

Il passante ferroviario di Torino in primo piano

STEFANO CIUFEJNI,* PIERLUIGI CUPPONE,*
MATTEO RICHIARDONE,* FRANCESCO SACCHI*

Metodologie e tecniche di indagine per il controllo di terreni consolidati con jet grouting e iniezioni a bassa pressione

*ITLFERR S.P.A.

Premessa

Il Progetto di realizzazione del Passante Ferroviario rappresenta la più grande infrastruttura realizzata a Torino nel dopoguerra ed un'opera unica in Italia che consiste nella realizzazione di una linea ferroviaria, di nuova concezione, che attraversa la Città dalla Stazione Lingotto alla

Stazione Stura in sotterraneo, prevedendo il sottoattraversamento del fiume Dora Riparia.

La prima fase (Ovest), è oramai stata completata con l'attivazione dei primi due binari, sui quali è stata spostata la circolazione dei treni della linea storica; que-



sto sta permettendo la realizzazione della fase Est, in asse con la vecchia linea di superficie, che sarà attivata entro il 2012. A ultimazione del quadruplicamento, la canna Ovest ospiterà i treni della così detta "linea lenta", destinata ai treni del traffico locale, mentre la canna Est ospiterà i treni della "linea veloce", destinata ai treni di lunga percorrenza (Alta Velocità).

Durante la realizzazione della fase Ovest erano state sviluppate, con ottimi risultati, tecniche che hanno permesso il controllo di circa il 90% delle colonne costituenti il tappo di fondo (*Quarry and Construction*, giugno 2007 e gennaio 2008). Durante lo sviluppo della fase Est è emerso che le condizioni operative di cantiere, in termini di spazio, disposizione, tipologia e tempistiche delle lavorazioni, rendevano difficoltoso lo studio con le stesse metodologie, pertanto ancora una volta si sono sperimentate, con successo procedure e tecniche che permettessero di raggiungere lo stesso obiettivo di controllo delle colonne eseguite.

L'esperienza sviluppata con il jet grouting è stata, inoltre, applicata anche alle iniezioni a bassa pressione e saranno, pertanto, presentate le indagini sviluppate sia in fase di progettazione che durante l'esecuzione di questa tecnica di consolidamento.

Il passante ferroviario di Torino

Il Passante ferroviario per la città di Torino è un'infrastruttura cardine per il riassetto urbanistico della città. Iniziati nel 1986, i lavori dovrebbero concludersi nel 2012: a opera ultimata il capoluogo piemontese disporrà di

Figura 1 - Sistema trasporti Torino



un collegamento ferroviario integrato, interrato per ben 15 km, e riprenderà possesso di 260 mila metri quadri di superficie, cancellando la ferita che tagliava in due il tessuto urbano.

Quando all'inizio degli anni '80 si iniziò a parlare di Passante si veniva da oltre 80

anni di immobilità nello schema delle linee ferroviarie. Con il termine di Passante si dovrebbe indicare semplicemente il tratto in galleria compreso fra le Stazioni di Lingotto e Porta Susa, ma in realtà nell'immaginario collettivo della cittadina esso è andato a includere anche

Figura 2



che il quadruplicamento dei binari tra la stazione di Porta Susa e quella di Stura. La necessità di eliminare la frattura determinata dai binari in città ha portato alla scelta di eseguire tutto il lavoro abbassando il piano del ferro, aggiungendo il concetto della riqualificazione urbana.

Questo obiettivo imponeva lo sviluppo di un progetto che si presentava come uno dei più innovativi e importanti a livello europeo, realizzando tutto in sotterraneo. Questo ha significato non solo ricucire la frattura, ma anche liberare molte aree in superficie per costruire nuovi insediamenti.

In sintesi, la realizzazione del Passante Ferroviario che è il complesso delle linee ferro-

viarie che attraversano la città dalla stazione di Stura a quella del Lingotto, e fa riferimento al programma di riorganizzazione e potenziamento del nodo ferroviario Torinese.

Il piano degli interventi, come detto, si propone di raggiungere quattro obiettivi:

- inserire Torino nella rete veloce europea, con la costruzione del quadruplicamento per Milano (sui 2 nuovi binari sarà instradata, in ambito urbano l'Alta Velocità);
 - aumentare la qualità dei collegamenti ferroviari, regionali e nazionali;
 - realizzare un nuovo sistema di trasporto pubblico integrato regionale e metropolitano;
 - consentire l'attuazione del progetto urbano indicato nel Piano Regolatore, ricongiungendo le parti di città separate dalla ferrovia.
- Il progetto può essere riassunto con i seguenti dati:
- lunghezza percorso ferroviario (da Lingotto a Stura): 12 km;
 - interrimento max del piano ferro, ri-

spetto al piano stradale: 18 m (zona stazione Zappata e Dora);

- copertura trincee ferroviarie: 260.000 mc;
- scavi all'aperto: 2.000.000 mc;
- 7 stazioni in area urbana: Lingotto, Zappata, Porta Susa, Porta Nuova, Dora, Rebaudengo, Stura, di cui 2 di nuova realizzazione (Zappata e Rebaudengo);
- lunghezza del nuovo viale alberato da corso Turati a corso Grosseto (Spina Centrale): 7.5 km;
- massima larghezza del nuovo viale alberato: 90 m.

