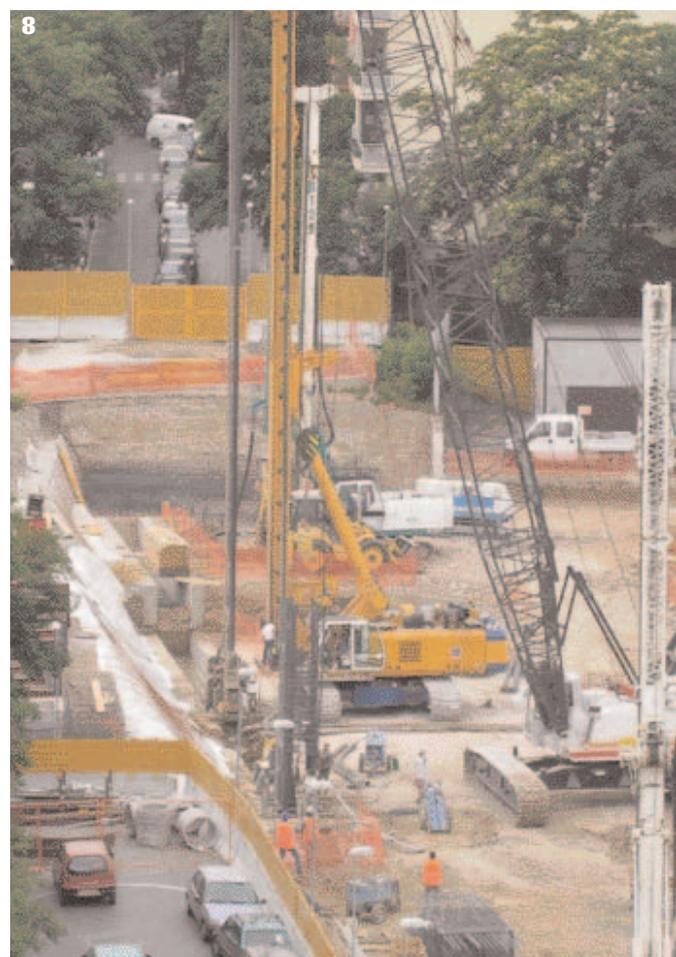
8. idrofresa nel cantiere di piazza annibaliano



to per parametri operativi atti a realizzare trattamenti di diametro efficace reso di 1,5 m con una maglia di perforazioni da p.c. equidistanziate di 1,04 m. Il "coefficiente di ricoprimento" (D/I) è quindi pari a circa 1,4. Nell'area della stazione Annibaliano, le geometrie e le verifiche progettuali richiedono la realizzazione di un tampone di fondo dello spessore di 12 m, ad una profondità di 35 m dall'attuale piano campagna (quota testa tampone). In considerazione delle maggiori profondità e come confermato dagli esiti dei campi prova, mantenendo lo stesso diametro efficace reso (1,5 m) si è optato per una maglia di perforazioni da p.c. equidistanziate di 0,95 m. Il conseguente "coefficiente di ricoprimento" (D/I) è quindi pari a circa 1,6. Gli esiti delle prove e dei controlli attualmente in esecuzione sui settori di tampone già completati in entrambe le stazioni stanno fornendo, allo stato, riscontri positivi circa l'adeguatezza di tali scelte tecnologiche ed operative rispetto alle necessità progettuali. Per quanto riguarda l'aspetto produttivo, in entrambe le aree sono state messe all'opera anche 4 attrezzature contemporaneamente. Con tale configurazio-

ne si è arrivati, lavorando su 16 ore, ad una produzione media di circa 20-25 trattamenti/giorno ad Annibaliano e di circa 40-45 trattamenti/giorno a Conca d'Oro.

Relativamente al monitoraggio l'Appaltatore ha progettato, impostato ed implementato un sistema informativo specificatamente creato per il lavoro in questione: "HI-CAP Monitor" (fig. 11). La sua piattaforma GIS consente di visualizzare la situazione aggiornata della strumentazione installata con riferimento al tracciato ed alle opere. Le caratteristiche della strumentazione sono consultabili in apposite schede contenute nel database del sistema. Analogamente i dati relativi alle letture effettuate sulla strumentazione sono inseriti sistematicamente all'interno dello stesso database, in modo da consentire diverse tipologie di interrogazione del sistema (e, conseguentemente, di risposta): per singolo strumento, per gruppi di strumenti, per tipologia di strumenti, per opera, per area, per data, per periodo temporale, o per più di uno di tali elementi insieme. Allo stato il sistema sta gestendo i circa 850 strumenti installati (inclinometri, assestimetri, piezometri, capisaldi, staffe, celle di carico, barrette estensimetriche,....) e consente di visualizzare le circa 111.000 letture su di essi effettuate.





