

Dott. Geol. Stefano CIUFEJNI, Renato BRIGANTI
Dott. Giovanni CAVALLERO, Enrico PIOVANO

Progettazione, esecuzione e monitoraggio del tappo di fondo per la realizzazione delle gallerie artificiali del quadruplicamento tra Porta Susa e Stura, nel Nodo di Torino

I Parte

*Dott. Geol. Stefano CIUFEJNI¹, Renato BRIGANTI²,
 Dott. Giovanni CAVALLERO³, Enrico PIOVANO⁴*

Progettazione, esecuzione e monitoraggio del tappo di fondo per la realizzazione delle gallerie artificiali del quadruplicamento tra Porta Susa e Stura, nel Nodo di Torino

I Parte

1. Premessa

Nel presente articolo sono descritte le attività di studio del tappo di fondo in corso di realizzazione per la costruzione delle gallerie artificiali del quadruplicamento tra Porta Susa e Stura, nel nodo di Torino.

È illustrato il campo prove 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 (prospettioni geofisiche bidimensionali e tridimensionali) eseguite per individuare e verificare le caratteristiche tecniche del terreno trattato e la sua aderenza al conglomerato, come dato, alla profondità di progetto.

Sono quindi presentati i risultati ottenuti durante la scelta, l'esecuzione delle operazioni, nonché la funzionalità delle indagini eseguite e il conseguente monitoraggio che ne è seguito durante l'esecuzione dell'intervento.

È presentato il sistema di posizionamento con GPS sviluppato per certificare, sotto l'elenco numero di conto, le misure, il corretto posizionamento della calotta.

Viene quindi descritto il monitoraggio eseguito in questo fase delle lavorazioni e sono analizzati e discussi i risultati ottenuti.

2. Il passante ferroviario di Torino

Il Passante ferroviario di Torino è un'infrastruttura cardine per il riassetto ferroviario della città, infatti nel

1990, il governo centrale ha fatto

Quando all'inizio degli anni '80 si iniziò l'attuazione del progetto di mobilità nella schema delle linee ferroviarie. Con il varo di Passante si dovrebbe indicare semplicemente il tratto in galleria compreso fra il Lingotto e Porta Susa, ma in realtà nella percezione comune della cittadinanza esso è andato a includere anche il quadruplicamento dei binari tra le stazioni di Porta Susa e di Stura. La necessità di eliminare la frammentazione dei binari in città ha portato alla scelta di realizzare tutto il lavoro abbassando il piano del binario, realizzando il sottopasso della galleria con un unico scavo continuo. Questo ha significato una notevole riduzione dei costi, oltre che un notevole risparmio di spazio per i servizi come barazzonieri o riseratoi sabbia (figg. 1 e 2).

Negli anni cinquanta nel Piano Regolatore Nazionale Generale della città di Torino era previsto il progetto di sottopasso il fiume Dora con una trave metallica, mantenendo la stessa quota del piano del letto dell'attuale stazione di Torino Dora, all'inizio degli anni '80 la città di Torino ha tuttavia richiesto l'interramento totale della linea al fine di consentire la ricaduta dell'ultima porzione di trave in basso ancora divisa dalla linea ferroviaria in superficie, in una ex zona industriale a forte inquinamento. È necessario di riconversione in terziario questa struttura ha costruito spettacolarmente un tunnel eccezionale per le ferrovie italiane. È sottopasso, non una galleria artificiale, di lunghezza, la Dora Ripetta.

Il progetto prevede la realizzazione di due gallerie in due fasi, est e ovest, con approfondimento massimo del

Progettazione, esecuzione e monitoraggio del tappo di fondo per la realizzazione delle gallerie artificiali del quadruplicamento tra Porta Susa e Stura, nel Nodo di Torino

I Parte

Dott. Geol. Stefano CIUFEJNI^(), Renato BRIGANTI^(*),
Dott. Giovanni CAVALLERO^(*), Enrico PIOVANO^(*)*

1. Premessa

Nel presente articolo sono analizzate le scelte progettuali del tappo di fondo in corso di realizzazione per la costruzione delle gallerie artificiali del quadruplicamento tra Porta Susa e Stura nel nodo di Torino.

E' 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, come detto, alle profondità di progetto.

Sono quindi presentati e analizzati i risultati ottenuti e la scelta conseguente delle lavorazioni, nonché la funzionalità delle indagini eseguite e il conseguente monitoraggio che viene eseguito durante l'esecuzione dell'intervento.

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

Viene quindi descritto il monitoraggio eseguito in questa fase delle lavorazioni e sono analizzati e discussi i risultati ottenuti.

2. Il passante ferroviario di Torino

Il Passante ferroviario di Torino è un'infrastruttura cardine per il riassetto urbanistico della città. Iniziati nel

1986, i lavori dovrebbero concludersi attorno il 2011-2012: a opera ultimata il capoluogo piemontese disporrà di un collegamento ferroviario integrato, interrato per ben 15 km, e riprenderà possesso di 260 mila m² 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 il Lingotto e Porta Susa, ma in realtà nella percezione comune della cittadinanza esso è andato a includere anche il quadruplicamento dei binari tra le stazioni di Porta Susa e 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, e realizzando tutto in sotterraneo. Questo ha significato non solo ricucire la frattura, ma anche liberare molte aree in superficie per costruire nuove infrastrutture o insediamenti urbani (figg. 1 e 2).

Negli anni novanta nel Piano Regolatore Ferroviario Generale della città di Torino era previsto il progetto di superare il fiume Dora con una travata metallica, mantenendo la stessa quota del piano del ferro dell'attuale stazione di Torino Dora; all'inizio degli anni 2000 la città di Torino ha tuttavia richiesto l'interramento totale della linea al fine di consentire la ricucitura dell'ultima porzione di tessuto urbano ancora diviso dalla linea ferroviaria in superficie, in una ex zona industriale a forte espansione abitativa e potenziale di riconversione in terziario. Questa decisione ha comportato inevitabilmente un fatto inconsueto per le ferrovie italiane: il sottopassaggio, con una galleria artificiale, di un fiume, la Dora Riparia.