Il passante di Torino tra Porta Susa e Stura

Il progetto prevedeva la realizzazione di 8 km in galleria in due fasi, Est e Ovest, con approfondimento massimo del piano campagna di 20 m. Il tutto in ambiente urbano con forti e pesanti condizionamenti, legati sia alla linea ferroviaria già esistente che al tessuto abitativo.

Particolarmente eloquenti i numeri dell'intervento:

- 8 km di galleria artificiale da realizzare in ambito urbano,
- 980.000 m³ di calcestruzzo,
- 113.600.000 kg di acciaio in barre,
- 2.100.000 m³ di scavi prevalentemente in galleria,
- 275.000 m² di diaframmi di paratia,
- 70.000 colonne di terreno consolidato con jet grouting (per circa 600 km di terreno trattato e 1.400 Km di perforazione a vuoto),
- 60.000 m di pali di grande diametro.

Indagine geofisica tappo di fondo

Dopo l'esperienza maturata durante la costruzione della galleria Ovest, era stata confermata anche per il "tappo di fondo" della fase Est la stessa tecnica di monitoraggio geofisico multimetodologico, in modo da caratterizzare il corpo solido ot-

Figura 3 - Uscita gallerie a Corso Grosseto





tenuto dalla compenetrazione delle colonne di consolidamento e valutare l'omogeneità costruttiva dell'intervento. La metodologie applicate avevano permesso di individuare, mediante sistemi di indagine non invasiva, la presenza di eventuali discontinuità, cavità, aperture "passanti" nel suo interno o locali anomalie di continuità delle caratteristiche del tappo di terreno consolidato.

Era risultato evidente che i sondaggi a carotaggio continuo se da una parte rendevano visibile la qualità del processo di consolidazione, dall'altra presentavano il limite che le informazioni fornivano riguardavano solo il volume perforato, con il rischio di sovrastimare sia le anomalie che i risultati positivi.

In ultima analisi, con questo tipo di indagine, si tratta di estendere spazialmente le informazioni che le indagini dirette (sondaggi e prove di laboratorio) forniscono, oppure individuare e valutare la gravità di eventuali anomalie presenti e non rilevate dai sondaggi.

Le tecniche previste, pertanto, erano costituite da indagini geofisiche bidimensionali con stendimenti superficiali e idrofoni

in foro (detti "Rettangoli") e quella con stendimenti superficiali affiancati (*Quarry and Construction*, gennaio 2008).

I profili tomografici affiancati sono stati realizzati disponendo catenarie di geofoni affiancate tra loro ad una distanza massima di 4 ÷ 5 m.

Attraverso la registrazione dei tempi di

arrivo delle onde sismiche longitudinali (onde P), emesse da una fonte di energia, si correla alla velocità la densità del materiale che le onde percorrono e si discriminano, visualizzandole in bidimensionale, le porzioni di terreno non trattato da quello jettinettato e le eventuali discontinuità presenti.

La tomografia sismica bidimensionale con l'acquisizione delle sezioni tomografiche lungo la congiungente dei centri dei sondaggi precedentemente predisposti era prevista laddove la profondità del tappo di fondo era tale da rendere inutilizzabili gli stendimenti superficiali.

L'acquisizione di ogni sezione prevedeva il posizionamento in un foro di una catenaria di idrofoni spazati a 1 m, mentre nel foro opposto venivano creati impulsi sismici procedendo da fondo foro a risalire verso la superficie ad intervalli regolari di 1 m.

Contemporaneamente venivano registrati gli arrivi relativi ad una serie di geofoni allestiti sulla superficie lungo la congiungente dei sondaggi citati. La procedura di acquisizione veniva ripetuta invertendo la posizione dei sensori e dei punti di energizzazione.

Da subito è emersa la difficoltà a compatibilizzare queste indagini con la complessità del cantiere: la presenza di un forte rumore di fondo e la mancanza di spazio



rischiavano di rendere poco affidabili i risultati delle indagini.

In questa ottica si è deciso di sperimentare l'utilizzo del rilievo geoelettrico.

Questo, infatti, è un metodo non invasivo che, attraverso l'energizzazione diretta del sottosuolo tramite un'immissione di corrente esterna, permette di ricavare informazioni riguardanti la geometria e la localizzazione di strutture nel terreno, sulla base delle loro proprietà elettriche, attraverso misure di differenza di potenziale. Il parametro di base è la resistività elettrica, proprietà fisica che esprime la "resistenza" che i materiali offrono al passaggio della corrente (metodo della resistività).

Il rilievo geoelettrico quindi, al contrario della sismica, non risente della presenza di rumore di fondo, per la metodologia intrinseca che ne è alla base: la resistività infatti non risente delle vibrazioni del sottosuolo generate in continuo dalle macchine operatrici presenti e ne permette dunque un suo utilizzo in contemporanea e nelle loro immediate vicinanze.

Inoltre la tecnica geoelettrica assicura una buona risoluzione anche in profondità, andando così a colmare le "lacune", in termini di risoluzione, della sismica di superficie che ha il limite di investigare accuratamente solamente i primi 20 m di profondità.

