



PASSANTE DI TORINO TRA PORTA SUSA E CORSO GROSSETO

S. CIUFEJNI, R. BRIGANTI, G. CAVALLERO - ITALFERR S.P.A.

A. DANESE - ATI ASTALDI S.P.A, DI VINCENZO S.P.A., IMPRESA ROSSO S.P.A., VIANINI S.P.A

G. BRUZZI, C. CORNO - GEOINVEST S.R.L.

E. PALCHETTI - LEICA GEOSYSTEMS S.P.A.



Progettazione, esecuzione e monitoraggio del tappo di fondo per la realizzazione delle gallerie artificiali per il quadruplicamento tra Porta Susa e Stura, con il sottoattraversamento del Fiume Dora Riparia, nel Nodo di Torino



Figura 1 - Area di cantiere a ridosso della Dora Riparia

Il tratto finale del passante di Torino tra Porta Susa e Corso Grosseto si svilupperà in ambito cittadino in Galleria Artificiale sottoattraversando il fiume Dora.

Per garantire la stabilità, l'impermeabilizzazione del fondo scavo e quindi la sicurezza dei lavoratori e dell'ambiente circostante deve essere realizzato un consolidamento del terreno al piede della paratie con la tecnica del jet grouting.

Nel presente articolo saranno analizzate le scelte progettuali del tappo di fondo in relazione all'ambiente in cui si era chiamati ad operare e alle profondità da raggiungere.

Sarà illustrato il campo prova sviluppato in condizioni operative simili a quelle di produzione, il trattamento è stato, infatti, eseguito alle stesse profondità di progetto e in terreni con le stesse caratteristiche tecniche.

Sono descritte le indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo, prove in sito e di laboratorio) e indirette (prospezioni geofisiche bidimensionali e tridimensionali) eseguite per individuare e verificare le caratteristiche tecniche del terreno trattato e la sua continuità e omogeneità alle profondità di progetto.

Saranno quindi presentati e analizzati i risultati ottenuti e la scelta conseguente dei parametri da utilizzare durante l'esecuzione delle lavorazioni, nonché la funzionalità delle indagini eseguite e il conseguente progetto di monitoraggio strutturale da eseguire durante l'esecuzione dell'intervento.

Sarà presentato il sistema di posizionamento con GPS sviluppato per certificare, visto l'elevato numero di colonne da eseguire, il corretto posizionamento della colonna.

Verrà descritto il monitoraggio eseguito in questa prima fase delle lavorazioni e saranno analizzati e discussi i risultati ottenuti.

Inquadramento geologico e caratteristiche dei terreni da trattare

Nella zona interessata dal progetto, la successione stratigrafica prevede, prevalentemente, dopo uno strato superficiale di terreno di riporto, fino ad una profondità variabile tra i 17 e i 20 m dal piano campagna la presenza di uno strato di terreni a prevalente componente ghiaiosa in matrice sabbioso-limosa, e successivamente un banco di sabbie e sabbie limose, talora con scarsa ghiaia, con intercalate lenti di limo più o meno sovraconsolidato.

Tenendo conto che negli interventi di jettinizzazione l'efficienza diminuisce al diminuire della granulometria, si è scelto di testare una zona in cui il terreno è a forte componente sabbiosa, in cui pertanto l'intervento appare più critico rispetto ad aree in cui si ha prevalenza di ghiaie.

In particolare, per l'esecuzione del campo prova, si è scelto di operare laddove il livello di sabbia è ubicato in corrispondenza del futuro fondo scavo, cercando quindi di simulare il più fedelmente possibile le condizioni più critiche, in termini di stratigrafia e profondità del trattamento, per l'intervento durante la produzione. In questa ottica la zona più opportuna in cui eseguire il campo prova è risultata in prossimità della progressiva 7+720, a circa 100 metri dalla Dora Riparia, dove i terreni rilevati sono rappresentati da ghiaie, fino a circa 20 m dal piano campagna, che sormontano, come detto sabbie.

Il progetto del tappo di fondo

Il progetto dei parametri di jettizzazione è stato eseguito avendo come obiettivo l'ottenimento di un diametro che permettesse da una parte di aumentare la compenetrazione delle singole colonne e dall'altro di ottimizzare e compatibilizzare i tempi di esecuzione del consolidamento con gli altri interventi.

Vista l'importanza che il tappo di fondo ricopriva nello sviluppo di progetto e per la sicurezza dei lavoratori durante le fasi di scavo delle gallerie artificiali, doveva essere garantita l'assoluta impermeabilità del terreno trattato. Va osservato che, nella zona più profonda del consolidamento, una deviazione di 1° rispetto alla verticale di una colonna, genera uno spostamento dell'asse, alla profondità dell'inizio del trattamento (-33 m dal piano campagna), di circa 0,60 m e di circa 0,35 m alla fine del trattamento (-20 m dal piano campagna), pertanto l'obiettivo iniziale era quello di conservare una compenetrazione di progetto che permettesse di assorbire parte di tale deviazione e garantire la continuità del tappo, per uno spessore significativo, in modo da garantire l'impermeabilizzazione dello scavo. Va inoltre rilevato che aumentando il diametro delle colonne sarebbe stato possibile ridurre, a parità di macchine utilizzate, i tempi per la realizzazione del tappo di fondo. Per la scelta del set di parametri da utilizzare in produzione è stato eseguito un opportuno campo prova, in cui sono state testate 4 combinazioni. Di seguito sono riassunte le analizzate le metodologie utilizzate per lo studio del terreno consolidato e i risultati ottenuti.

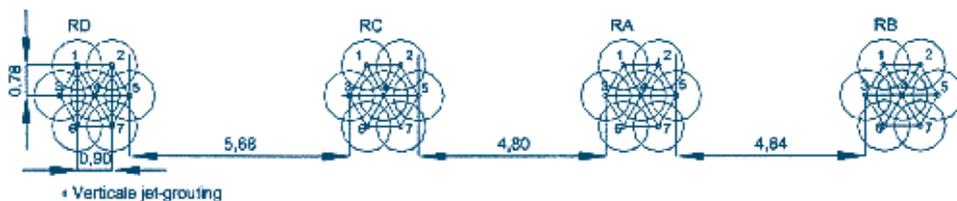
Campo prova

Per lo sviluppo del campo prova sono state realizzate 4 "rosette", ovvero 4 serie di colonne di trattamento della profondità di 30 m ubicate al centro e ai vertici di un esagono regolare di lato pari a circa 90 cm, secondo lo schema planimetrico indicato in Figura 2.

Le rosette A B e C sono state eseguite con la tecnica del bifluido mentre per la D è stato utilizzato il monofluido.

Ogni rosetta era caratterizzata da una combinazione specifica di parametri operativi, (pressione di iniezione, velocità di risalita, diametro ugello, rapporto acqua/cemento e pressione dell'aria) la scelta dei quali è stata finalizzata al raggiungimento di un diametro medio atteso della colonna pari a circa 1.30÷1.50 m. Le profondità di perforazione e di tratta-

Figura 2 - Schema campo prova



mento erano simili a quelle previste per l'esecuzione dell'intervento.

La scelta dell'interasse delle singole colonne era stato calcolato in modo che fosse garantita una compenetrazione di almeno il 40% dello spessore del trattamento in caso di deviazione di una colonna di 1°.

Le prove eseguite per il controllo dei risultati ottenuti sono state:

- sondaggi a carotaggio continuo;
- prove di laboratorio sui campioni prelevati;
- indagine geofisica.

Di seguito saranno descritte le metodologie di indagine e i risultati ottenuti.

Sondaggi a carotaggio continuo

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti in vari punti delle rosette per verificare in ogni punto della colonna la qualità del trattamento. È stato determinato il parametro RQD (Rock Quality Designation) e sono stati prelevati campioni di terreno trattato che sono stati sottoposti a prove di laboratorio.

Tutti i fori utilizzati per le successive prove geofisiche sono stati attrezzati con tubi inclinometrici per verificare le eventuali deviazioni rispetto alla verticale.

Prove di laboratorio

Sono stati prelevati complessivamente circa 60 campioni e su questi sono state eseguite prove di laboratorio finalizzate alla determinazione dei seguenti parametri:

- Peso dell'unità di volume,
- Resistenza a compressione,
- Modulo di deformazione E.

Analisi statistica

I risultati delle analisi di laboratorio, insieme al parametro RQD, sono stati oggetto di uno studio statistico.

Sono stati presi in esame tutti i risultati delle prove, compresi quelli ottenuti nei

campioni prelevati dai sondaggi vicini al bordo della colonna, nella zona in cui, in corso d'opera dovrebbe aversi la compenetrazione delle colonne. Da un'analisi di dettaglio questi dati risultano minori rispetto a quelli prelevati nelle zone di compenetrazione e nella parte centrale delle colonne, ma sono significativi per la verifica complessiva in quanto come detto, per fenomeni di deviazione delle aste della perforazione si potrebbe verificare una compenetrazione inferiore a quella di progetto. Le grandezze misurate di peso dell'unità di volume, resistenza a compressione e modulo di deformazione sono trattate come variabili casuali distribuite secondo una curva di densità di probabilità Gaussiana.

Una volta calcolato il valore medio μ e la varianza σ^2 del campione secondo le:

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \mu)^2}{N - 1}$$

si determina la densità di probabilità standardizzata:

$$\left(\frac{1}{\sigma(X)\sqrt{2\pi}} \right) \cdot e^{-\frac{(x-\mu(X))^2}{2\sigma^2}}$$

Dall'analisi delle curve di densità di probabilità, per integrazione, si determina successivamente la curva di probabilità cumulata (probabilità di non superamento):

$$P(y_1) = \int_{-\infty}^{y_1} f(x) dx$$

L'interpretazione della prima curva da indicazioni circa il valore medio del campione e la dispersione dei dati attorno ad esso, mentre la seconda curva suggerisce i valori progettuali delle grandezze in oggetto. Nelle 4 schede seguenti vengono presentati e commentati i risultati dello studio statistico.

Peso dell'unità di volume

I valori medi di γ nelle 4 rosette variano da un minimo di 1.91 t/m³ per la rosetta B ad un massimo di 2.31 t/m³ nella rosetta D, i valori di dispersione dei risultati, espressi in termini di deviazione standard, sono inferiori a 0.2 t/m³ nelle rosette C e D e superiori a tale valore nelle restanti rosette.

I valori sono riassunti nella tabella di Figura 3.

Figura 3 - Tabella di sintesi delle caratteristiche di γ

rosetta	valor medio μ	dev st σ	P(γ_{prog})
A	2.15	0.25	73%
B	1.91	0.27	37%
C	2.14	0.19	77%
D	2.31	0.15	100%

Tenuto conto che il valore progettuale ipotizzato era $\gamma_{prog} = 2 \text{ t/m}^3$, nella ultima colonna della suddetta tabella sono espresse in valore percentuale le probabilità di superamento

Nelle figure 4 e 5 sono riportate rispettivamente la curva della Densità di probabilità e quella della probabilità cumulata.