Il progetto prevede 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 anche alla linea ferroviaria già esistente.

^(*) Italferr S.p.A.

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.

La prima fase è ormai in dirittura di arrivo; infatti entro il 2009 saranno attivati i primi 2 binari e la circolazione dei treni sarà spostata su questi per permettere di realizzare la fase est, che sarà attivata tra fine 2011 e inizio 2012.

All' inizio dell' intervento troviamo la nuova Stazione di Torino Porta Susa interrata, a 6 binari, completamente compenetrata con il tessuto urbano e nuovo fulcro della mobilità cittadina; proseguendo verso nord la galleria ferroviaria si immerge con una livelletta del 13‰ (fig.3) fino a sottopassare il fiume Dora. Nel punto più profondo della linea (circa 20m al di sotto del piano del ferro attuale), si trova la futura fermata di Torino Dora. A valle di questa la linea ini-



zia a riemergere incontrando la nuova futura stazione di Rebaudengo, in cui la linea concessa della GTT Torino - Caselle - Ceres si inserisce nella rete RFI.

L'emersione in superficie della linea è prevista circa un chilometro dopo, appena passato il ponte stradale di C.so Grosseto.

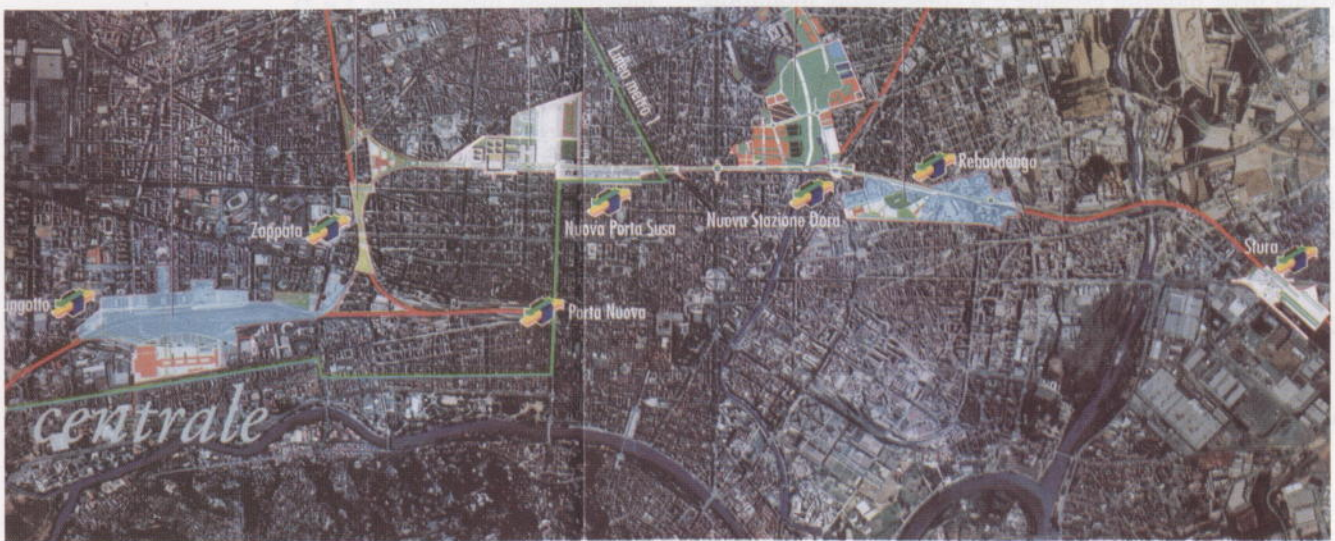


Fig. 2 - Inquadramento territoriale dell'intervento.