Rispetto invece alla realizzazione di un'indagine sismica tomografica in foro, che richiede il compimento dei sondaggi e un'esecuzione abbastanza laboriosa, risulta nettamente più veloce.

Tutto questo, come si può comprendere, ha comportato dunque una notevole ottimizzazione, compatibilizzando i tempi in un cantiere dinamico ed in continua evoluzione come quello di Torino con la necessità di acquisire le informazioni sulla qualità del "tappo di fondo".

In questa ottica i sondaggi a carotaggio

continuo sono stati utilizzati solo per il prelievo di campioni per la verifica delle caratteristiche meccaniche del terreno trattato e come verifica, laddove si registravano delle anomalie.

Come è comprensibile, non essendo più vincolati da una geometria "esatta", necessaria per l'indagine sismica, i sondaggi non hanno interferito con le normali attività del cantiere.

Per verificare e certificare la funzionalità della nuova metodologia di indagine in due zone, in cui era già stato eseguito il



tappo di fondo, sono state indagate le caratteristiche del terreno sia con la geofisica tradizionale (profili tomografici da superficie e sezioni tomografiche eseguite tra fori di sondaggio) sia con sezioni tomografiche elettriche che rappresentano modelli di resistività del sottosuolo ad alta risoluzione.

I risultati sono apparsi perfettamente confrontabili e questo ha permesso di poter analizzare il tappo di fondo eseguito senza interferenze con il cantiere.

Profili tomografici elettrici

Metodologia

La metodologia generalmente definita "geoelettrica" rappresenta uno dei metodi geofisici più utilizzati per la caratterizzazione dei materiali e in particolare del sottosuolo.

I recenti sviluppi della miniaturizzazione elettronica e delle procedure di acquisizione dati gestite "via" software hanno consentito di applicare questa metodologia, un tempo lenta e laboriosa, ai più disparati settori dello studio del sottosuolo con tempistica e dettaglio un tempo impensabili. Il parametro di base è la resistività elettrica, proprietà fisica che esprime la "resistenza" che i materiali offrono al passaggio della corrente.

Le misure geoelettriche consentono quindi, studiando le deformazioni del flusso di corrente causate dalle diverse strutture presenti nel sottosuolo, di caratterizzare le strutture stesse e ricostruirne la distribuzione spaziale. La resisti-

tività delle diverse formazioni geolitologiche è determinata essenzialmente dai seguenti fattori:

- porosità;
- forma;
- dimensione e continuità dei pori;
- percentuale di contenuto d'acqua dei pori;
- salinità del liquido di saturazione dei pori;
- presenza di matrice a granulometria fine;
- conducibilità intrinseca dei minerali di base.

Acquisizione dati

Come accennato la misura del valore di resistività elettrica dei materiali si realizza creando un campo elettrico artificiale nel mezzo da indagare e studiandone la distribuzione nel sottosuolo. Il dispositivo di misura classico è costituito da due coppie di elettrodi metallici infissi nel terreno a distanze opportune (dispositivo quadripolare).

Generalmente i dispositivi utilizzati sono simmetrici rispetto ad un punto centrale O al quale si riferisce il valore misurato (figura 4).

Nelle figure la coppia (C1-C2) costituisce il circuito con il quale s'immette corrente nel terreno, la coppia (P1-P2) è il circuito di misura della differenza di potenziale generata nel terreno stesso dal passaggio della corrente.

Si misurano così le variazioni del campo elettrico, indotte dalle eterogeneità litologiche presenti nel sottosuolo: queste variazioni sono più o meno marcate in funzione del contrasto di resistività elettrica esistente fra mezzi con caratteristiche differenti.

La distribuzione della corrente in profondità e quindi la profondità dell'esplorazione è essenzialmente legata alla distanza tra i due elettrodi C1 e C2 e alle caratteristiche intrinseche del mezzo esplorato.

La scelta del dispositivo più opportuno è legata alle condizioni dell'area da indagare, sia in termini strutturali sia di rapporto segnale-rumore (S/N).