Figura 4 - Densità di probabilità di γ

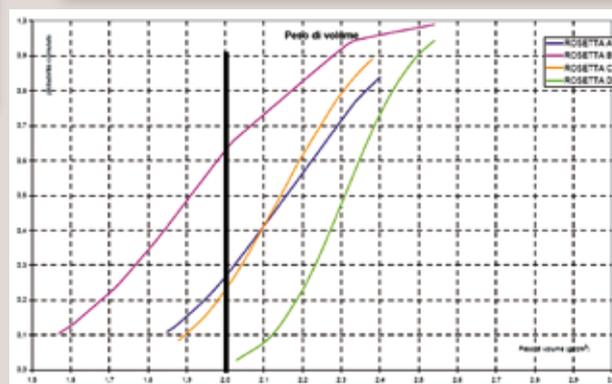
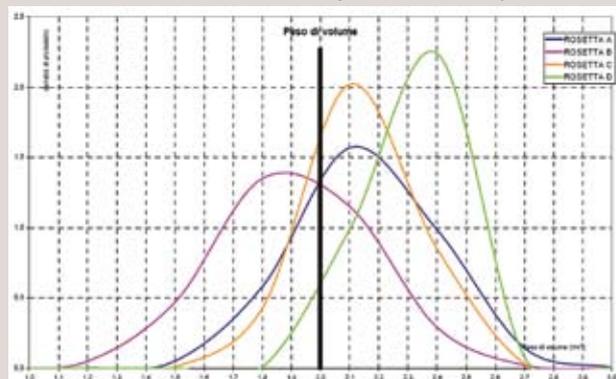


Figura 5 - Curva della probabilità cumulata di γ

Figura 7 - Densità di probabilità di $E_{0.5\%}$

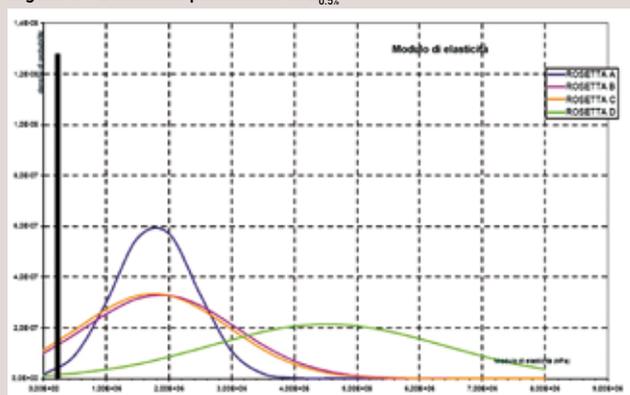
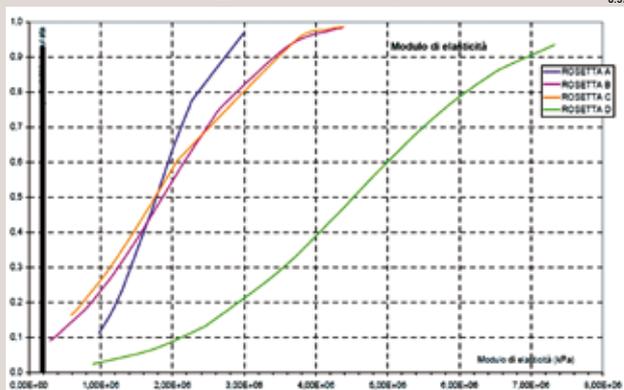


Figura 8 - Curva della probabilità cumulata di $E_{0.5\%}$



Modulo di deformazione

A partire dai grafici sforzo-deformazione relativi alle prove sui campioni di terreno trattato, è stato determinato per ogni singolo provino il valore di modulo elastico secante in corrispondenza di un valore di deformazione assiale unitaria pari allo 0.5% ($E_{0.5\%}$). Nei provini ove la rottura si è manifestata prima di tale livello di deformazione il modulo è calcolato secondo la tangente alla curva di compressione.

I valori medi di $E_{0.5\%}$ variano da un minimo di circa 1.750 Mpa ad un massimo di 4.500 Mpa, ed in tutti i provini il valore di progetto di 100 Mpa viene ampiamente superato, come può essere osservato nella tabella di Figura 6.

Nelle Figure 7 e 8 sono riportate rispettivamente la curva della Densità di probabilità e quella della probabilità cumulata.

Il valore del modulo E è relazionabile al valore di rigidezza K_{wink} nell'ipotesi di schematizzazione del suolo secondo il modello di Winkler, secondo l'espressione (Yoshida e Yoshinaka, 1972; Parry, 1971):

$$K_h = \frac{C \cdot E}{B}$$

dove C è una costante empirica posta uguale ad 1 e B è la larghezza della paratia.

rosetta	valor medio μ	dev st σ
A	1.77 E+06	6.59 E+05
B	1.86 E+06	1.2 E+06
C	1.76 E+06	1.19 E+06
D	4.5 E+06	1.85 E+06

Figura 6 - Tabella di sintesi delle caratteristiche di $E_{0.5\%}$

Resistenza a compressione

La resistenza a compressione dei provini varia, in valore medio, da un minimo di circa 100 kg/cm² (rosetta A) ad un massimo di 260 kg/cm² (rosetta D) e, come nel caso del modulo di deformazione, in tutti i provini il valore di progetto, pari a 10 kg/cm², viene superato come può essere osservato nella tabella di Figura 9.

Nelle Figure 10 e 11 sono riportate rispettivamente la curva della Densità di probabilità e quella della probabilità cumulata.

Figura 11 - Curva della probabilità cumulata della resistenza a compressione

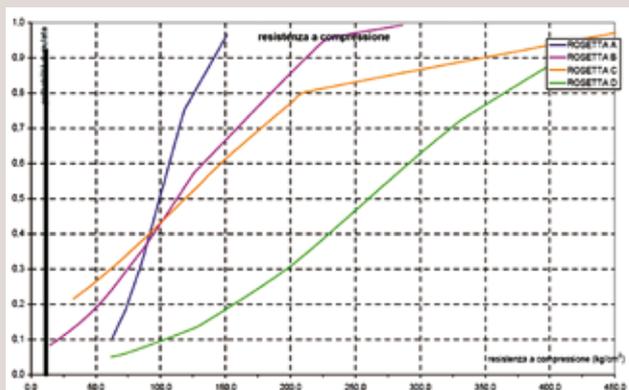


Figura 9 - Tabella di sintesi delle caratteristiche della resistenza a compressione

rosetta	valor medio μ	dev st σ
A	99	29
B	112	71
C	119	109
D	260	121

Figura 10 - Densità di probabilità della resistenza a compressione

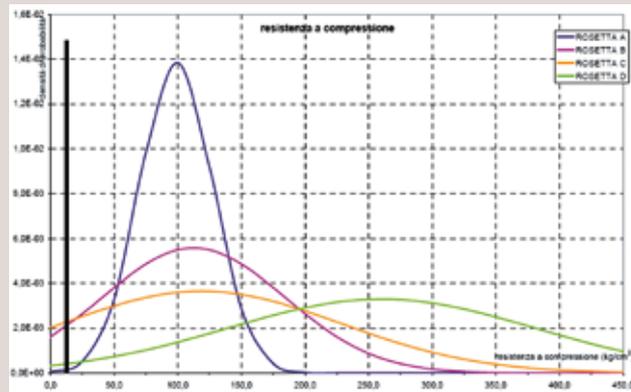


Figura 13 - Densità di probabilità di RQD

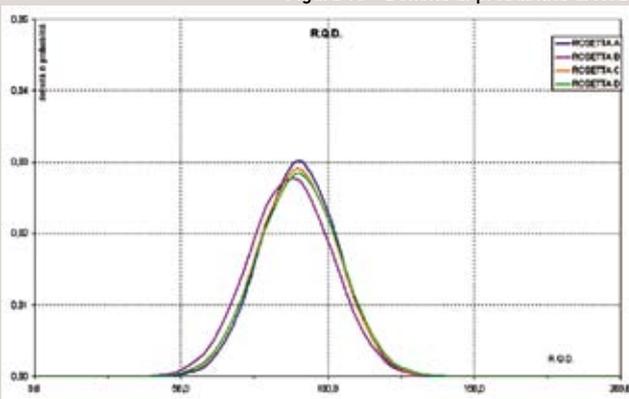
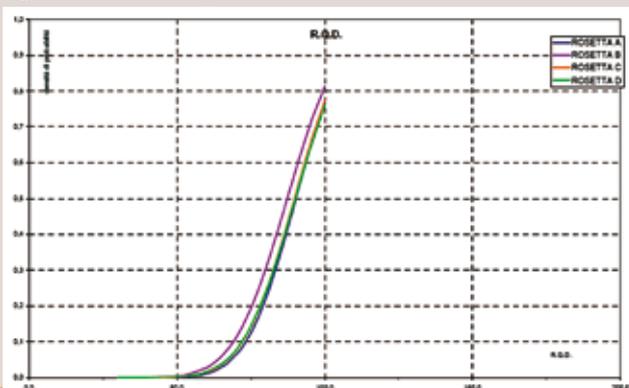


Figura 14 - Curva della probabilità cumulata di RQD



RQD (Rock Quality Designation)

La qualità del trattamento di jettinazione e la sua omogeneità sono correlabili anche al parametro R.Q.D., il quale fornisce il recupero percentuale di carotaggio per metro lineare. In tutte le rosette del campo prova si hanno valori medi di R.Q.D. superiori all'87%, con scarti medi inferiori al 15%. Nelle rosette A, C e D in particolare si osserva la buona qualità del trattamento in termini di "omogeneità" della colonna, che presenta un R.Q.D. medio del 90%. Si discosta leggermente nella rosetta B, come si può osservare nella tabella di Figura 12.

rosetta	valor medio μ	dev st σ
A	90.3	13.2
B	87.4	14.2
C	89.8	13.7
D	90.1	14.0

Figura 12 - Tabella di sintesi delle caratteristiche di RQD

Nelle Figure 13 e 14 sono riportate rispettivamente la curva della Densità di probabilità e quella della probabilità cumulata.

Va comunque rilevato che il diametro del carotiere utilizzato per l'esecuzione del sondaggio incide sulla qualità del campione estratto, pertanto l'analisi delle carote è sicuramente penalizzante rispetto alla realtà. Durante l'esecuzione dei sondaggi per il monitoraggio di produzione è stata verificata la differenza di qualità del carotaggio in funzione del diametro dei carotieri utilizzati.

Infatti su una colonna, sono stati eseguiti 2 sondaggi utilizzando la stessa tipologia di carotiere ma con diametro diverso.

Indagine geofisica

Finalità della prospezione è stata, attraverso l'applicazione di una tecnica di monitoraggio geofisico multimetodologico, la caratterizzazione del corpo solido ottenuto dalla compenetrazione delle colonne di consolidamento e di valutare l'omogeneità costruttiva del "tappo di fondo".

La metodologia applicata riveste poi particolare importanza per la possibilità 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 stesso.

Risulta evidente che i sondaggi a carotaggio continuo se da una parte rendono visibile la qualità del processo di consolidazione dall'altra presentano il limite che le informazioni che forniscono riguardano solo il volume perforato, con il rischio di sovrastimare sia le anomalie che i risultati positivi. Si tratta, in ultima analisi, con questo tipo di indagine 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.

L'indagine geofisica eseguita ha interessato le 4 "rosette" del campo prove ed ha previsto l'impiego di metodologie e tecniche diverse. In particolare è stata utilizzata la metodologia sismica a rifrazione mediante la acquisizione tomografica in 2D (tomografie sismiche) e 3D (rilievo sismico tridimensionale), acquisizione Cross-Hole e la metodologia sonica in foro.

Nella Figura 15 sono riassunte le indagini eseguite per ogni singola rosetta. Come detto, precedentemente, per evitare errori nell'interpretazione dei risultati dell'indagine geofisica, conseguenti alla geometria del sistema, i fori utilizzati per queste prove erano stati attrezzati con

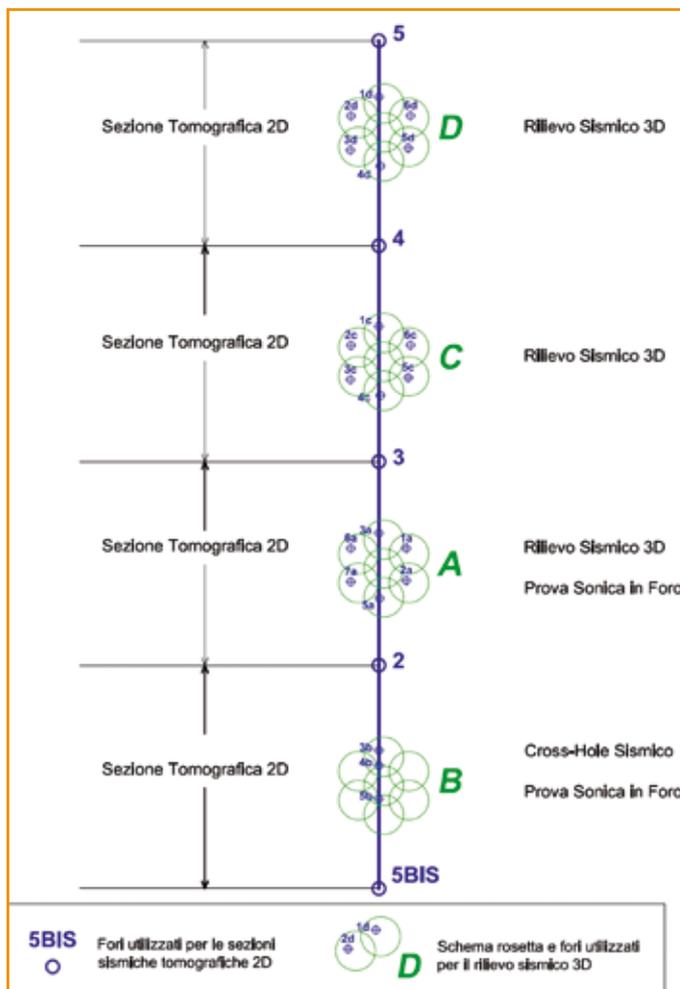


Figura 15 - Schema planimetrico delle indagini geofisiche eseguite

tubi inclinometrici e prima dell'inizio dell'indagine è stata verificata la loro deviazione rispetto alla verticale.

Di seguito saranno descritte e analizzate le tecniche utilizzate, dopodiché saranno analizzati i risultati ottenuti e saranno confrontati con le indagini tradizionali.