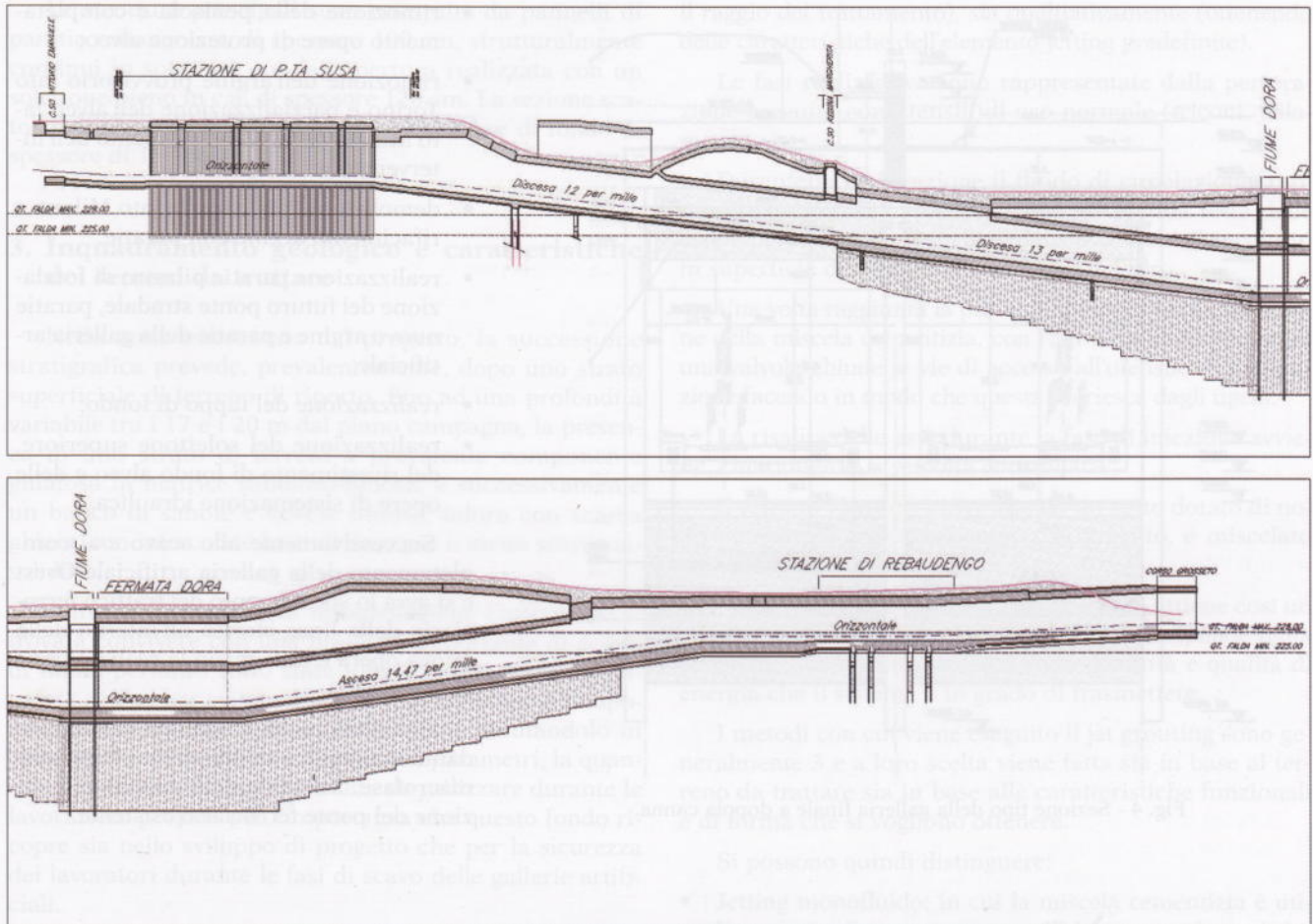


Fig. 3 - Profilo dell'intervento.

A livello di condizioni idrauliche l'intervento deve convivere con due diverse falde e quindi per la realizzazione sono state ideate strutture completamente stagne per evitare qualsiasi infiltrazione d'acqua.

Sono state costruite paratie, sono stati eseguiti scavi sotto copertura, impalcato di copertura, impalcato intermedio, solettone di fondo e rivestimenti interni (figg. 4 e 5).

Il sottoattraversamento della Dora è stata la parte progettuale e realizzativa di maggiore complessità; infatti per evitare di sbarrare totalmente le linee di flusso del fiume, e quindi minimizzare l'impatto dell'opera sull'ambiente, è stato ridotto al minimo lo spessore del tappo di fondo, ancorandolo al terreno con pali trivellati.

L'opera di sottoattraversamento del fiume Dora sarà realizzata con una galleria artificiale a due canne separate, individuate con le rispettive fasi Ovest ed Est.

L'opera ha comportato la realizzazione di diaframmi adeguatamente profondi, operando dall'alveo del fiume, parzializzandolo per fasi e realizzando, contestualmente, il solettone di copertura occorrente per sostenere l'alveo del fiume in sede definitiva. Nella progettazione dell'attra-

versamento si è prestata particolare attenzione alle fasi realizzative, privilegiando i periodi di magra del fiume, con costante monitoraggio del corso d'acqua.

La realizzazione delle due gallerie è prevista secondo la sequenza di fasi riassunte di seguito:

- demolizione del solettone della tombinatura esistente del fiume, a monte dell'attuale ponte ferroviario, e demolizione parziale dei setti verticali di sostegno (pile e spalle), limitando al massimo l'ingresso in alveo come richiesto dalla Regione Piemonte;
- prima parzializzazione del fiume mediante penisola (lato P.ta Susa);
- demolizione totale spalla lato Porta Susa della vecchia struttura di copertura del fiume;
- realizzazione paratie pilastro di fondazione del futuro ponte stradale, paratie nuovo argine e paratie della galleria artificiale;
- realizzazione del tappo di fondo;
- realizzazione del solettone superiore e del rivestimento di fondo alveo;

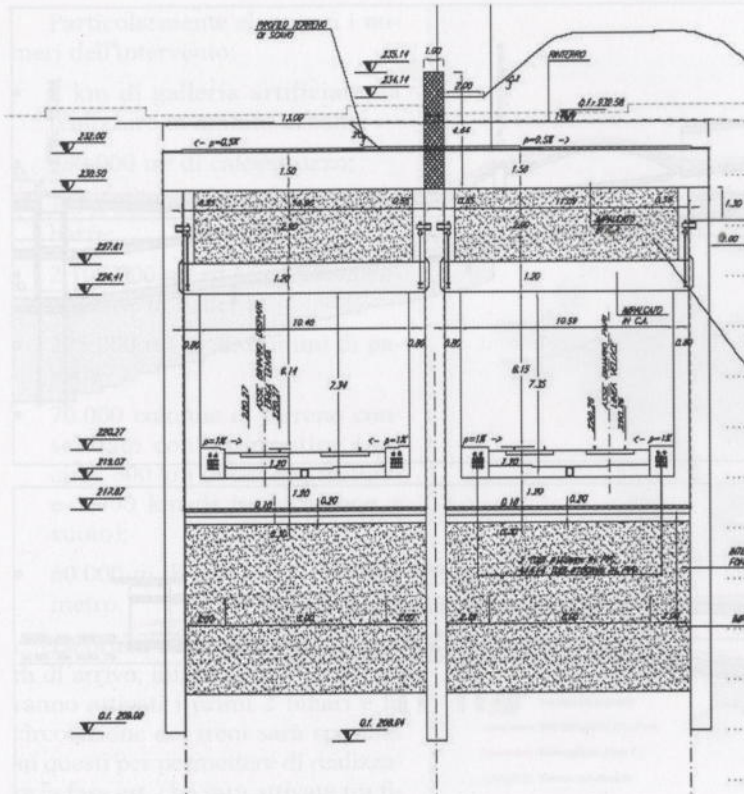


Fig. 4 - Sezione tipo della galleria finale a doppia canna.