Dalla misura dell'intensità di corrente che

Figura 4 - Schemi di acquisizione

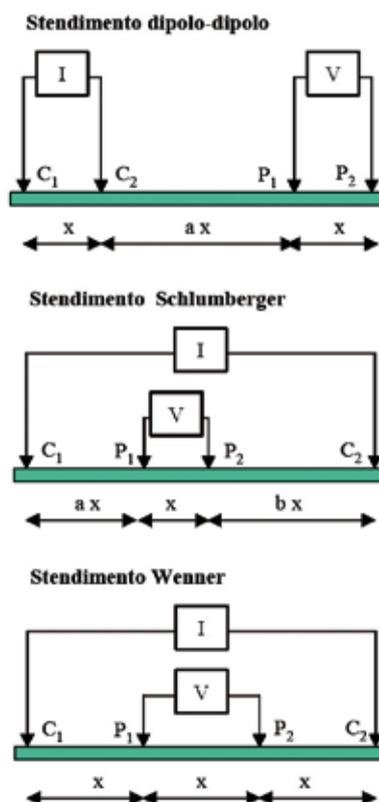
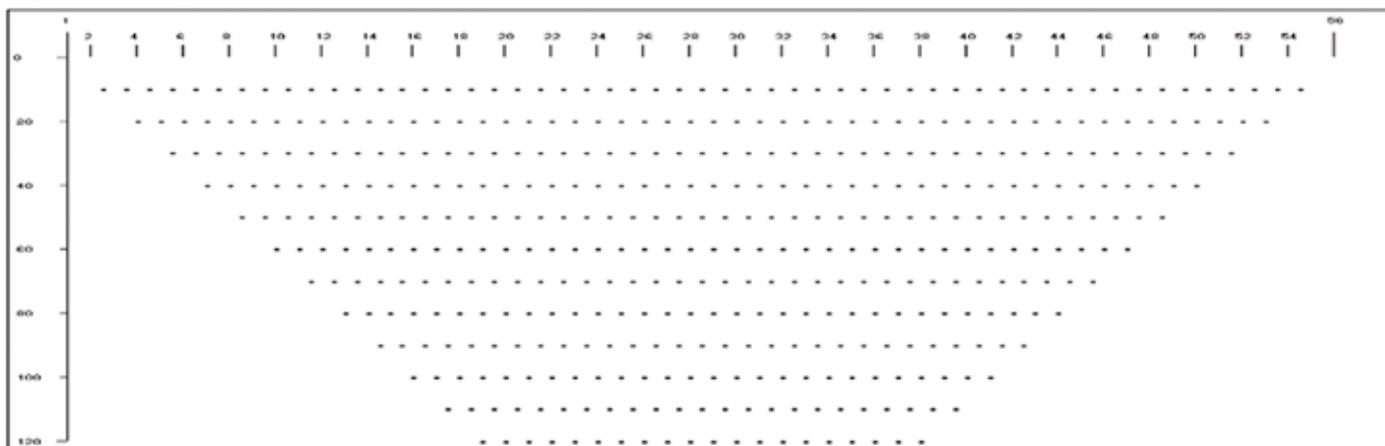


Figura 5 - Tomografia elettrica - Schema misure



fluisce tra gli elettrodi C1-C2 e della differenza di potenziale tra gli elettrodi P1-P2 è possibile quindi calcolare la resistività apparente e riferirla generalmente al centro del quadripolo ad una profondità che è funzione della distanza C1-C2. L'acquisizione tomografica consiste quindi nella misura dei valori di resistività in corrispondenza di un elevato numero di punti lungo la sezione d'indagine (figura 5).

La densità dei punti consente quindi di ricostruire con estremo dettaglio, anche tramite l'applicazione di algoritmi di calcolo bidimensionali, la sezione definendo in particolare gli effetti delle "variazioni laterali" e quindi restituendo una rappresentazione finale maggiormente corrispondente alla situazione reale.

Nell'indagine sul "tappo di fondo" del passante di Torino, dopo il confronto tra i vari schemi, è stato utilizzato lo schema di acquisizione "Schlumberger".

Strumentazione utilizzata

I dati sono stati acquisiti con l'utilizzo della seguente strumentazione:

- georesistivimetro digitale AGI - STING R1/IP (figura 6);
- dispositivo di gestione automatica degli elettrodi AGI - SWIFT;
- elettrodi (smart electrodes) dotati di



Figura 6 - Resistivimetro "STING R1/IP"



Figura 7 - Particolare "Smart Electrode"

elettronica interna;

- picchetti in acciaio.

La principale innovazione introdotta dalla strumentazione utilizzata è rappresentata dalla gestione totalmente automatizzata delle misure, realizzata tramite un georesistivimetro multicanale di ultima generazione (figura 6), con il quale è possibile l'acquisizione in tempi brevi di un elevato numero di punti, sfruttando la tecnologia dei cosiddetti "elettrodi intelligenti" (smart electrodes) che consente ad ogni elettrodo, dotato di un'elettronica interna, di essere utilizzato sia per l'invio della corrente sia per la misura del potenziale (figura 7).

Lo strumento è in grado, infatti, di gestire, tramite un'opportuna interfaccia, fino a 254 elettrodi contemporaneamente collegati. A loro volta gli elettrodi sono a contatto con il terreno tramite adeguati picchetti metallici.

Il resistivimetro gestisce tramite software tutte le operazioni relative al controllo di qualità dei dati acquisiti attraverso le seguenti fasi:

- controllo del dispositivo di misura tramite verifica della resistenza di contatto degli elettrodi; Azzeramento dei potenziali spontanei;
- iniezione di corrente in quantità, periodo e sequenza opportune;
- misura della differenza di potenziale e verifica della qualità del dato tramite il calcolo della "deviazione standard";
- memorizzazione di tutti i dati relativi all'acquisizione.

Procedure di elaborazione dati

L'elaborazione dei dati registrati ha seguito il seguente schema:

- editing per l'individuazione e rimozione dei valori caratterizzati da un errore elevato (deviazione standard non superiore a 2%);
- ricostruzione della sezione di pseudo-resistività apparente misurata;
- definizione delle dimensioni della griglia da utilizzare per l'inversione 2D;
- inversione 2D e la ricostruzione della sezione di resistività tramite iterazioni successive condotte sulla base del confronto delle pseudosezioni di resistività misurata e calcolata.