Tomografia sismica

La tomografia sismica, già abbondantemente utilizzata per indagini di questo tipo, che consente, attraverso l'acquisizione e l'elaborazione di un considerevole numero di dati, la costruzione di immagini bidimensionali (o tridimensionali) della variazione in continuo della velocità sismica di compressione (onde P). Con questa tecnica si riesce a ricostruire, pertanto, una visione seppur qualitativa della stratigrafia del terreno investigato, in termini di variazioni di "densità" dello

stesso, essendo questo parametro direttamente legato alla velocità sismica. La tecnica di prospezione consiste nella misura dei tempi impiegati dalle onde sismiche longitudinali (onde P) per percorrere un tragitto rettilineo, compreso tra una serie di punti di energizzazione (sorgente sismica) e una serie di punti di ricezione.

Il confronto matematico tra i vari tempi permette di suddividere lo spazio compreso tra le due serie di punti in porzioni, o "celle elementari" (quadrate per le sezioni bidimensionali, o cubiche per il modello tridimensionale) caratterizzate ognuna da un proprio valore di velocità sismica. Essendo, come accennato, la velocità sismica correlabile alla densità del materiale indagato, il metodo è utilizzabile, di norma, per individuare variazioni di densità legate a disomogeneità litologiche, fratturazioni, vuoti, linee di discontinuità.

Grazie alla predisposizione di un modello teorico previsionale, e all'impiego di programmi di elaborazione idonei, si è potuto stabilire sia il dimensionamento del dispositivo di misura, sia la rispondenza del sistema di osservazione alle ipotesi di progetto.

Per evitare errori connessi alla eventuale deviazione rispetto alla verticale, i fori utilizzati per la tomografia, sono stati attrezzati con tubi inclinometrici e le letture sono state eseguite prima dell'inizio dell'indagine.

Indagine bidimensionale

L'indagine aveva l'obiettivo di valutare, oltre alla omogeneità del trattamento, anche il diametro medio reso delle colonne.

Come accennato, la prospezione sismica realizzata ha previsto l'acquisizione delle sezioni tomografiche lungo la congiun-

gente dei centri delle rosette costruite con la compenetrazione delle colonne jet-groutig secondo lo schema della Figura 15. Per l'acquisizione di ogni sezione interessante le singole rosette è stata posizionata, in uno dei fori esterni alla rosetta stessa, di una colonna con 24 sensori (idrofoli) spaziatl di 1 metro, mentre nel foro opposto, sono stati creati degli impulsi sismici procedendo dal fondo alla superficie, ad intervalli regolari di 1 metro.

La procedura di acquisizione è stata ripetuta, invertendo la posizione dei sensori e dei punti di energizzazione.

Indagine tridimensionale

Questa tecnica è stata sviluppata e messa a punto per questo progetto con l'obiettivo di individuare la presenza di eventuali discontinuità, cavità, aperture "passanti" nel suo interno, o locali anomalie di continuità delle caratteristiche del tappo di fondo stesso.

Sulla base delle condizioni litologiche della zona di indagine e delle caratteristiche tecniche del terreno consolidato è stato costruito un apposito modello sperimentale di acquisizione e di elabo-

razione dati che è stato impiegato, dopo opportuni aggiustamenti derivanti dal confronto coi dati acquisiti a verifica della efficacia dello stesso e della rispondenza e congruità del modello con la situazione reale.

Il dispositivo di misura è stato stabilito sulla base di un modello teorico previsionale.

In sintesi è stato implementato un modello teorico della distribuzione di velocità del sistema terreno - tappo di jet-grouting, e si è ricostruito il percorso dei raggi sismici sintetici relativi al layout ipotizzato (sistema spari-ricevitori).

Successivamente è stata simulata la presenza di una serie di situazioni anomale diverse di discontinuità nel tappo di fondo, al fine di testare la rispondenza del modello. Il risultato ottenuto ha riprodotto in modo assolutamente accettabile il modello ipotizzato, confermando la validità dello schema di lavoro proposto.

Per ogni modulo di acquisizione impiegato nelle tre rosette (Rosetta B, rosetta C, rosetta D) sottoposte ad indagine tridimensionale, sono state effettuate le registrazioni simultanee di 4 colonne da 12 sensori (idrofoli) disposti con intervallo costante di 1 m, secondo lo schema indicato nelle Figure 16 e 17.

L'energizzazione è stata ripetuta lungo tutte le colonne di sondaggio ad intervalli di 1m, procedendo dal fondo dei fori verso la superficie. Le operazioni sono state ripetute in modo simmetrico, con posizioni rovesciate dei punti sorgente e dei punti registrazione. In questo modo è stata possibile la acquisizione di una ragnatela di traiettorie sismiche attraversanti l'intero corpo oggetto d'indagine come si può vedere nella Figura 18.

In dettaglio l'attrezzatura utilizzata è stata:

- 4 catenarie di idrofoli con sensori spaziatl di 1 metro;
- 24 geofoni verticali con frequenza propria di 14 Hz;

Figura 16 - Schema planimetrico acquisizione

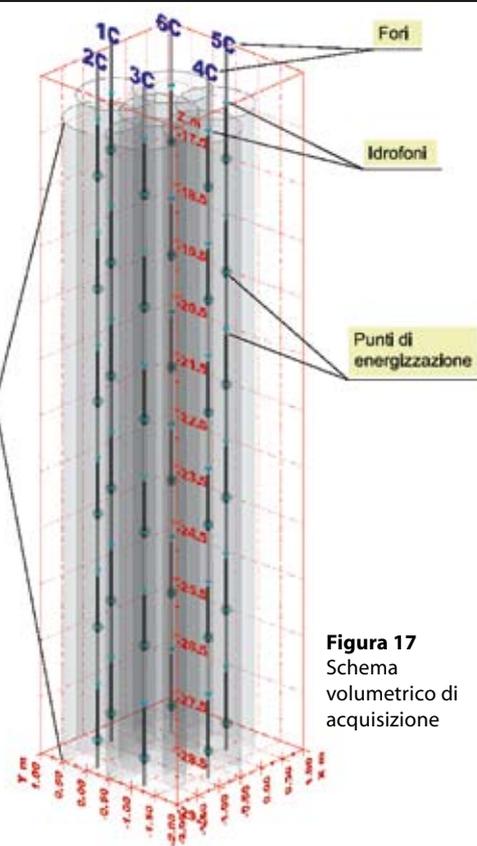
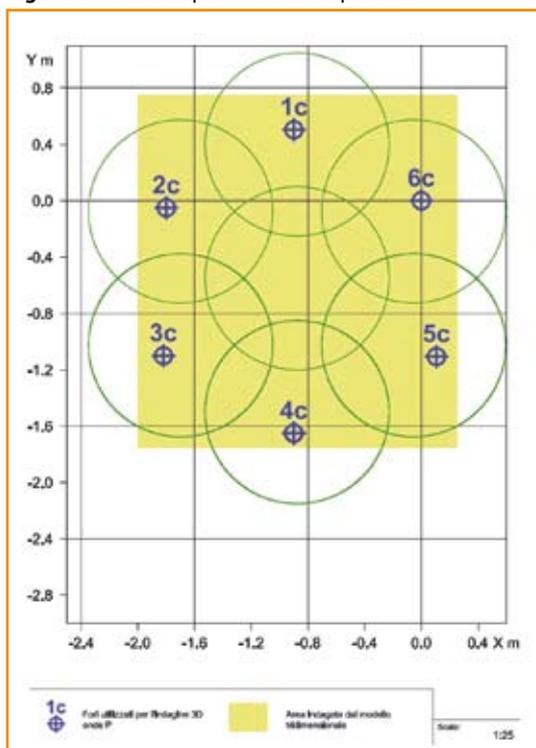


Figura 17
Schema volumetrico di acquisizione

- Cannoncino da foro con geofono starter;
- Cartucce senza pallettone;
- Bombola di Azoto, compressore e gruppo elettrogeno;
- Sismografi Geode della geometrics a 24 canali (dinamica 24 bit).

Cross Hole

La metodologia utilizzata, attraverso la misurazione delle velocità sismiche delle onde di compressione (P) e delle onde di taglio (S), ha consentito la costruzione dei diagrammi di velocità delle suddette onde e la valutazione dei parametri dinamici del terreno: Modulo di Poisson Modulo Dinamico Go e Modulo di Young E.

La prospezione sismica è stata realizzata tramite l'esecuzione di 2 Cross-Hole, di cui uno interno al tratto di terreno consolidato, tra i fori di sondaggio 3B, 4B, 5B e l'altro realizzato nella porzione di terreno naturale esterno alla rosetta, tra i fori di sondaggio 3B, 5B e 5Bis (Figura 15).

Le prove Cross-Hole consistono nella misurazione, come detto, della velocità con cui impulsi sismici di tipo longitudinale (onde P) e di tipo trasversale (onde

di taglio (S)) percorrono il terreno tra un punto sorgente energizzante (posizionato all'interno di un foro di sondaggio) e uno o più punti di ricezione, posti alla stessa quota, all'interno di altri fori, in linea con il primo.

Le prove Cross-Hole sono state pertanto realizzate mediante l'energizzazione e la registrazione dei segnali sismici eseguiti a profondità decrescente, dal basso verso l'alto, con equidistanza di 1 metro.

Per ogni posizione è stato predisposto l'aggancio dell'energizzatore da foro e alla stessa quota sono stati fissati i sistemi di acquisizione. In ogni stazione di misura sono

state acquisite due registrazioni corrispondenti ad eventi di eccitazione di opposta direzione allo scopo di esaltare il più possibile il segnale di taglio Sv (componente verticale delle onde S).

Prove soniche in foro

La metodologia dei log sonici ed ultrasonici consente il rilievo delle caratteristiche di propagazione delle onde acustiche a varia frequenza all'interno dei terreni circostanti i sondaggi oggetto delle misure.

In particolare, in genere, vengono valutate le variazioni della velocità associate ai cambiamenti della litologia lungo la verticale dei sondaggi.

Si possono, in ogni caso, prendere in considerazione anche altri parametri, quali: le ampiezze delle riflessioni, la loro omogeneità, lo spettro dei segnali riflessi.

La trasmissione e la ricezione dei segnali sono state effettuate tramite trasduttori a 15 KHz che hanno garantito adeguate potenze di trasmissione.

Visto l'ambiente circostante, si è resa necessaria l'equalizzazione dei segnali e il loro filtraggio allo scopo di rimuovere

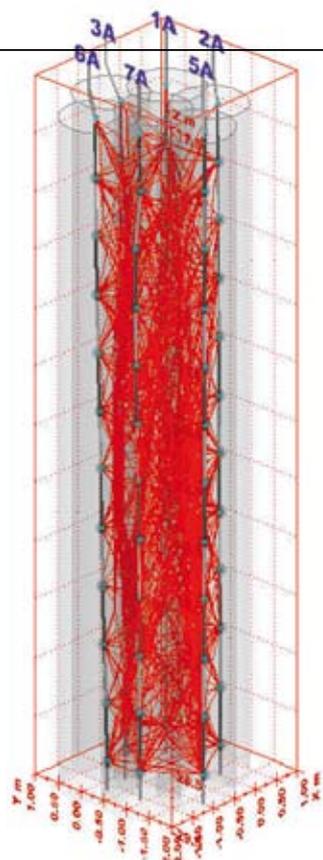


Figura 18 - Schema dell'andamento delle traiettorie sismiche

le componenti a bassa frequenza, che raggiungevano ampiezze elevate.

Considerata la vicinanza della linea ferroviaria si è ipotizzato che tali disturbi, talvolta di ampiezza analoga ai segnali significativi, fosse dovuta a correnti vaganti. Va infatti rilevato che le ampiezze maggiori sono state registrate in corrispondenza del passaggio di convogli.

L'applicazione dei filtri ha tuttavia determinato un drastico calo del rapporto segnale disturbo che, in particolare come detto nel Cross Hole, ha reso difficoltosa l'individuazione dei tempi di propagazione.

Sono state applicate due diverse metodologie di acquisizione dati: log all'interno

di un singolo sondaggio e Cross-Hole fra due sondaggi adiacenti. Nella figura 19 è riportato lo schema planimetrico di acquisizione delle prove soniche in foro.

Log

Considerata la necessità di verificare l'estensione dell'area interessata dal consolidamento, inferiore al metro, è stato deciso di utilizzare una configurazione dei trasduttori con offset di 1 m, con trasduttore di trasmissione in posizione inferiore. L'impiego di distanze superiori avrebbe permesso una maggiore definizione in caso di ridotte variazioni della velocità lungo la verticale. In questo caso però, l'utilizzo di offset maggiori non avrebbe garantito la possibilità di interessare la parte più profonda del sondaggio.

In ogni foro investigato si è proceduto alla registrazione dei dati partendo dal fondo e salpando i trasduttori a velocità costante lungo tutta la verticale, fermando la registrazione in corrispondenza della bocca del sondaggio.