- rimozione della penisola e completamento opere di protezione alveo;
- rimozione dell'argine provvisorio lato Torino e parzializzazione dell'alveo lato Milano per il completamento dell'intervento;
- demolizione totale spalla lato Milano e rifacimento argine con paratie;
- realizzazione paratie pilastro di fondazione del futuro ponte stradale, paratie nuovo argine e paratie della galleria artificiale;
- realizzazione del tappo di fondo;
- realizzazione del solettone superiore, del rivestimento di fondo alveo e delle opere di sistemazione idraulica.

Successivamente allo scavo e al completamento della galleria artificiale Ovest c si avrà lo spostamento del traffico ferroviario della linea storica all'interno della nuova opera e avrà inizio la realizzazione della fase Est.

Quest'ultima sarà realizzata con modalità analoghe a quelle della precedente macrofase, integrata dalle fasi di demolizione del ponte ferroviario esistente.

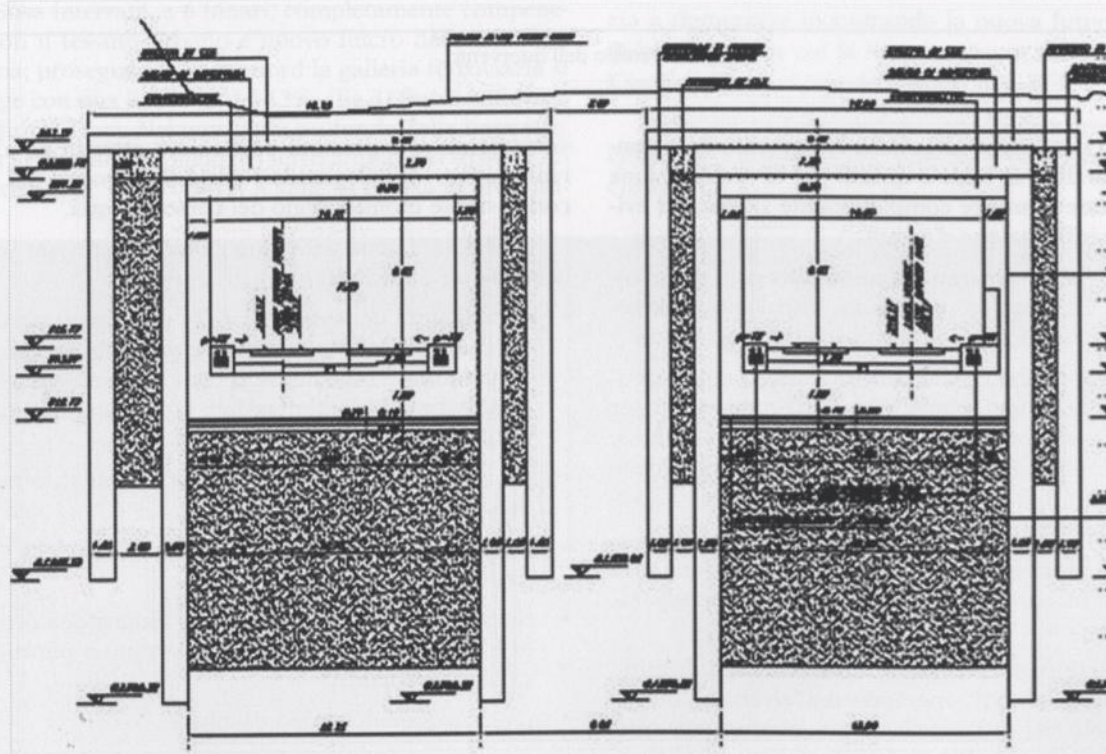


Fig. 5 - Sezione della galleria artificiale finale in corrispondenza del sottoattraversamento Dora Riparia.

Le strutture principali sono costituite da pannelli di paratia rettangolari, di spessore 100 cm, strutturalmente continui in sommità con la copertura realizzata con un solettone pieno in c.a. di spessore 120 cm. La sezione scapolare all'interno è costituita da un solettone di fondo di spessore di 180 cm.

3. 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.

A livello di condizioni idrogeologiche l'intervento si trova a convivere con una presenza importante di acqua di falda; pertanto sono state ideate strutture completamente stagne per evitare qualsiasi infiltrazione, il tappone di fondo, quindi, è stato ottimizzato, studiandolo in campi prova in modo da individuare i parametri, la quantità di cemento, i tempi di risalita da utilizzare durante le lavorazioni proprio per l'importanza che questo fondo ricopre sia nello sviluppo di progetto che per la sicurezza dei lavoratori durante le fasi di scavo delle gallerie artificiali.

4. Il progetto del tappo di fondo

Come detto in precedenza buona parte del tracciato si trova sotto falda e al fine di evitare il sifonamento del fondo scavo, sul quale si dovrà realizzare il solettone di base, costituente la piattaforma ferroviaria, si è ricorsi alla realizzazione di un tappo di fondo in jet-grouting.

4.1. Cenni sulla tecnologia del jet grouting

Con jet grouting o jetting si definisce, come è ormai ampiamente noto, una tecnologia che consiste nell'iniettare ad altissima pressione (20 - 70 N/mm² equivalenti a 200 - 700 bar) attraverso uno o più ugelli, situati all'estremità delle aste di perforazione, una miscela legante, normalmente costituita da acqua e cemento con rapporto tra loro di circa 1, con la quale il terreno viene disgregato e mescolato in situ, a formare, una volta decorso il tempo di presa della miscela, un elemento di terreno trattato con caratteristiche meccaniche più elevate rispetto alle condizioni iniziali.

L'obiettivo è, quindi, quello di ottenere questo miglioramento in maniera controllata, sia fisicamente (delimitando

il raggio del trattamento), sia qualitativamente (ottenendo delle caratteristiche dell'elemento jetting predefinite).