Figura 8 - Immagine stendimenti per rilievo

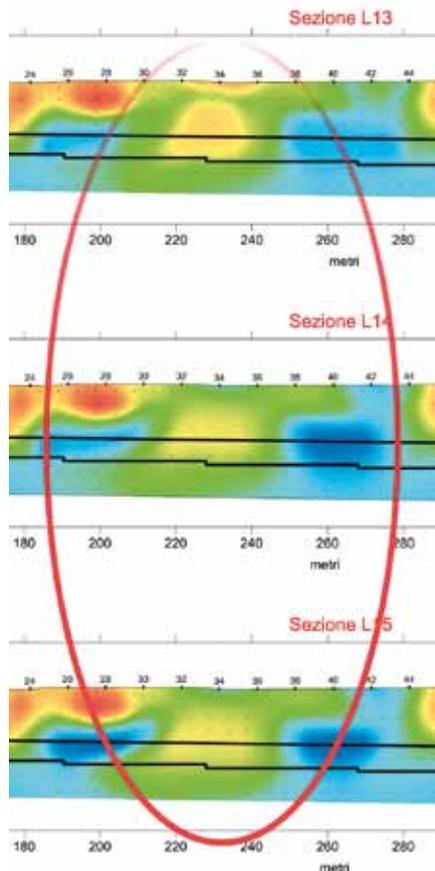


Figura 10 - Anomalia

Risultati ottenuti

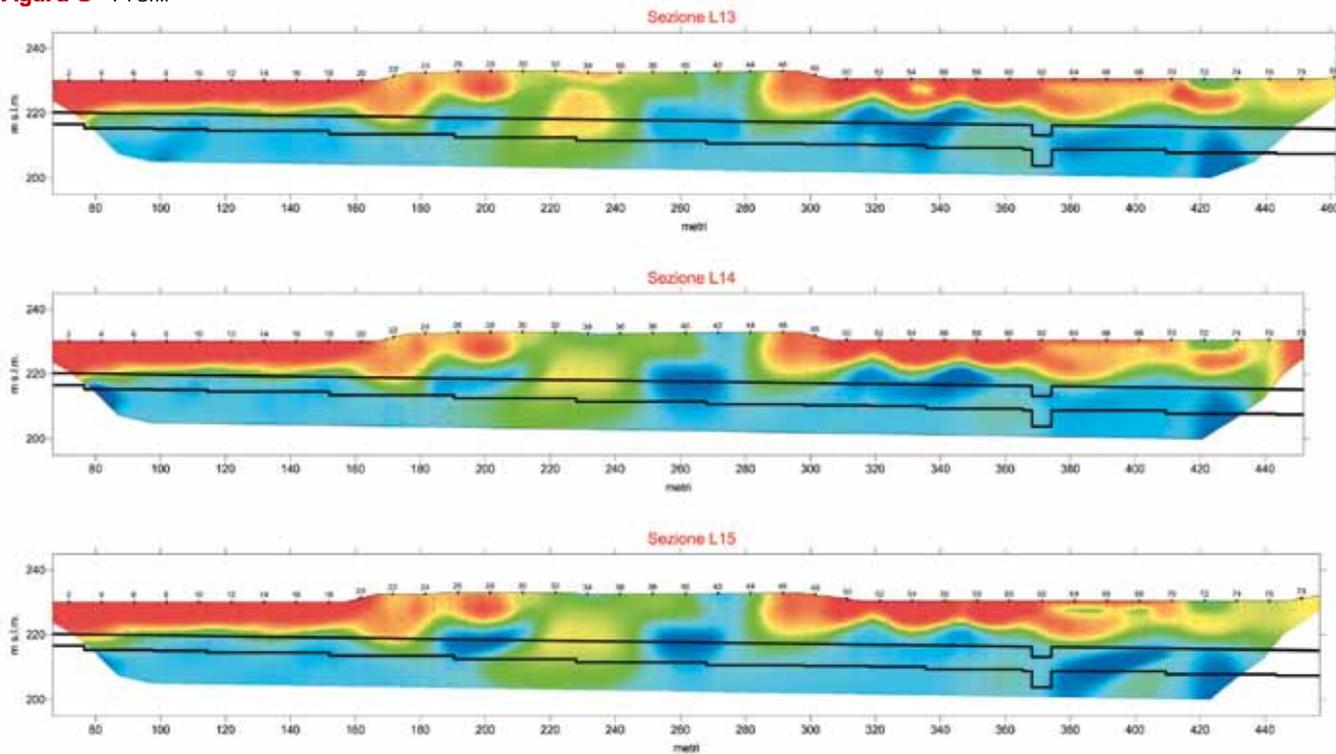
Per una analisi che garantisca la “copertura” quasi totale del terreno trattato per ogni settore di indagine sono stati eseguiti 3 stendimenti paralleli (figura 8).

I dati acquisiti e successivamente elaborati vengono riassunti in sezioni di isoresistività elettrica, sintetizzati nella figura 9. I valori di resistività caratteristici delle litologie presenti sono stati individuati sulla base del confronto con le indagini sismiche e con i sondaggi a carotaggio continuo.