La frequenza di scansione è stata controllata tramite un encoder ottico, collegato all'acquisitore, che ha permesso la registrazione di un numero costante di 100 impulsi per metro di profilo.

Cross Hole

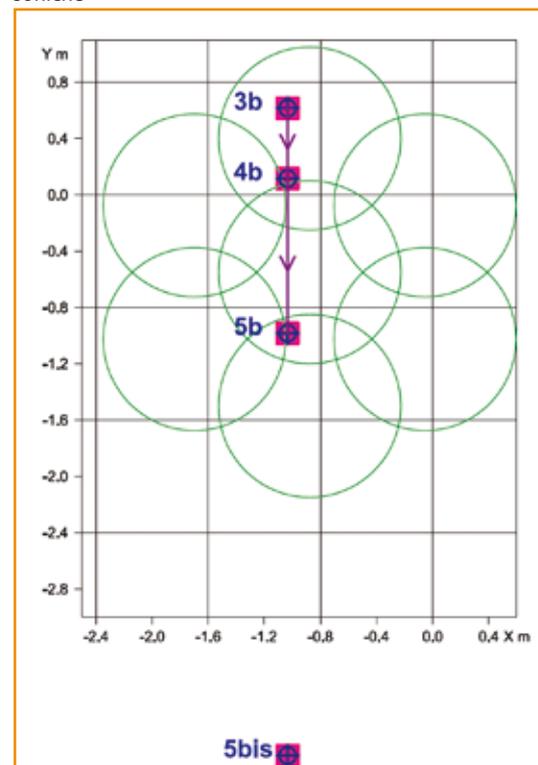
Il dispositivo di registrazione e i sensori sono stati gli stessi utilizzati per la registrazione dei log all'interno dei singoli sondaggi.

In questo caso però, trasmettitore e ricevitore sono stati calati, parallelamente a se stessi e in modo simultaneo.

Utilizzando il dispositivo di codifica ottico già citato sono stati registrati 100 impulsi per ogni metro di sezione, salpando i sensori a velocità costante.

Per quanto precedentemente affermato sul disturbo ambientale non è stata eseguita la prova tra i fori 3 e 5 della rosetta A perché, a causa della distanza fra i due sondaggi, non era possibile registrare dati di ampiezza sufficiente che permettessero di definire la velocità di propagazione all'interno del terreno consolidato.

Figura 19 - Schema planimetrico di acquisizione prove soniche



Analisi dei risultati

Di seguito saranno analizzati i risultati ottenuti dall'indagine geofisica.

Tomografia sismica bidimensionale

In Figura 20 è riportata la sezione tomografica di una delle 4 rosette indagate, dall'analisi di questa si possono eseguire le seguenti considerazioni.

L'immagine tomografica evidenzia chiaramente la netta distinzione tra il corpo solido costituito dalle colonne compenetranti della rosetta con velocità sismica superiore ai 2200 m/sec. (verde cupo) e il fondo costituito dal terreno naturale non consolidato, con velocità inferiori a 1700 m/sec.

Il corpo consolidato della rosetta presenta nel tratto compreso tra -9 e -22 m valori di velocità sismica nettamente superiori ai 2500 m/sec (rosso) sempre in corrispondenza verosimilmente del livello litologicamente più grossolano della stratigrafia locale.

L'immagine evidenzia come il terreno consolidato dalle colonne compenetranti sia sostanzialmente omogeneo e carat-

Figura 20 - Sezione sismica tomografica 2D

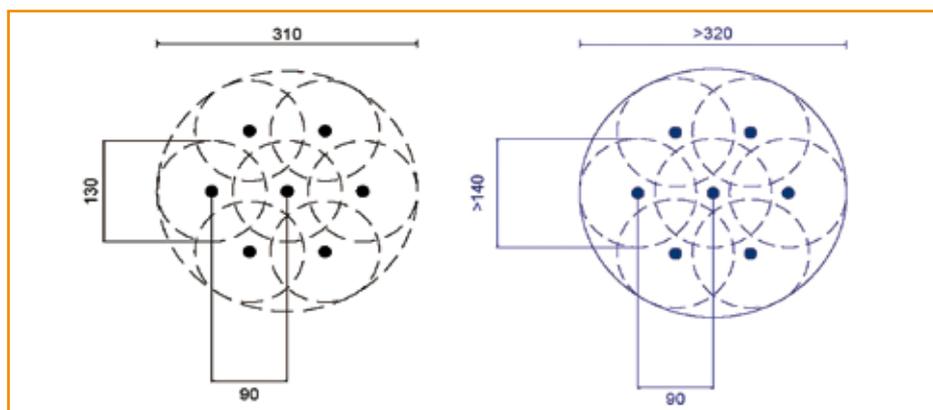
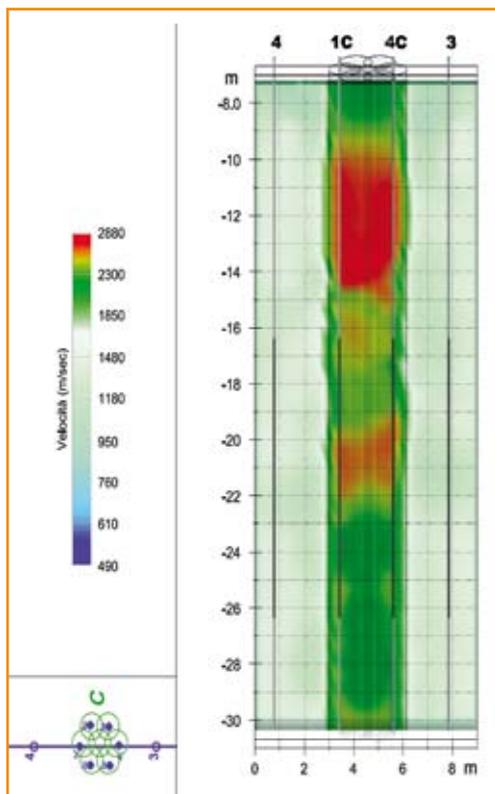


Figura 21 - Schema planimetrico diametri minimi attesi (a sinistra) e verificato (destra)

terizzato da alta compattazione (alta Velocità sismica) ed evidenzia altresì come il filo dei bordi esterni sia anche superiore a quello atteso, in Figura 21 è riportato lo schema planimetrico con indicati i diametri minimi di progetto e quello verificato.

Tomografia sismica tridimensionale

L'elaborazione dei dati ha comportato la lavorazione di un numero elevato di impulsi sismici che hanno consentito di determinare, per ogni traiettoria individuata, le velocità di percorso e di definire in tal modo una matrice cubica di cellette elementari ognuna caratterizzata da un singolo valore di velocità sismica. L'utilizzo di un algoritmo "robusto" di inversione 3D ha consentito di ottenere un'immagine tridimensionale della ottimizzazione del modello di elaborazione utilizzato.

Per una più completa e chiara rappresentazione dei risultati, i valori di velocità sismica ricavati dall'elaborazione tomografica 3D, sono stati elaborati mediante l'impiego di programma di visualizzazione 3D, che consente di inserire tutte le informazioni disponibili in una data area per calcolare un modello tridimensionale del volume di terreno investigato.

In tal modo, è stato possibile visualizzare il modello solido del volume di materiale indagato.

Le rappresentazioni finali dello studio sono costituite da visualizzazioni tridimensionali del volume di terreno

consolidato studiato oppure immagini bidimensionali ottenute "tagliando" quest'ultimo lungo piani predefiniti.

Nelle figure 22, 23 e 24 si possono osservare le immagini degli elaborati relativi alla rappresentazione 3D che visualizzano in modo molto efficace la distribuzione volumetrica dei valori di velocità del solido considerato.

La figura 22 rappresenta una particolare elaborazione dei dati, con visualizzazione delle porzioni caratterizzate da velocità sismica inferiore a 2300 m/sec evidenziate con colore pieno rispetto al valore medio di velocità, espresso, viceversa, dal trasparente. Come si può notare, a prescindere dal comunque alto valore di velocità, superiore ai 2200 m/sec., delle porzioni solide evidenziate, emerge la scarsa percentuale di volume di tali porzioni rispetto al totale investigato.

La Figura 23 rappresenta una particolare elaborazione dei dati, con visualizzazione delle porzioni caratterizzate da velocità sismica superiori a 2360 m/sec. evidenziate con colore pieno (giallo-rosso) rispetto al valore medio di velocità, espresso, viceversa, dal trasparente (verde acqua). Premesso che la differenza di velocità rispetto al valore medio è estremamente limitata, le parti di solido con valori di velocità superiore ai 2400 m/sec. sono rilevate nella parte superiore del volume di terreno indagato, fino a -23 m, e costituiscono una percentuale discreta di volume investigato.

La figura 24 mette in evidenza il volume solido consolidato a velocità sismica media compresa tra 2300 e 2360 m/sec. e

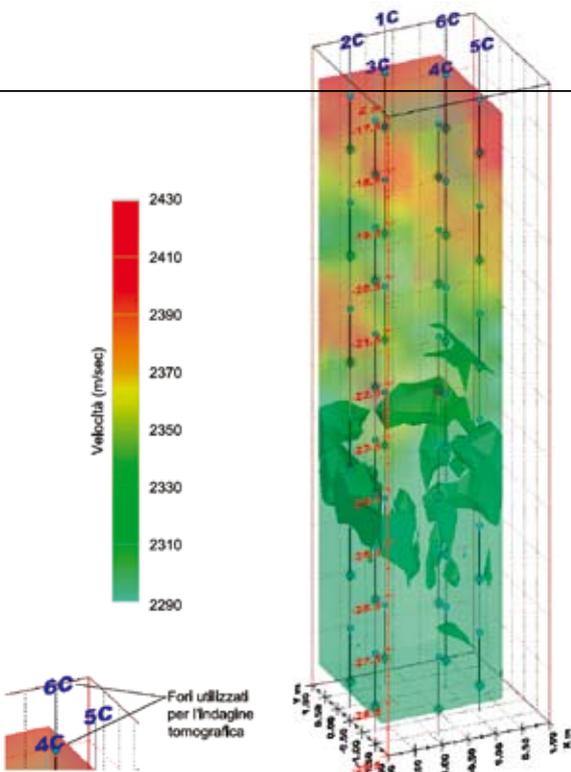


Figura 22 - Isovolumi di terreno trattato con velocità inferiore a 2.300 m/sec

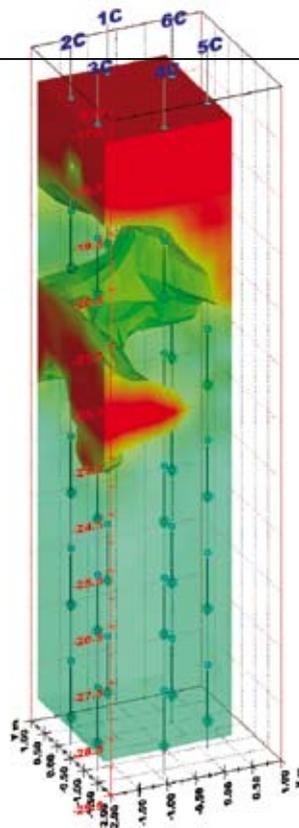


Figura 23 - Isovolumi di terreno trattato con velocità maggiore di 2.360 m/sec

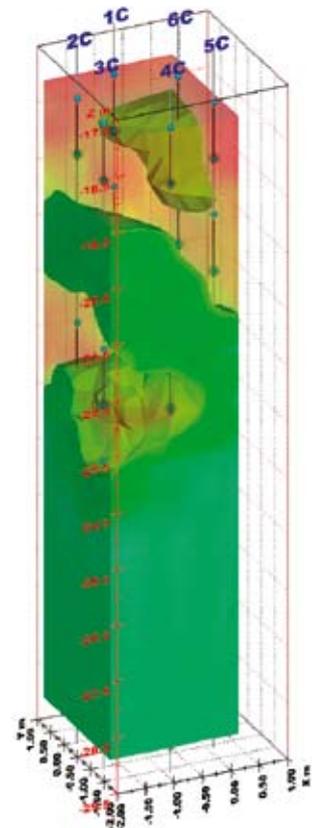


Figura 24 - Isovolumi terreno trattato con velocità comprese tra 2.300 e 2.360 m/sec

per differenza, rappresentate dall'effetto trasparente, i volumi a velocità sismica superiore e inferiore a tale valore. Si può notare la consistente percentuale di volume compreso nel range di velocità media rispetto alle porzioni più lente e più veloci che, comunque, non si discostano in modo evidente dal valore medio.

Nelle figure 25, 26 e 27 si possono osservare alcuni tagli effettuati su piani orizzontali crescenti in profondità, e nelle Figure 28 e 29 quelli effettuati su piani verticali.

Come si può osservare l'indagine geofisica realizzata, pur nella complessità

esecutiva, ha confermato le potenzialità diagnostiche ipotizzate tramite la predisposizione del modello teorico.