Le fasi realizzative sono rappresentate dalla perforazione eseguita con utensili di uso normale (triconi, trilame, ecc.).

Durante la perforazione il fluido di circolazione, rappresentato normalmente da acqua, esce sulla testa delle aste e permette la pulizia dell'utensile nonché il trasporto in superficie del detrito e il sostegno del foro.

Una volta raggiunta la profondità voluta, inizia l'iniezione della miscela cementizia, con l'aumento della pressione una valvola chiude le vie di accesso all'utensile di perforazione facendo in modo che questa fuoriesca dagli ugelli.

La risalita delle aste durante la fase di iniezione avviene, chiaramente, a velocità controllata.

Il terreno viene così investito da un getto dotato di notevole energia e di conseguenza disgregato, e miscelato con la miscela cementizia.

Con la rotazione della batteria di aste si ottiene così un cilindro di terreno miscelato la cui sezione dipende dalla resistenza del terreno stesso e dalla quantità e qualità di energia che il sistema è in grado di trasmettere.

I metodi con cui viene eseguito il jet grouting sono generalmente 3 e a loro scelta viene fatta sia in base al terreno da trattare sia in base alle caratteristiche funzionali e di forma che si vogliono ottenere.

Si possono quindi distinguere:

- Jetting monofluido: in cui la miscela cementizia è utilizzata per disgregare e creare l'elemento; tale metodologia permette di ottenere colonne con diametro da piccolo a medio.
- Jetting bifluido: il getto ad alta pressione della malta cementizia è associato ad un getto coassiale di aria compressa, il quale ha la funzione di incrementare il raggio d'azione del trattamento, limitando la dispersione della miscela, nonché di favorire la fuoriuscita del materiale di spurgo; tale metodologia permette di ottenere colonne con diametro da medio a grande.
- Jetting trifluido: l'azione disgregatrice è svolta dall'insieme dei getti contemporanei e coassiali di acqua ad alta pressione e aria compressa, iniettati attraverso un ugello posto alcuni decimetri al di sopra di quello dal quale viene iniettata la miscela a pressioni inferiori rispetto ai metodi precedentemente descritti; questo metodo, nonostante sia quello che permette un raggio di azione maggiore, generando, quindi elementi di terreno di maggiore diametro è generalmente poco utilizzato.

I criteri per analizzare l'efficacia del jet grouting sono il diametro delle colonne, la resistenza e la permeabilità del terreno trattato e la velocità d'esecuzione.

Per quanto precedentemente detto i parametri operativi che possono determinare la qualità esecutiva degli elementi jetting sono:

- la velocità di rotazione delle aste d'iniezione;
- la velocità di risalita delle stesse;
- la pressione d'iniezione della miscela cementizia;
- la pressione dell'aria nel caso dei sistemi bi e trifluido;
- il diametro dei fori degli ugelli.

La complessa interazione di tutti questi fattori, aggiunta alla possibile variabilità del terreno da trattare, richiede una pianificazione accurata dei lavori, con la sperimentazione in campi prova di varie combinazioni dei parametri di jettizzazione.

4.2. Il progetto del trattamento

Come detto la realizzazione del tappo di fondo aveva, in questo progetto, il compito di impedire sia la risalita dell'acqua di falda sia di stabilizzare il fondo scavo; pertanto il terreno trattato con jet grouting doveva avere un peso di volume minimo di 2 t/m^3 ed essere impermeabile.

Gli elementi di terreno trattato dovevano avere, quindi, un carattere di continuità tale da evitare il costituirsi di percorsi preferenziali per i filetti fluidi diretti verso l'interno della futura galleria. La continuità doveva essere garantita sia tra colonne di jet che sul limite tra il pannello di paratia (già realizzato) ed il tappo di fondo.

Il progetto dei parametri di jettizzazione è stato, quindi, 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.

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 il 40% di tale deviazione garantendo quindi la continuità del tappo di fondo, per uno spessore significativo, in modo da garanti-

re l'impermeabilizzazione dello scavo.

In questa ottica si è deciso che la compenetrazione fosse, nelle zone suddette, ritenute le più critiche, di 0,45 m.

Per la scelta finale della metodologia e dei parametri di jettizzazione da utilizzare è stato quindi sviluppato un campo prova.

4.3. Campo prova

Per lo sviluppo del campo prova sono state sperimentate 4 combinazioni tra metodologie esecutive e parametri di iniezione.

Tenendo conto che negli interventi di trattamento con jet grouting 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.

Di conseguenza 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 operative nelle situazioni più critiche, in termini di stratigrafia e profondità del trattamento.

In questa ottica la zona più opportuna in cui eseguire il campo prova è risultata in prossimità della progressiva chilometrica 7+720, a circa 100 metri dalla Dora Riparia, dove i terreni sono rappresentati da ghiaie, fino a circa 20 m dal piano campagna, che sormontano, come detto, le sabbie.

Sono state, quindi, 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 fig. 6.

Le rosette A, B e C sono state eseguite con la tecnica del bifluido mentre per la D è stata utilizzata quella del monofluido.

Ogni rosetta era caratterizzata da una combinazione specifica di parametri operativi, (pressione di iniezione, velocità di risalita, diametro ugello, rapporto acqua/ce-

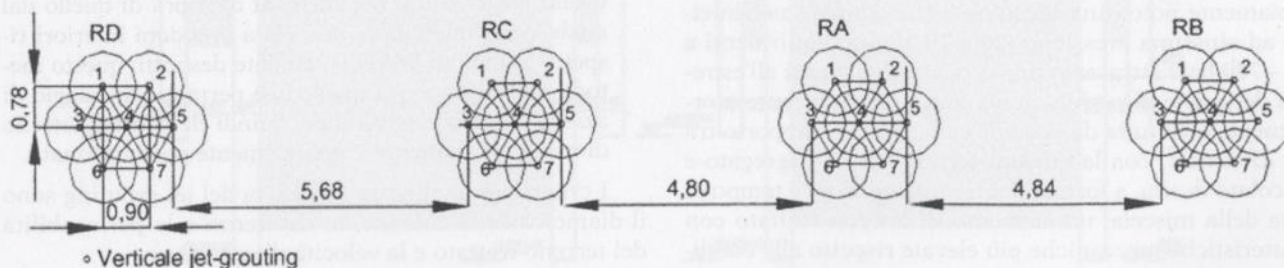


Fig. 6 - Schema campo prova.