Le sezioni elaborate riportate in figura 8 evidenziano la sostanziale continuità del trattamento, ad eccezione dell'area evidenziata dove si può osservare una anomalia presente in tutti e tre i profili (figura 10).

Per verificare l'origine di tale anomalia sono stati eseguiti 2 sondaggi a carotaggio continuo che hanno evidenziato, immediatamente al disopra dell'estradosso del tappo di fondo, la presenza di trovanti

Figura 9 - Profili



Layout di registrazione



Volume di terreno trattato

Resistività (ohm m)



SOCIETÀ PASGANTE TOBINO s.r.l.s.
 Via V. Sventura 25/a - Torino
 Campo 15-41
Profili Tomografici Elettrici
Profili L13 - L14 - L15



Figura 11



Figura 12

le cui dimensioni variano tra 60 ed 80 cm. Tale fenomeno trovava riscontro in quanto già rilevato durante lo scavo della galleria della fase Ovest, dove più volte si è riscontrata la presenza di massi erratici (ofioliti l.s.) di varie dimensioni, talvolta anche ciclopici.

Pertanto l'anomalia geoelettrica riscontrata è stata imputata alla presenza di tali trovanti, e non sono state eseguite colonne integrative, in quanto si riteneva che non ci fossero problemi per la fase di scavo.

Lo scavo ha dato ragione a tale interpre-

tazione: nelle figure 11 e 12 si può osservare il trovante incontrato nella zona dove l'indagine aveva evidenziato l'anomalia elettrica, certificando la bontà dell'interpretazione, e conseguentemente la bontà complessiva del metodo scelto per il controllo del tappo di fondo.

Iniezioni a bassa pressione

Il consolidamento con iniezioni a bassa pressione per mezzo di canne valvolate (canne "manchettes") era previsto solo

per interventi marginali rispetto alla realizzazione del tappo di fondo delle gallerie artificiali.

In particolare il loro uso è stato limitato al consolidamento del terreno necessario per lo scavo di un collettore fognario sotto falda e per il consolidamento al contorno della galleria della metropolitana in prossimità Piazza Statuto.

In entrambi i casi la miscela prevista era rappresentata da una sospensione cementizia stabilizzata con bentonite e aggiunta di additivo fluidificante, viste le caratteristiche geologiche della zona.

Inoltre, al fine di ridurre la permeabilità dell'ammasso, è stata prevista un'ultima iniezione con miscela chimica bi-componente, a base di silicato di sodio nel tratto sotto falda.

Il progetto delle iniezioni è stato preceduto da un idoneo campo prova in cui sono state testate sia le caratteristiche delle miscele, nonché le metodologie di iniezione e la distanza delle singole valvole (manchettes).

Infine è stata verificata le metodologie di controllo per le successive fasi di produzione.

Sulla scorta delle esperienze sviluppate per il jet grouting, le tecniche di indagine analizzate e utilizzate sono state:

- sondaggi a carotaggio continuo;
- prove in sito;
- prove di laboratorio sui campioni prelevati durante i carotaggi;
- indagini geofisiche.

Sondaggi a carotaggio continuo

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti sia prima che successivamente alla realizzazione delle iniezioni.

I carotaggi sono stati eseguiti sia per la redazione della stratigrafia dei terreni interessati dall'intervento nonché per il prelievo di campioni su cui eseguire prove di laboratorio (granulometria, peso di volume, ecc.).

Inoltre durante l'esecuzione di tutti i sondaggi, sia quello precedente che quelli successivi alle iniezioni, sono state eseguite prove di permeabilità per verificare la riduzione di questo parametro del terreno.

Infine i fori dei sondaggi sono stati attrezzati per l'esecuzione della successiva indagine geofisica.

Indagine geofisica

Le tecniche utilizzate per lo studio dei terreni trattati con iniezioni a bassa pressione erano già state sperimentate con successo per le analisi dei risultati del tappo di fondo realizzato con jet grouting (*Quarry and Construction* giugno 2007 e gennaio 2008).

Per la determinazione delle velocità caratteristiche del terreno naturale nel sondaggio eseguito prima dell'esecuzione delle iniezioni è stata eseguita una prova Down-Hole (DH).

Questa prova ha permesso la determinazione del profilo delle onde sismiche di compressione (P) e di taglio (S) e del loro andamento con la profondità (figura 13).

Per il controllo del trattamento si è scelto di utilizzare il rilievo sismico con acquisizione tomografica 3D.