Il rilievo ha quindi consentito, attraverso una metodologia d'indagine non invasiva, di valutare il grado di omogeneità del trattamento del terreno effettuato con metodologia jet-grouting per la realizzazione del tappo di fondo.

Analizzando le varie visualizzazioni i risultati si possono così sintetizzare: Nell'insieme, la distribuzione dei valori

di velocità evidenzia buona omogeneità nei suoi valori medi superiori ai 2.300 m/sec., mettendo in luce l'assenza di disomogeneità all'interno del volume indagato;

La distribuzione dei valori di velocità sismica visibile nei vari tagli considerati è nel complesso buona, denotando un grado di addensamento sostanzialmente uniforme nella porzione compresa tra i 22 - 23 e i 29 m, con tendenza a graduar-

Figura 25 - Sezione orizzontale effettuata con taglio a -20 m dal piano campagna

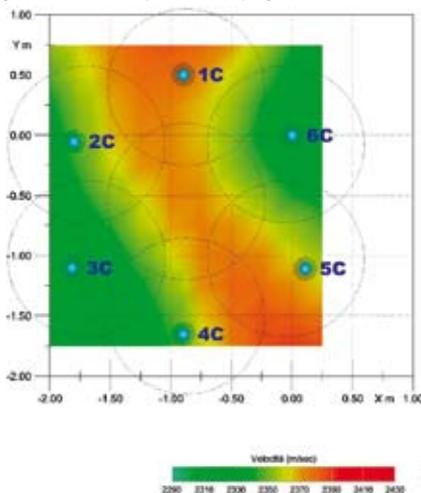


Figura 26 - Sezione orizzontale effettuata con taglio a -24,5 m dal piano campagna

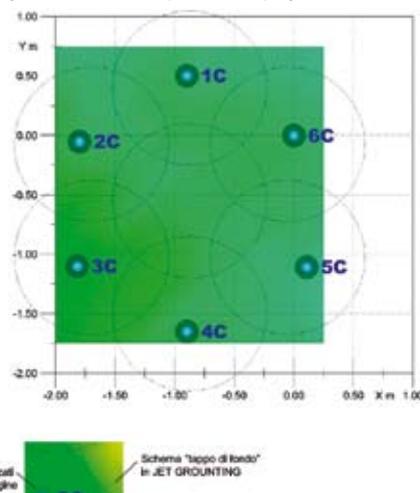
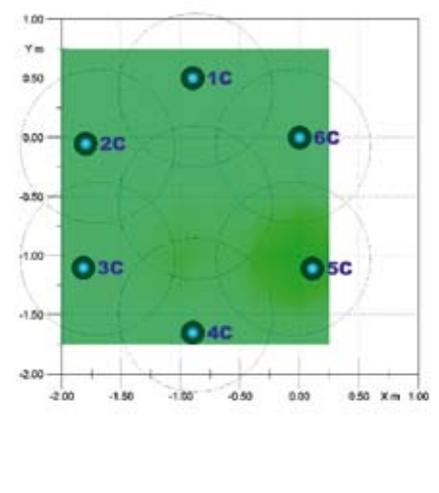


Figura 27 - Sezione orizzontale effettuata con taglio a -28 m dal piano campagna



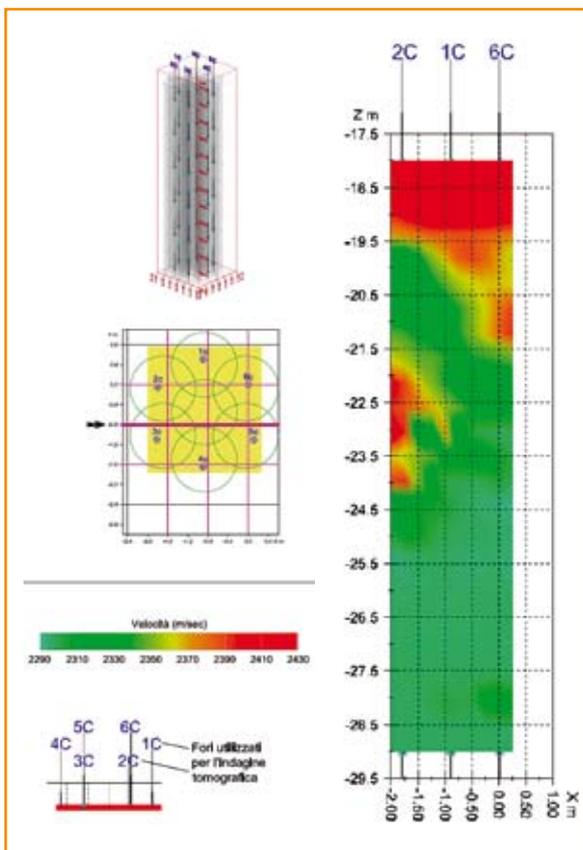
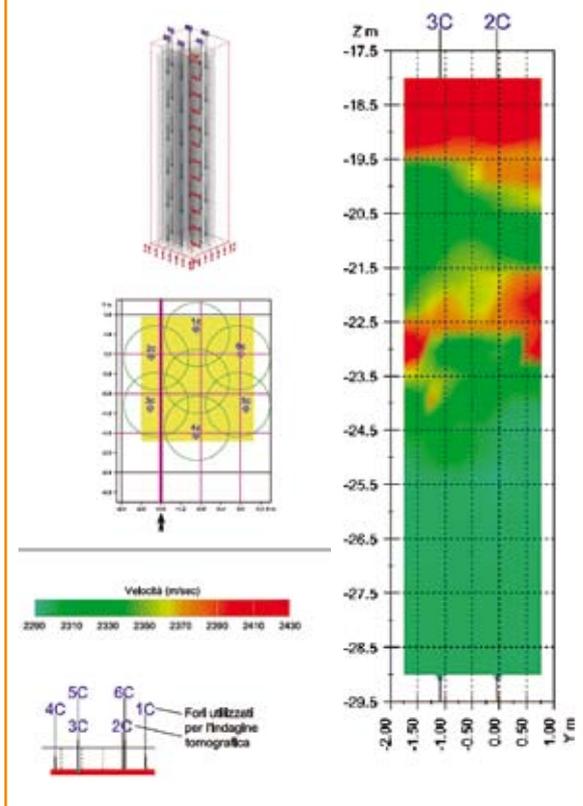


Figure 28-29 - Sezioni verticali



si su valori anche maggiori a quello medio nella porzione superiore.

Come evidenziato dalla tomografia bidimensionale i valori più elevati di velocità (>2360 m/sec.) si riscontrano nella porzione superiore, dove fino a circa quota -23 m i colori più rossastri mettono in risalto la maggiore densità del terreno trattato, correlabile con la presenza di ghiaie.

Cross Hole

Sui sismogrammi registrati sono stati "letti" i tempi di arrivo sia delle onde sismiche P che delle onde S, per ogni intervallo di profondità. Il calcolo delle velocità sismiche è stato realizzato dividendo la distanza fra i due sensori con differenza dei tempi di arrivo fra i due sensori stessi. L'utilizzo di due sensori, ha consentito di evitare eventuali errori legati alla individuazione del tempo zero delle registrazioni.

Nei grafici delle figure 30 e 31, rispettivamente per il terreno naturale e per il terreno consolidato, è visualizzato l'andamento delle velocità sismiche (P e S), dalla superficie fino a fondo foro dei singolo Cross-Hole. Dall'analisi dei due Cross Hole eseguito sul terreno naturale emerge con chiarezza, e confermando le altre prove, la bontà dell'intervento di consolidamento infatti si può osservare un notevole incremento delle velocità registrate.

Analizzando in dettaglio i risultati delle due prove si può affermare:

La velocità delle onde P nel terreno naturale raggiungono valori superiori a 1.500-1.600 m/sec, fino a 1.800 m/sec. Tali valori sono dovuti alla pre-

Figura 30 - Diagramma Cross Hole su terreno naturale

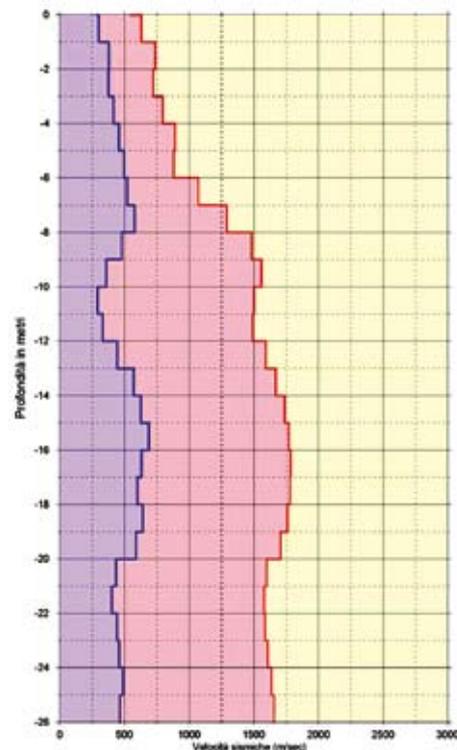
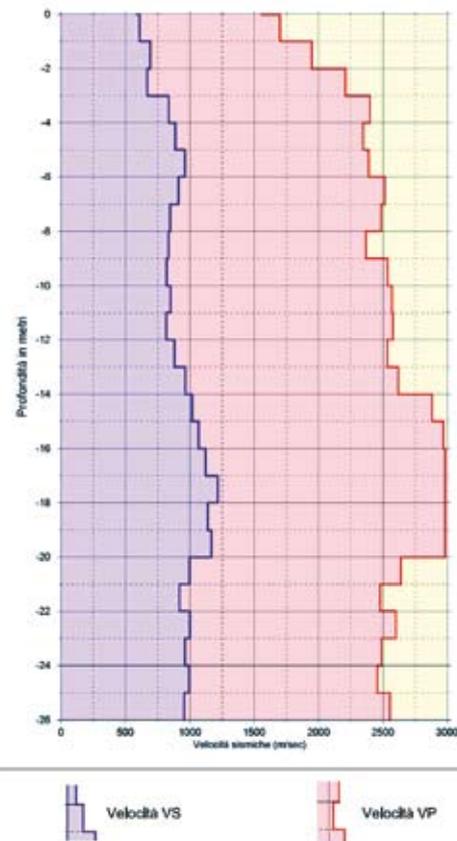


Figura 31 - Diagramma Cross Hole su terreno consolidato



senza della falda acquifera, in quanto le velocità misurate delle onde di compressione dipendono in modo preponderante dalle caratteristiche della fase liquida (acqua), a discapito delle caratteristiche della fase solida (scheletro e matrice) del materiale.

I valori delle Vs, fino a 4 m dal p.c., sono piuttosto bassi e inferiori a 400 m/sec, dai 4 ai 9 m. I valori delle Vs si attestano tra i 450 e i 550 m/sec. L'intervallo tra 10 e 13m presenta un abbassamento della Velocità delle onde di taglio fino a valori di 300 m/sec. Tra i 14 e i 20m la Vs aumenta tenendosi attorno a valori di 600 m/sec. Dai 20 m in poi la velocità Vs si mantiene su valori di 450 m/sec.

Il modulo di taglio Go presenta valori mediamente compresi fra 3 e 4.0×10^3 kg/cm² arrivando fino a valori di $6-9.0 \times 10^3$ kg/cm².

La velocità delle onde P nel terreno consolidato sono elevate già a partire dal primo metro (1.700 m/sec) e raggiungono valori di circa 2.250m/sec dal 2 metro.

Da 3 a 6 metri i valori di velocità Vp si attestano attorno ai 2350/2400 m/sec.

Da 6m a 14 m il valore di Vp si mantiene attorno a 2500 m/sec, così come dai 21 metri fino a fine foro.

Nel tratto compreso tra 14 e 20 m si registra un aumento consistente di velocità fino a 2.800/3.000 m/sec.

Anche le onde di taglio presentano velocità consistenti (600/700 m/sec) a partire dai primi metri.

Nel tratto da 3 a 14 m la Vs si attesta attorno a valori di 800/900 m/sec

Nell'intervallo da 14 a 20 m di profondità la Vs raggiunge i massimi di velocità (1.000/1.200 m/sec).

Nel tratto finale della prova la velocità Vs si assesta su valori costanti di 900/1.000 m/sec. Il modulo di taglio Go presenta valori mediamente compresi fra $1,0 \times 10^4$ Kg/cm² e $3,0 \times 10^4$ Kg/cm².

Log sonico

L'analisi e l'elaborazione dei dati acquisiti, ha permesso di discriminare, nell'ambito della verticale, i tratti di variazione delle caratteristiche di propagazione dei segnali acustici.