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

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 sono descritte le metodologie di indagine e i risultati ottenuti.

4.3.1. 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.

E' 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 loro eventuali deviazioni rispetto alla verticale.

4.3.2. Prove di laboratorio

Su tutte le rosette sono stati prelevati campioni su cui sono state eseguite prove di laboratorio.

I campioni prelevati sono stati, complessivamente, circa 60 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.

4.3.3. Analisi statistica

I risultati delle analisi di laboratorio, insieme al parametro RQD, sono stati oggetto di uno studio statistico e sono riportati nelle schede fuori testo.

Lo studio statistico è stato eseguito per i campioni provenienti da ogni singola rosetta.

Per una rappresentazione più fedele della realtà, 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 per fenomeni di deviazio-

ne delle aste di perforazione si potrebbe verificare una compenetrazione inferiore a quella di progetto.

Le grandezze misurate di peso dell'unità di volume, resistenza a compressione, modulo di deformazione e RQD sono trattate come variabili casuali distribuite secondo una curva di densità di probabilità Gaussiana.

L'interpretazione della curva di probabilità dà indicazioni circa il valore medio del campione e la dispersione dei dati attorno ad esso, mentre la curva della probabilità cumulata suggerisce i valori progettuali delle grandezze in oggetto.

Nelle schede dell'appendice sono riportati i risultati delle prove eseguite.

4.3.4. 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".

Le metodologie applicate rivestono 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 di terreno consolidato.

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 prova e ha previsto l'impiego di metodologie e tecniche diverse. In particolare è stata utilizzata la metodologia sismica a rifrazione mediante l'acquisizione tomografica in 2D (tomografie sismiche) e 3D (rilievo sismico tridimensionale), acquisizione Cross-Hole e la metodologia sonica in foro.

Nella fig. 7 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 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

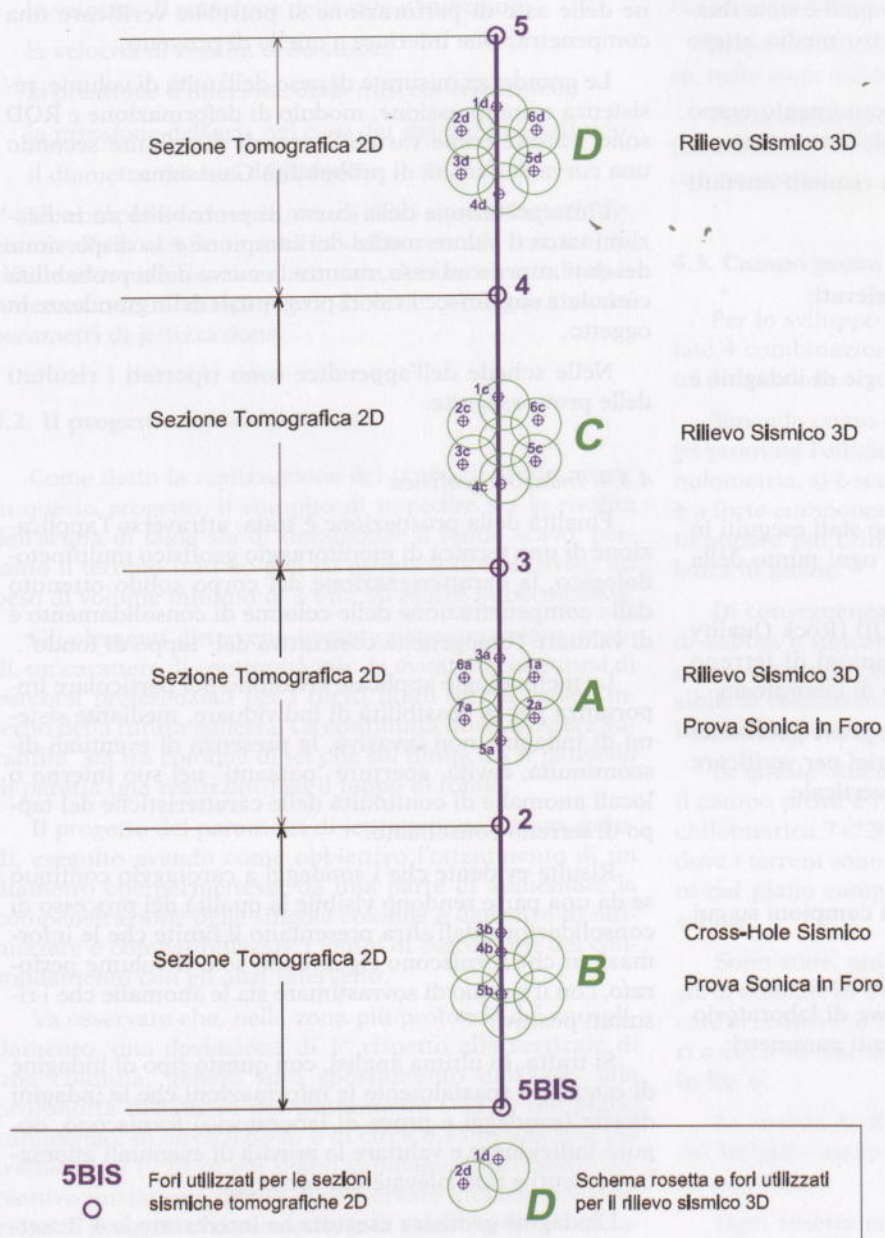


Fig. 7 - Schema planimetrico delle indagini geofisiche eseguite.

utilizzate, dopodichè saranno analizzati i risultati ottenuti e saranno confrontati con le indagini tradizionali.