Figura 13 - Down-Hole

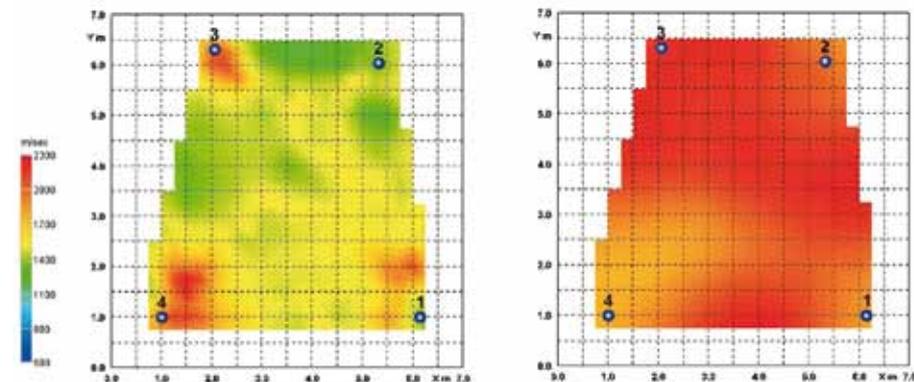
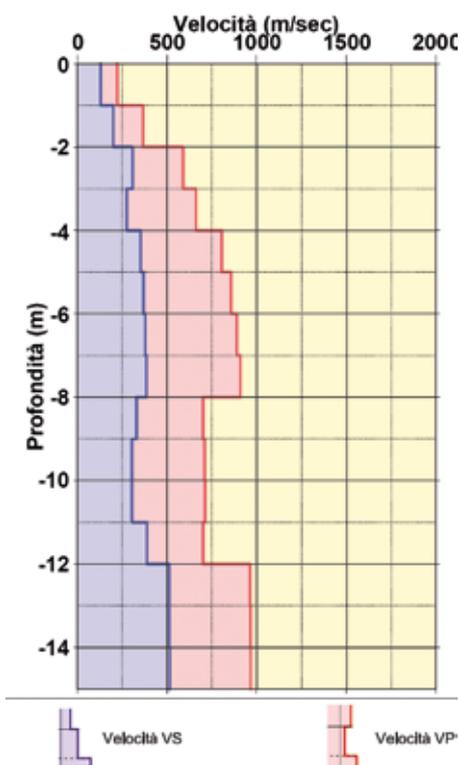


Figura 14 - Sezioni orizzontali a -8 e -10 m dal p.c.

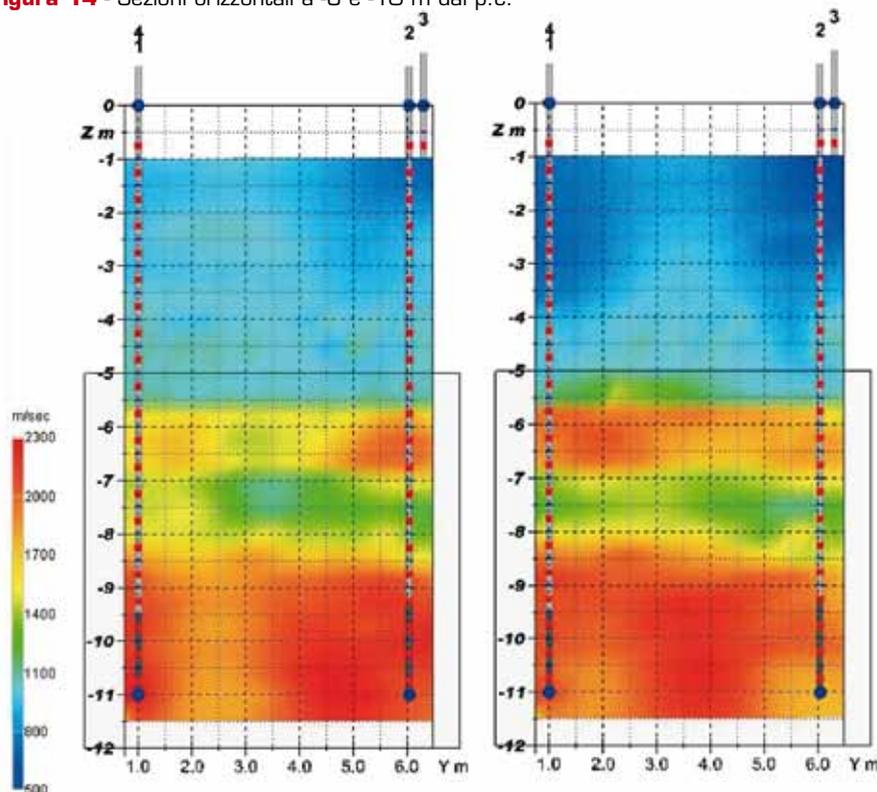


Figura 15 - Sezioni verticali

Con questa tecnica di rilievo, attraverso l'acquisizione simultanea in posizioni diverse collocate in un volume geometrico definito, si ricostruisce la distribuzione della velocità sismica delle onde di compressione (onde P) in un ambito volumetrico di terreno investigato, e quindi rappresenta lo stesso, in termini di variazioni di "densità".

L'elaborazione dei dati tomografici 3D permette la costruzione del modello tridimensionale del volume di terreno investigato. Questo volume può essere "tagliato"