9

A regime si ipotizza di arrivare a dover gestire contemporaneamente circa 1500-2000 strumenti attivi e oltre 500.000 letture.

IL PROSSIMO FUTURO

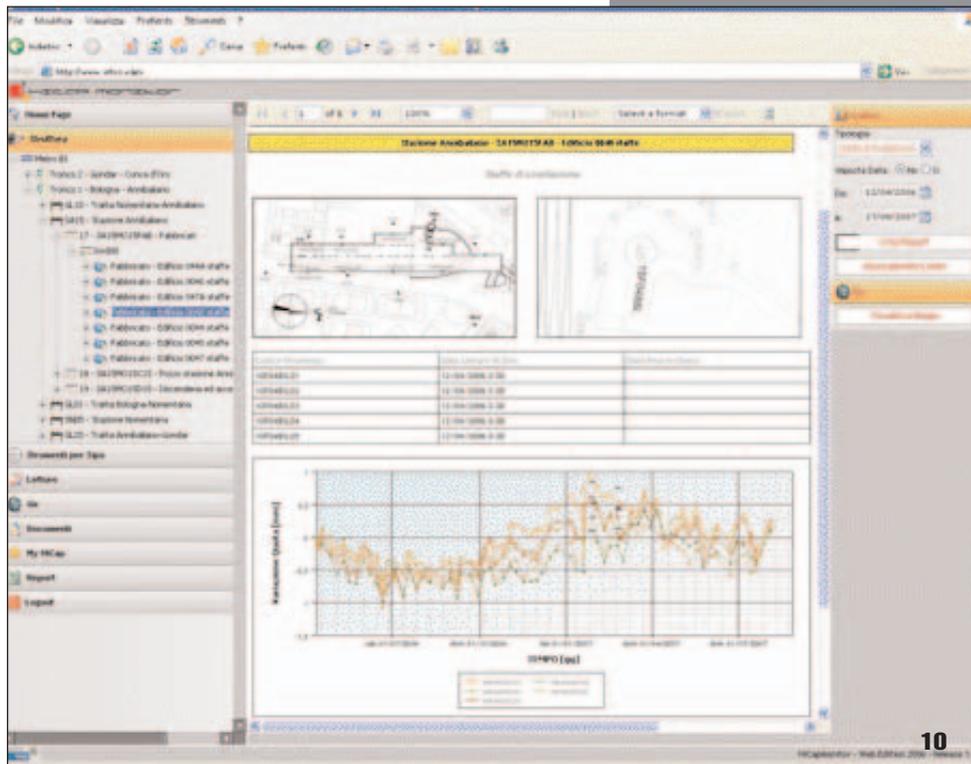
Le lavorazioni di idrofresa e *jet-grouting*, in virtù dell'organizzazione e della prevista fasizzazione dei cantieri (aree operative acquisite, e restituite, per fasi per ridurre l'impatto sulla viabilità), avranno termine ultimo solo tra diversi mesi, con numero di attrezzature e risorse gradualmente decrescenti con la riduzione delle quantità di lavoro.

A livello generale il prossimo futuro dei cantieri della Linea B1 vedrà invece progressivamente l'avvio delle lavorazioni afferenti i solai di copertura (carpenterie e getti) e degli scavi di sbancamento all'interno delle "scatole" già realizzate con paratie e tamponi di fondo.

Nell'area operativa di Conca d'Oro già dal mese di agosto 2007 si sta procedendo con lo scavo di sbancamento per livelli (in altezza) ed a campioni (planimetricamente), immediatamente seguito dalla posa dei relativi contrasti metallici provvisori (metodo "*bottom-up*"). Ad Annibaliano, invece, si sta procedendo con la preparazione del getto del primo settore del solaio di copertura definitivo della stazione (metodo "*top-down*").

Ad inizio del 2008 è invece previsto l'arrivo in cantiere della prima delle due TBM da impiegare per lo scavo delle gallerie di linea (la seconda seguirà a distanza di qualche mese). Da quel momento saranno attivi tutti i fronti principali di lavoro (stazioni e gallerie di linea) sui quali andranno concentrati l'attenzione e l'impegno (organizzativo e produttivo) ai fini del mantenimento dei tempi di ultimazione dell'opera. ■■

10



10

9. jet-grouting nel cantiere di piazza Conca d'Oro

10. jet-grouting nel cantiere di piazza Annibaliano

11. HI-CAP Monitor - esempio di visualizzazione