4.3.4.1. Tomografia sismica

La tomografia sismica, già abbondantemente utilizzata per indagini di questo tipo, 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 va-

riazioni 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.

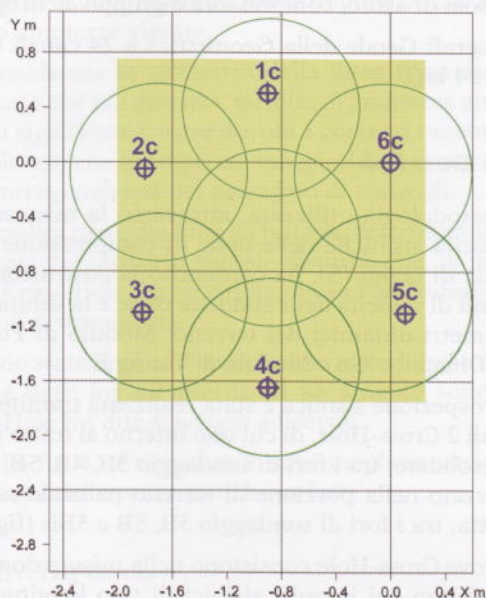
Per evitare errori connessi alla eventuale deviazione rispetto alla verticale, i fori utilizzati per la tomografia sono stati attrezzati con tubi inclinometrici e le letture sono state eseguite prima dell'inizio dell'indagine.

4.3.4.1.1. Indagine bidimensionale

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

Come accennato, la prospezione sismica realizzata ha previsto l'acquisizione delle sezioni tomografiche lungo la congiungente dei centri delle rosette costruite con la compenetrazione delle colonne jet-grouting secondo lo schema della fig. 4.

Per l'acquisizione di ogni sezione interessante le singole rosette è stata posizionata, in uno dei fori esterni alla rosetta stessa, una colonna con 24 sensori (idrofon) spaziate di 1 metro, mentre nel foro opposto sono stati



1c Fori utilizzati per l'indagine 3D onde P Area indagata dal modello tridimensionale Scala: 1:25

Fig. 8 - Schema planimetrico acquisizione.

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.

4.3.4.1.2. 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 elaborazione dati che è stato impiegato, dopo opportuni aggiustamenti derivanti dal confronto coi dati acquisiti, a verifica dell'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).

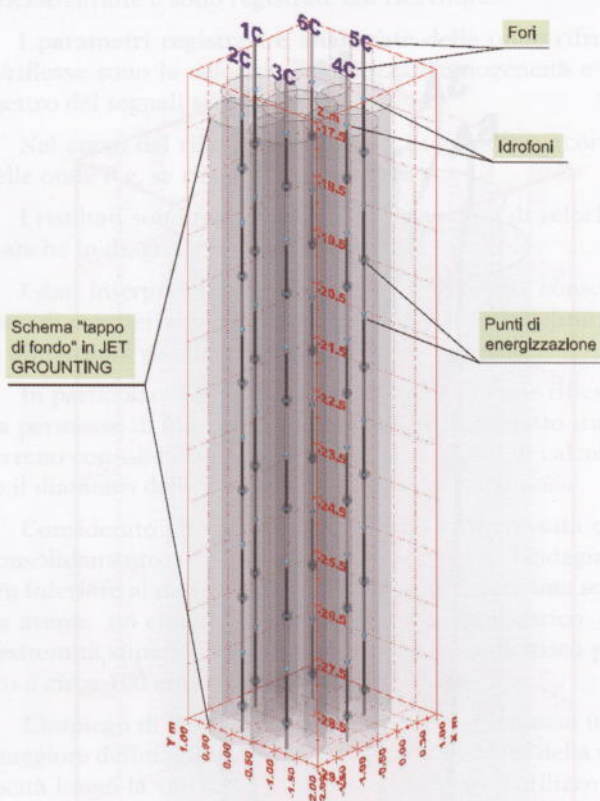


Fig. 9 - Schema volumetrico di acquisizione.

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 1m, secondo lo schema indicato nelle figg. 8 e 9.

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 l'acquisizione di una fitta rete di traiettorie sismiche attraversanti l'intero corpo oggetto d'indagine come si può vedere nella fig. 10.

In dettaglio l'attrezzatura utilizzata è stata:

- 4 catenarie di idrofoni con sensori spazati di 1 metro;
- 24 geofoni verticali con frequenza propria di 14 Hz;
- cannoncino da foro con geofono starter;
- cartucce senza pallettone;