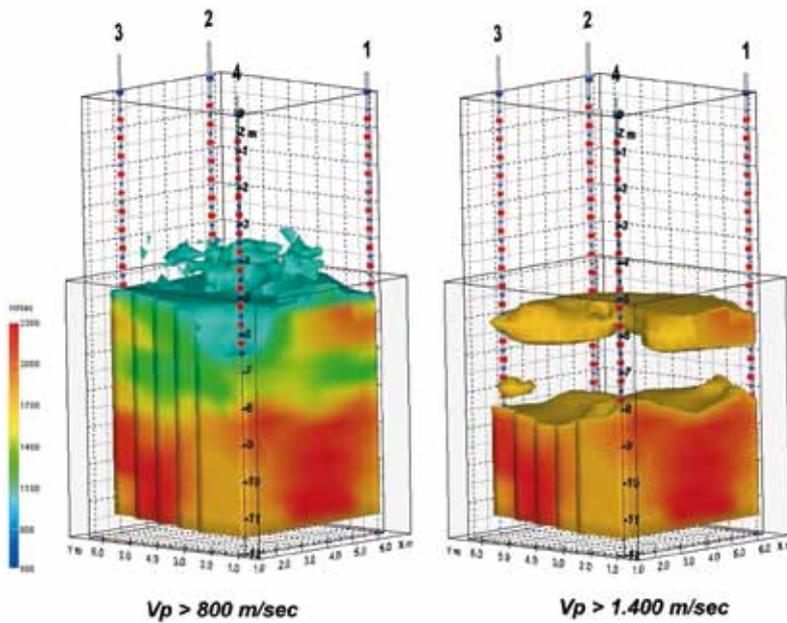


Figura 16 - Iso volumi

lungo piani predefiniti per rappresentare in modo bidimensionale la situazione esistente lungo specifiche direzioni corrispondenti a tagli effettuati sia su piani orizzontali (figura 14) che verticali (figura 15).

Confrontando i risultati di indagini dirette e attribuendo le velocità caratterizzanti le varie litologie consolidate, e gli eventuali tratti anomali, è possibile "estrarre" immagini tridimensionali di porzioni significative di dati, in cui siano evidenziati volumi con uguale velocità (isovolumi) (figura 16).

In particolare, vengono evidenziati i volumi delle eventuali anomalie, per verificare la loro influenza con il progetto di consolidamento.

Esecuzione delle iniezioni

Anche per i controlli durante la fase di iniezione ci si è avvalsi delle esperienze già maturate e consolidate durante la realizzazione del tappo di fondo con jet grouting.

Per verificare e certificare il mantenimento del posizionamento delle sonde e la verticalità del must di perforazione è stato utilizzato il sistema di posizionamento con GPS (figura 17).

Sono stati registrati gli assorbimenti durante la formazione della guaina man mano che veniva recuperato il rivestimento della perforazione.

Analogamente venivano registrate le velocità, la pressione e il volume di iniezione di ogni valvola.

Figura 17 - Sonde con evidenziate le antenne del sistema di posizionamento GPS





Figura 18 - Particolare carotaggio



Figura 19 - Fronte scavo collettore fognario

Analisi dei risultati

L'indagine geofisica ha evidenziato la bontà del trattamento, confermando quanto emerso in maniera puntuale dai carotaggi (figura 18).

In particolare confrontando i valori del terreno naturale emerge che ad iniziare dalla quota dove è stato eseguito il trattamento, il terreno è caratterizzato da valori di velocità comunque superiori a quelli determinati con la prova down-hole.

L'aumento più significativo e diffuso di velocità è stato individuato fra -8.5 e 11 m, dove è stata eseguita anche l'iniezione della miscela chimica. In tale settore si passa da valori di velocità di 800-1000 m/s (prima del trattamento) a valori medi di 1800-2200 m/s (dopo il trattamento). Le prove di permeabilità hanno evidenziato una riduzione di questo parametro di circa un ordine di grandezza.

La bontà dell'intervento è infine testimoniata dallo scavo del collettore fognario che è avvenuto in assoluta sicurezza e in assenza di venute di acqua, come si può vedere dalla figura 19.

Conclusioni

Per il progetto, l'esecuzione e il controllo del consolidamento del terreno sia con jet grouting che con iniezioni a bassa pressione ci si è avvalsi delle migliori tecnologie a disposizione, alcune di queste sviluppate e applicate nella precedente fase del passante di Torino.

La coscienza dell'importanza dei consolidamenti sia nello sviluppo del progetto

del passante ferroviario che per la sicurezza dei lavoratori ci ha spinto a testare e sviluppare tecniche di indagine e tecnologie di controllo innovative per garantire la funzionalità dell'intervento e il rispetto dei tempi previsti. ■

Un ringraziamento particolare va all'Ing. Giovanni Mario Cavallero per essere stato un prezioso punto di riferimento per tutte le attività svolte.

Vorremmo inoltre ringraziare l'Ing. Andrea Danese, il Dott. Salvatore Pizzo di Astaldi Spa, il Dott. Claudio Corno di Geoinvest Srl per la collaborazione di questi anni, la loro presenza, i loro contributi ed elaborazioni nelle lunghe discussioni per le verifiche prima sulle metodologie da utilizzare e poi sui risultati ottenuti.

Inoltre vorremmo ricordare ancora una volta il Dott. Gianfranco Bruzzi di Geoinvest Srl perché la sua presenza dentro di noi è sempre viva.

Un ricordo particolare, infine, per il Geom. Aldo Gabriele di Astaldi Spa, l'Ing. Gaetano Cardano e il Geom. Paolo Costantin di Di Vincenzo Spa prematuramente scomparsi e che vorremmo ricordare soprattutto dal punto di vista umano, perché in questi anni l'amicizia ed il rispetto reciproci sono andati ben al di là di un rapporto di semplice, anche se intensa, collaborazione professionale.