Figura 32 - Grafico Log sonico

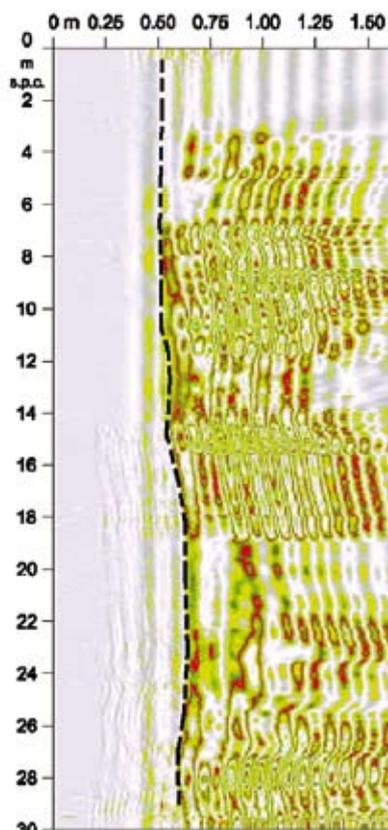
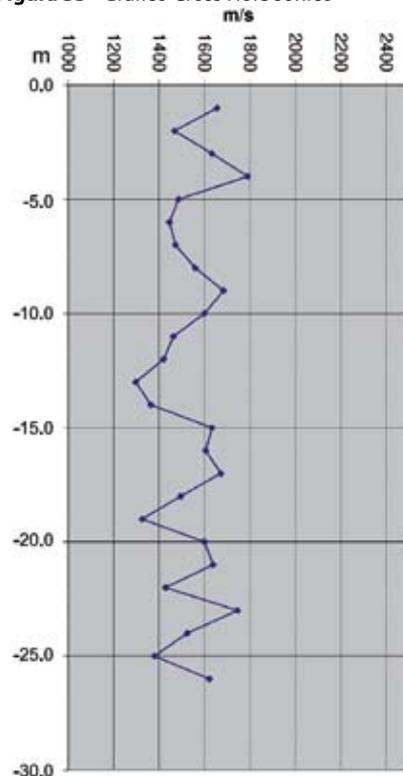


Figura 33 - Grafico Cross Hole sonico



Nella figura 32 è riportato il grafico di uno dei rilievi eseguiti. Analizzando questi grafici è stato possibile definire uno spessore minimo medio del volume di terreno consolidato per ogni lettura eseguita. Tali spessori, tenendo conto della geometria dei fori di indagine e delle colonne di terreno consolidato, sono dovuti a raggi effettivi minimi medi della colonna pari a circa 0,70 m.

Cross Hole sonico

Nella figura 33 è riportato un grafico del Cross Hole sonico.

Come detto tale prova può essere sviluppata sono tra fori che hanno una distanza ridotta, anche se occorre sottolineare che le onde ultrasoniche sono caratterizzate da un maggior potere risolutivo rispetto alle acustiche e risentono maggiormente delle eterogeneità nel mezzo di propagazione. In tali condizioni le velocità risultano leggermente inferiori rispetto a quelle misurabili tramite rilievi con onde acustiche, di un valore percentuale compreso tra 10 e 20%. Considerato che i valori misurati sono compresi tra 1.500 e 2.200 m/sec si può considerare un corrispondente range acustico di 1.700 e 2.500 m/sec.

Risultati finali campo prova

Alla luce dei risultati evidenziati ottenuti tanto dalle prove di laboratorio in sito, considerando che il diametro medio ottenuto nel campo prova è stato sviluppato il progetto del trattamento. I parametri di iniezione sono stati definiti facendo riferimento, ad un diametro minimo delle colonne pari a 135 cm, che, visti i risultati ottenuti lascia sufficienti garanzie anche in presenza di eventuali anomalie.

Relativamente alla disposizione planimetrica, sono stati previsti tre tipi di maglia triangolare equilatera il cui lato è pari rispettivamente a 100, 95 e 90 cm in funzione della profondità del trattamento e quindi del fondo scavo, ovvero aumentando la compenetrazione nei tratti con maggiore spessore di trattamento.

Come detto in precedenza con tale geometria viene garantita una compenetrazione sufficiente a garantire l'impermeabilità del tappo di fondo, anche in presenza di una deviazione della colonna di 1°.

Esecuzione del tappo di fondo

Attualmente l'intervento è in fase di realizzazione, sulla base di quanto emerso dal campo prova e sono state le prime verifiche sulla bontà delle scelte eseguite.

Le macchine attualmente utilizzate in produzione sono oltre 20 e così come nel campo prova, sono tutte attrezzate per la registrazione in continuo di tutti i parametri di iniezione (velocità di risalita, velocità di rotazione, verticalità della torre, portata della pompa, pressione di iniezione della miscela e dell'aria, ecc.) su supporto magnetico collegato all'attrezzatura di lavoro mediante opportuni trasduttori. Viste le dimensioni dell'intervento, ed il numero di macchine in funzione, si è ritenuto opportuno certificare la corretta posizione planimetrica delle colonne eseguite, nonché la verticalità della torre di perforazione. Per questo è stato sviluppato un apposito sistema di posizionamento con



Figura 34

GPS, in grado di fornire prima dell'inizio della perforazione la corretta posizione e di registrare gli scostamenti, durante le lavorazioni, rispetto alle coordinate progettuali.

Sistema di posizionamento con GPS

La soluzione di posizionamento sviluppata, guida l'operatore direttamente sul punto di perforazione con precisione centimetri-

ca, in modo semplice e veloce. L'operazione di collimazione del punto, avviene osservando un picchetto virtuale rappresentato su di un display di controllo.

In questo modo si ha la certificazione della posizione di tutte le colonne eseguite.

Tale sistema si somma a quello tradizionale di picchettaggio a terra, che può essere sviluppato su aree di lavoro di grandi dimensioni, senza il bisogno della verifica quotidiana, soprattutto per correggere la quota di inizio e fine

perforazione. La sedimentazione dello spurgo infatti determina generalmente l'aumento della quota del piano di lavoro, portando a quote di trattamento diverse da quelle di progetto.

Figura 35



Figura 36

Per mantenere l'altezza minima di progetto si deve, altrimenti, prevedere uno spessore maggiore di trattamento, ma anche in questo caso, durante le fasi di scavo si dovrebbero demolire le colonne che raggiungono le quote maggiori, con un notevole ritardo sui tempi di lavorazione.

I componenti del sistema installati su ogni singola macchina sono:

- un computer;
- un inclinometro biassiale;
- un ricevitore GPS/GLONAS;
- due antenne GPS;
- un radio modem.

Il GPS installato sulla sonda, Figura 37 opera in modalità RTK, acquisendo le coordinate dalla costellazione di satelliti e ricevendo una informazione di correzione differenziale da una base di riferimento fissa posta all'interno del cantiere.

Le informazioni di guida della sonda perforatrice elaborate da un apposito programma di progettazione vengono memorizzate all'interno del computer della macchina. Il file di guida della sonda, viene creato in un formato proprietario DRL costituito da due "layerlivelli":

Il primo livello contiene le coordinate di progetto x, y, z della maglia di perforazione di progetto.

Il secondo livello rappresenta la posizione planimetrica delle coordinate registrate durante la fase di perforazione.

La sonda viene aggiornata sullo stato di avanzamento dei lavori utilizzando un nuovo File in formato DRL (File dedicato) proveniente da un unico server, in questo modo è possibile poter visualizzare sul pannello di guida della macchina operatrice la situazione aggiornata delle perforazioni eseguite quelle ancora da effettuare.

Nella Figura 38 si possono osservare le funzionalità che appaiono sul display.

Una volta selezionato il punto di trivellazione sulla planimetria del display saranno visualizzate le informazioni necessarie per effettuare una precisa collimazione. L'operatore deve semplicemente posizionare la torre di perforazione in modo verticale, osservando la bolla elettronica (in alto a sinistra) e muovere la macchina in modo planimetrico cercando di individuare la migliore condizione rappresentata dalla grafia delle frecce verdi (angolo in basso a sinistra).

Posizionato l'utensile di perforazione sul punto prescelto e all'interno della tolleranza di configurazione, sul monitor si attiverà la casella "Inizio Trivellazione", e l'operatore deve confermare l'inizio della lavorazione.

Figura 37



L'operatore ha sul monitor l'informazione della quota di inizio e fine trattamento, rilevata in tempo reale dal GPS, che dovrà impostare sul sistema di controllo di perforazione. In questo modo è possibile ottenere sempre, come detto, la quota esatta di trattamento indipendentemente dalla posizione in cui si trova il carro della macchina operatrice.

Finito il trattamento, l'operatore dovrà premere il pulsante apposito "Fine Trivellazione".

Durante l'operazione di guida il programma registra all'interno in un file di registro le seguenti informazioni:

- identificativo macchina;
- sigla o numero della colonna;

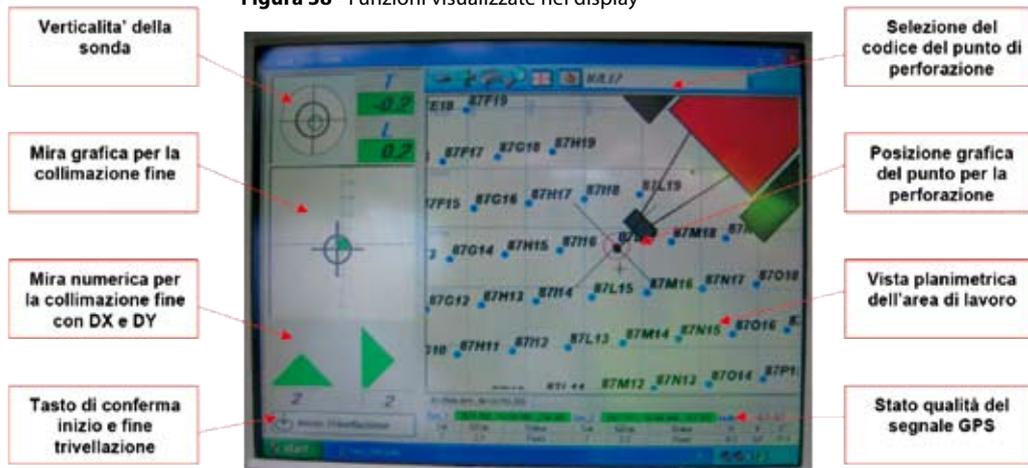
- scostamenti dalle coordinate di progetto;
- data e ora inizio perforazione;
- data e ora Termine perforazione;
- durata complessiva perforazione.

Nel tabulato finale sono registrate le informazioni di inizio e fine perforazione ed eventuali anomalie che si sono durante la lavorazione.

Controllo e monitoraggio del trattamento

Il controllo dell'esecuzione del trattamento è stato fatto, analogamente a quanto sviluppato durante il campo

Figura 38 - Funzioni visualizzate nel display



prova è stato fatto per mezzo di indagini dirette in sito (sondaggi a carotaggio continuo, prove di permeabilità, ecc.), indagini geofisiche (tomografia sismica tridimensionale) e prove di laboratorio.

Sondaggi a carotaggio continuo

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti per verificare la qualità dell'intervento e sono stati attrezzati per l'esecuzione dell'indagine geofisica.

Come detto, per verificare l'influenza del diametro di carotaggio sulla qualità dei campioni, i sondaggi sono stati eseguiti utilizzando il carotiere triplo (TS6S) con diametro 101 mm e 131 mm.

Nella Figura 39 è riportata la foto di una cassetta contenente i campioni prelevati con un sondaggio eseguito con il carotiere T6S diametro 131 mm a ridosso nella zona compenetrazione di due colonne,

Figura 39 - Campioni prelevati con carotiere T6S con diametro da 131 mm

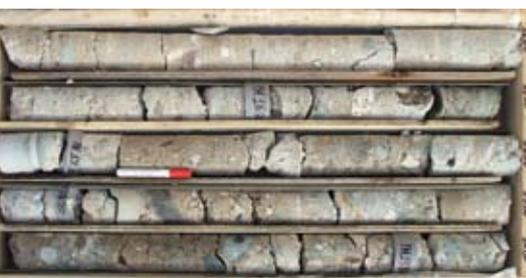


Figura 40 - Campioni prelevati con carotiere T6S con diametro da 101 mm

mentre nella Figura 40 è riportata la foto della cassetta dei campioni prelevati alla stessa quota con carotiere da 101mm nella parte centrale di una delle due.

Come si può osservare la qualità dei campioni prelevati con il carotiere da 101 è sicuramente inferiore rispetto all'altra, pur testimoniando una ottima cementazione.

Le prove di permeabilità eseguite a varie profondità del tappo di fondo hanno certificato la sua impermeabilità.

L'analisi statistica fornisce per l'RQD un valore medio superiore all'82%, con scarti medi inferiori al 26%, ma tali valori, sono influenzati, come detto anche dal diametro del carotiere utilizzato.

Prove di laboratorio

Analogamente al campo prova su un numero di campioni significativi e rappresentativi delle litologie di terreno consolidato sono state eseguite prove di laboratorio per determinare i seguenti parametri:

- Peso dell'unità di volume,
- Resistenza a compressione,
- Modulo di deformazione E.

Peso dell'unità di volume

I valori del peso di volume (γ) variano da un minimo di 1,72 t/m³ ad un massimo di 2,45 t/m³, con un valore medio di 2,11 t/m³ e i valori di dispersione dei risultati, espressi in termini di deviazione standard, sono inferiori a 0,3 t/m³.

Analizzando le probabilità di superamento del valore considerato in fase progettuale ($\gamma_{\text{prog}} = 2 \text{ t/m}^3$) si ha un valore del 65%.

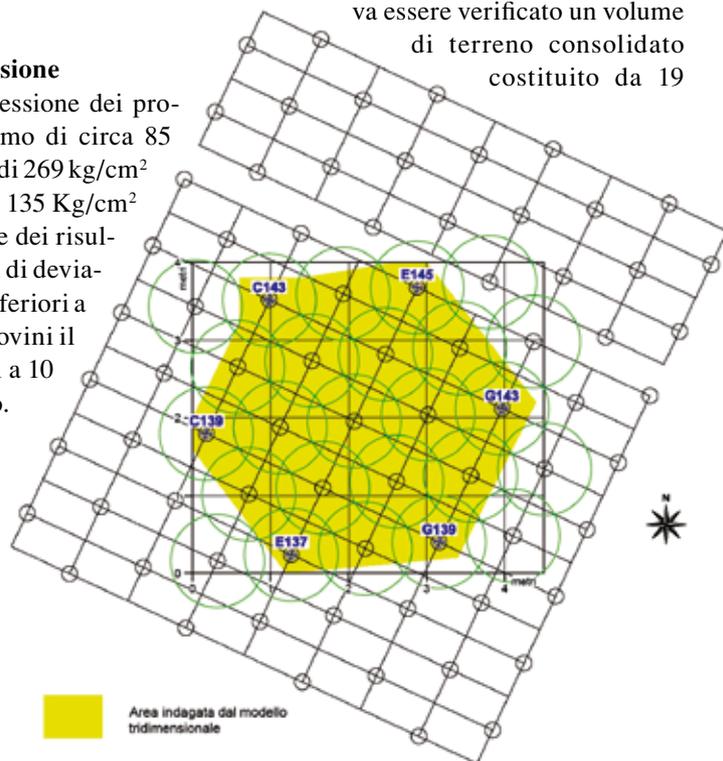
Resistenza a compressione

La resistenza a compressione dei provini varia da un minimo di circa 85 kg/cm² ad un massimo di 269 kg/cm² con un valore medio di 135 Kg/cm² e i valori di dispersione dei risultati, espressi in termini di deviazione standard, sono inferiori a 46 Kg/cm². In tutti i provini il valore di progetto, pari a 10 kg/cm², viene superato.

Figura 41 - Schema planimetrico modulo di acquisizione

E137, G139... Fori utilizzati per l'indagine 3D

Area indagata dal modello tridimensionale



Modulo di deformazione

A partire dai grafici sforzo-deformazione relativi alle prove sui campioni di terreno trattato, è stato determinato per ogni singolo provino il valore di modulo elastico secante in corrispondenza di un valore di deformazione assiale unitaria pari allo 0.5% ($E_{0.5\%}$). Nei provini ove la rottura si è manifestata prima di tale livello di deformazione il modulo è calcolato secondo la tangente alla curva di compressione.

I valori medi di $E_{0.5\%}$ variano da un minimo di circa 1.318 Mpa ad un massimo di 2.346 Mpa, con un valore medio di 1.670 Mpa e i valori di dispersione dei risultati, espressi in termini di deviazione standard, sono inferiori a 275 Mpa.

In tutti i provini il valore di progetto di 100 Mpa viene ampiamente superato.

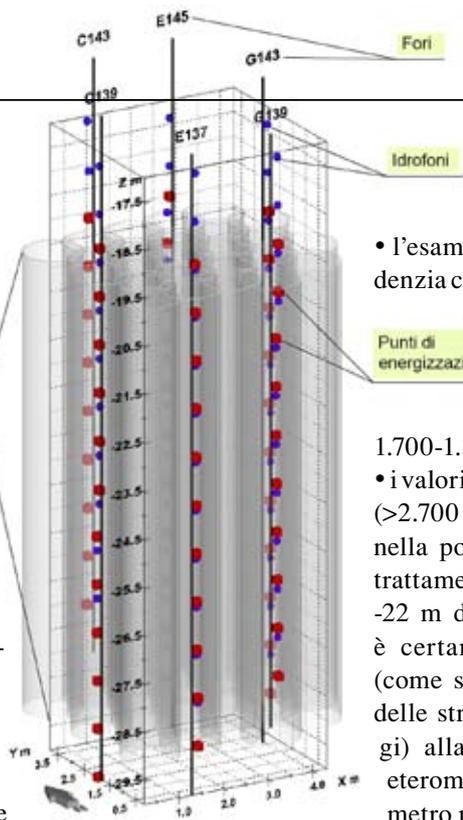
Indagine geofisica

Per la verifica della qualità del trattamento è stata realizzata un'indagine geofisica tridimensionale, con la stessa metodologia applicata per lo studio del campo prova.

I fori di acquisizione erano posti ai vertici di un esagono così come riportato nelle

Figure 41 e 42, in questo modo poteva essere verificato un volume di terreno consolidato costituito da 19

Figura 42
Schema
volumetrico
modulo di
acquisizione



colonne, avendo modo di valutare la omogeneità del trattamento anche nelle zone di compenetrazione. I risultati dell'indagine sismotomografica sono stati rappresentati secondo diverse elaborazioni così come nel campo prova.

Analizzando le sezioni verticali realizzate con tagli verticali del solido di velocità sia lungo l'asse X (Figura 43) che lungo l'asse Y (Figura 44) e quelle orizzontali (Figure 45 e 46) si può os-

servare:

- l'esame degli elaborati evidenzia che: I terreni in sito, sia aldisotto e aldisopra, del trattamento presentano valori inferiori a 1.700-1.800 m/sec;
- i valori più elevati di velocità (>2.700 m/sec) si riscontrano nella porzione superiore del trattamento fino a circa quota -22 m dal p.c.. Questo fatto è certamente da collegarsi (come si emerso dall'analisi delle stratigrafie dei sondaggi) alla presenza di ghiaia eterometrica e ciottoli (diametro massimo fino 7-8 cm) con trovanti di notevoli dimensioni;
- al disotto, da circa -22 m a -29 m dal p.c., quanto i materiali costituenti il terreno naturale sono rappresentati da sabbie e sabbie limose si registrano valori di velocità sismica V_p compresi fra 2.200

e 2.500 m/sec;

- localmente si osservano zone con velocità maggiori, da collegarsi alla presenza di sabbie cementate naturalmente. La loro presenza è comunque discontinua sia verticalmente che orizzontalmente;
- tra circa -24 e -26 m dal p.c. Si osservano volumi di trattamento con valori delle velocità dell'ordine di 2.050/2.150 m/sec (colori bluastri), con settori in cui si registrano valori solo leggermente superiori a quelli del terreno naturale. Tali zone sono da correlarsi alla presenza di limi sovraconsolidati e torbe;
- le zone di compenetrazione non presentano variazioni di velocità rispetto alla parte centrale.

Le immagini degli elaborati relativi alla rappresentazione 3D, visualizzano in modo molto efficace la distribuzione volumetrica dei valori di velocità del solido considerato.

Nella Figura 47 è rappresentata una particolare elaborazione dei dati, con visualizzazione delle porzioni caratterizzate

Figura 43 - Sezione verticale

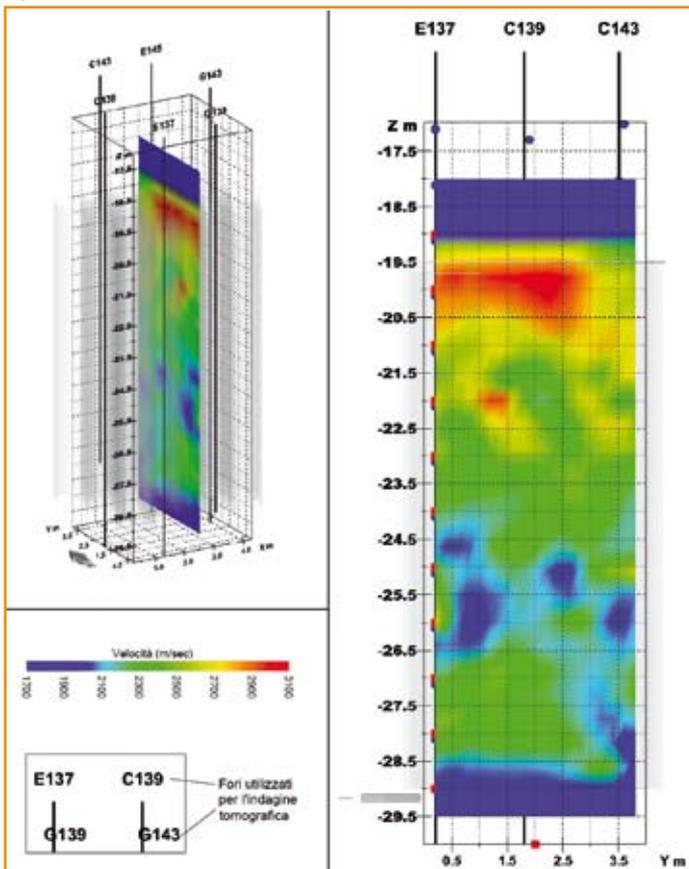


Figura 44 - Sezione verticale

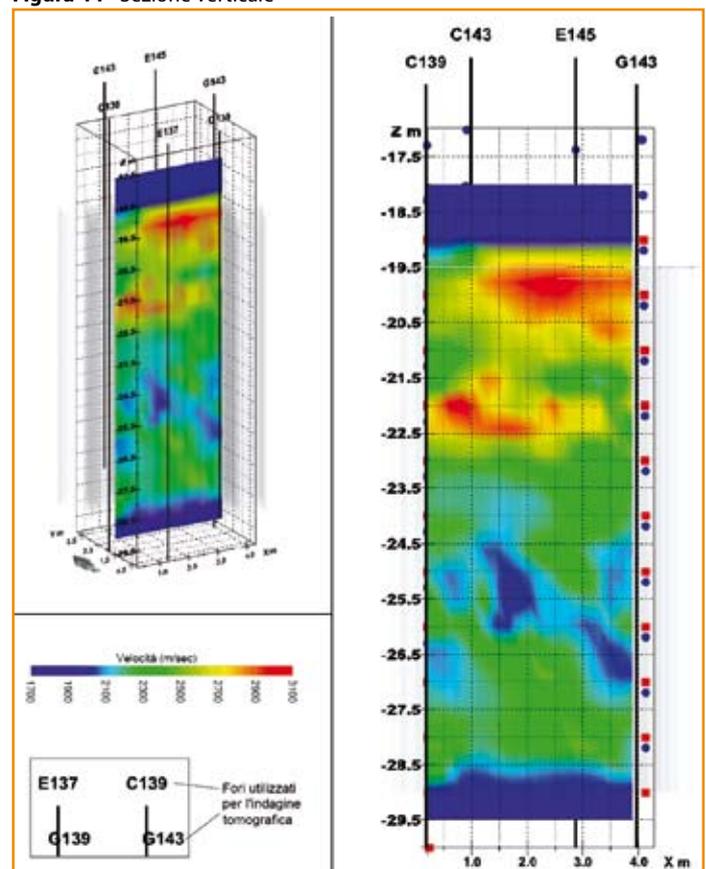
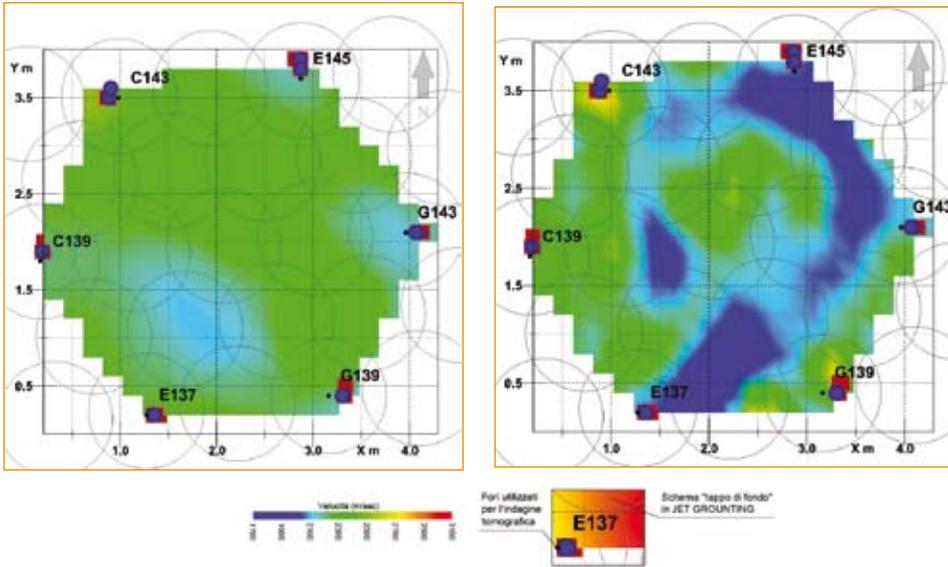


Figura 45-46 - Sezione orizzontale



da velocità sismica inferiore a 2.050 m/sec evidenziate con colore pieno rispetto al valore medio di velocità, espresso, viceversa, dal trasparente. Come detto precedentemente si possono osservare i terreni in sito, non trattati, e le anomalie precedentemente individuate e descritte tra -23 e -25 m. dal p.c.

La Figura 48 rappresenta una particolare

elaborazione dei dati, con visualizzazione delle porzioni caratterizzate da velocità sismica superiori a 2.700 m/sec evidenziate con colore pieno rispetto al valore medio di velocità, espresso, viceversa, dal trasparente. Si può notare che la porzione ad alto valore di velocità, superiore ai 2700 m/sec sia localizzata nella porzione sommitale del volume trattato.

La Figura 49 mette in evidenza il volume solido consolidato a velocità sismica media compresa tra 2200 e 2700 m/sec e per differenza, rappresentate dall'effetto trasparente, i volumi a velocità sismica superiore e inferiore a tale valore. Si può notare come la più parte del volume trattato sia compreso nel range di velocità con locali elementi di riduzione e/o aumento di velocità.

Confrontando questi risultati con quelli relativi al Campo Prove è possibile fare le seguenti considerazioni, tenendo conto delle diverse dimensioni del volume di terreno indagato:

- Nel complesso, i valori di velocità sismica V_p medi del terreno trattato, sono sostanzialmente confrontabili nelle due aree;
- Nel modulo di verifica della produzione, si può osservare una velocità maggiore rispetto a quella registrata nel campo prova fra i 19 e 22m dal p.c. (in corrispondenza dei materiali più ghiaiosi).
- Nei terreni sabbiosi sottostanti, nel Campo Prove, si erano registrate velocità inferiori, ma non si erano evidenziati anomalie con velocità sismiche inferiori a 2300 m/s.

Figura 47 - Isovolumi con V_p inferiori a 2.050 m/sec

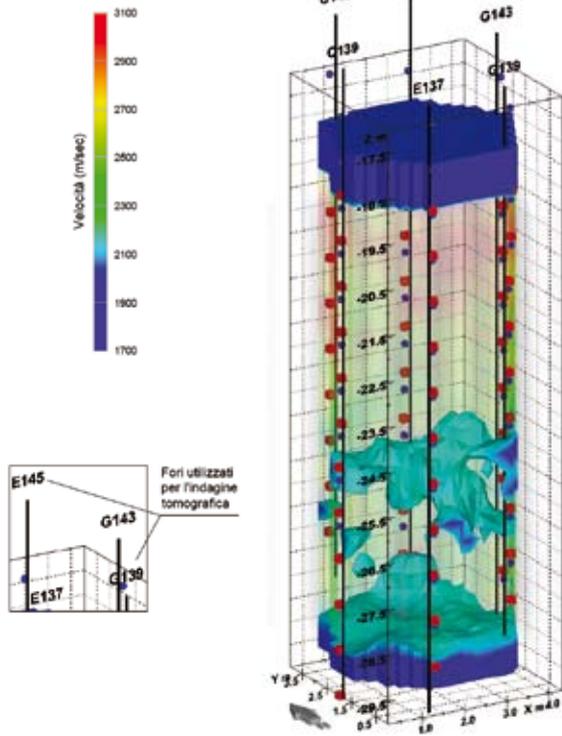


Figura 48 - Isovolumi con V_p superiore a 2.700 m/sec

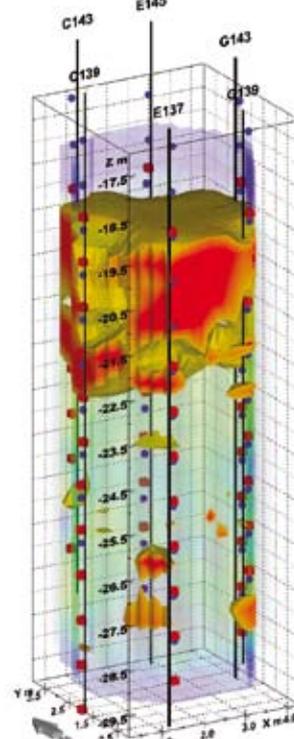
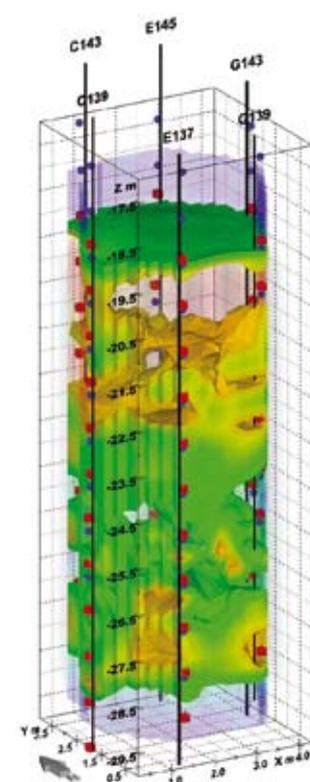


Figura 49 - Isovolumi con V_p compresa tra 2.200 e 2.700 m/sec



Da qualche mese **Gianfranco Bruzzi**

ci ha lasciato, si è spento infatti alla fine del 2006 dopo breve malattia, lasciando un vuoto incalcolabile a chi, come me, aveva avuto l'opportunità di conoscerlo sia professionalmente che soprattutto umanamente.

La sua passione per la geofisica lo aveva portato a cercare e trovare sempre nuove applicazioni, e l'articolo ne è un esempio. Gianfranco credeva in quello che faceva e si presentava sempre con la sua disponibilità e umanità, sempre pronto a discutere e affrontare nuove sfide.

Ma, come ho detto, è soprattutto dal punto di vista umano che vogliamo ricordarlo, e con noi tutti gli altri autori, perchè 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.

Questo articolo è un piccolo modo per ricordarlo, scriverlo non è stato facile per l'emozione che spesso si generava pensando alle lunghe discussioni in un confronto senza preconcetti.

Alla moglie, alla figlia, al figlio e ai colleghi di Geoinvest vanno, ancora una volta, le nostre più sincere e sentite condoglianze, convinti che il dolore non si è attenuato, ma certo che Gianfranco ci guarda e veglia su di noi.

Stefano Ciufegni
Renato Briganti

Conclusioni

Per il progetto, l'esecuzione e il controllo del consolidamento del terreno ci si è avvalsi delle migliori tecnologie a disposizione, coscienti dell'importanza che il tappo di fondo ha nello sviluppo del progetto del passante ferroviario.

Sono state testate e sviluppate tecniche di indagine e tecnologie di controllo innovative per garantire la funzionalità dell'intervento e il rispetto dei tempi previsti.

L'analisi dei risultati delle prove eseguite confermano la bontà del progetto e sulla scorta dei risultati delle prove di laboratorio e per quanto osservato nelle prospezioni geofisiche, si può giungere alle seguenti conclusioni:

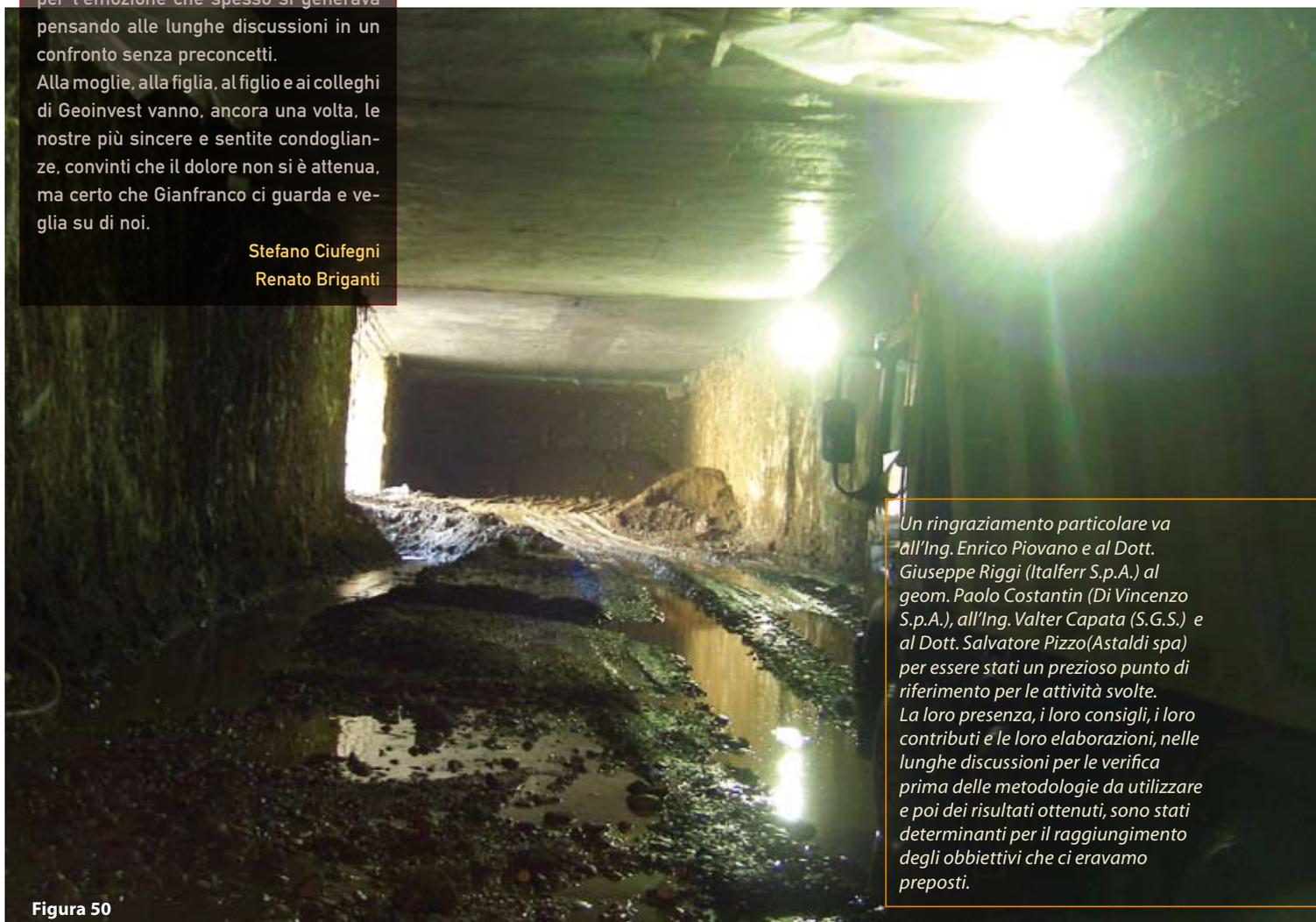
- relativamente alle caratteristiche di massa, deformabilità e resistenza assun-

ti in fase di progettazione esecutiva, si osserva che questi vengono confermati con risultati mediamente uguali o superiori rispetto a ottenuti nel campo prova;

- in particolare il peso di volume medio è risultato essere maggiore di 2 t/m^3 , che era il valore progettuale di riferimento, garantendo, con sufficiente sicurezza anche in presenza di anomalie, la funzionalità dell'intervento e la sicurezza nelle successive fasi lavorative.

Queste affermazioni trovano conferma anche dalle prime fasi di scavo della galleria artificiale, come si può vedere nella Figura 50.

La presenza di acqua che si osserva nella foto è dovuta alle infiltrazioni nei giunti dei pannelli dei diaframmi realizzati nel precedente lotto, mentre si può vedere che lo scavo, oltre alla finestra di accesso, appare completamente asciutto. ■



Un ringraziamento particolare va all'Ing. Enrico Piovano e al Dott. Giuseppe Riggi (Italferr S.p.A.) al geom. Paolo Costantin (Di Vincenzo S.p.A.), all'Ing. Valter Capata (S.G.S.) e al Dott. Salvatore Pizzo (Astaldi spa) per essere stati un prezioso punto di riferimento per le attività svolte. La loro presenza, i loro consigli, i loro contributi e le loro elaborazioni, nelle lunghe discussioni per la verifica prima delle metodologie da utilizzare e poi dei risultati ottenuti, sono stati determinanti per il raggiungimento degli obiettivi che ci eravamo preposti.

Figura 50