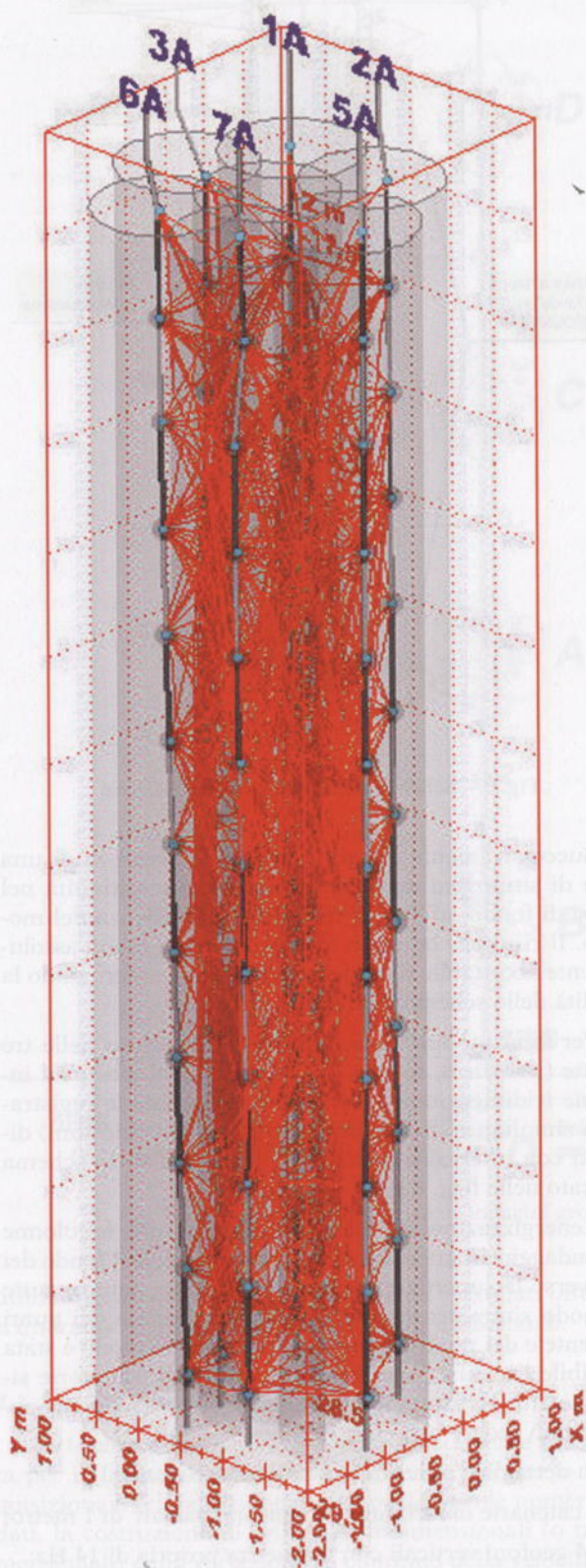


Fig. 10 - Schema dell'andamento delle traiettorie sismiche.

- bombola di azoto, compressore e gruppo elettrogeno;
- sismografi Geode della Geometrics a 24 canali (dinamica 24 bit).

4.3.4.1.3. 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 (fig. 4).

Le prove Cross-Hole consistono nella misurazione 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).

4.3.4.2. 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 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 nel Cross-Hole, ha reso difficoltosa l'individuazione dei tempi di propagazione.

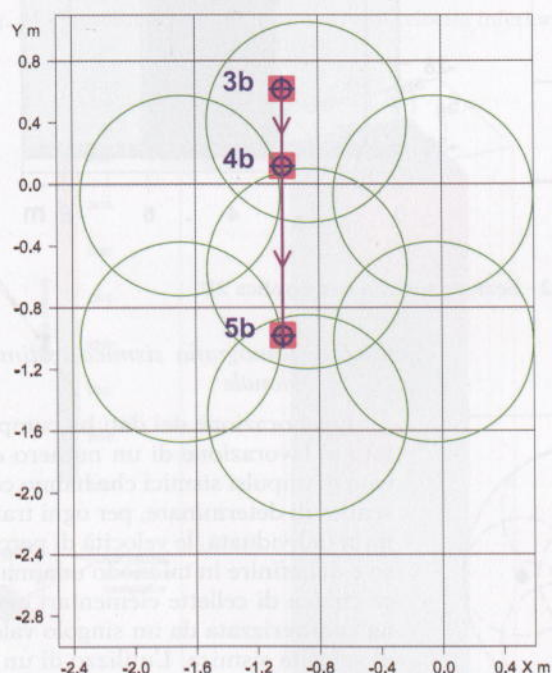
Sono state applicate due diverse metodologie di acquisizione dati: log all'interno di un singolo sondaggio e Cross-Hole fra due sondaggi adiacenti.

Nella fig. 11 è riportato lo schema planimetrico di acquisizione delle prove soniche in foro.

4.3.4.2.1. Log Sonici

La tecnica di indagine consiste nel rilevare la velocità e le modalità di propagazione delle onde elastiche nei materiali circostanti alla perforazione in cui è stata inserita una sonda cilindrica costituita da un emettitore d'impulsi e da uno o più ricevitori.

Le onde generate dall'emettitore si propagano nel terreno circostante e, in presenza di discontinuità, vengono



5bis

Fig. 11 - Schema planimetrico di acquisizione prove soniche.

riflesse/rifratte e sono registrate dal ricevitore.

I parametri registrati e analizzate delle onde rifratte/riflesse sono la velocità, l'ampiezza, l'omogeneità e lo spettro dei segnali sonici.

Nel corso del rilievo si misurano i tempi di percorso delle onde P e, se riconoscibili, delle S.

I risultati sono rappresentati in diagrammi di velocità o anche in diagrafie a densità variabile.

I dati interpretati, dopo opportuno filtraggio, consentono di caratterizzare i materiali investigati e di definirne le dimensioni geometriche.

In particolare l'analisi della velocità delle onde riflesse ha permesso di individuare la superficie di contatto tra il terreno consolidato e quello naturale, e quindi di calcolare il diametro della colonna di terreno consolidato.

Considerato che l'estensione dell'area interessata dal consolidamento, rispetto al foro utilizzato per l'indagine, era inferiore al metro, è stato deciso di utilizzare una sonda avente un emettitore sonico di tipo piezoelettrico all'estremità superiore e da un ricevitore piezoelettrico posto a circa 100 cm dal precedente.

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.

4.3.4.2.2. Cross-Hole Sonici

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.

4.3.5. Analisi dei risultati

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

4.3.5.1. Tomografia sismica bidimensionale

In fig. 12 è riportata la sezione tomografica di una delle 4 rosette indagate, dalla cui analisi si possono eseguire le seguenti considerazioni:

- l'immagine tomografica evidenzia chiaramente la netta distinzione tra il corpo solido costituito dalle colonne compenstrate 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 compenstrate sia sostanzialmente omogeneo e caratterizzato da alta compattazione (alta velocità sismica) ed evidenzia altresì come il filo dei bordi esterni sia anche superiore a quello atteso; in fig. 13 è riportato lo schema planimetrico con indicati i diametri minimi di progetto e quello verificato.

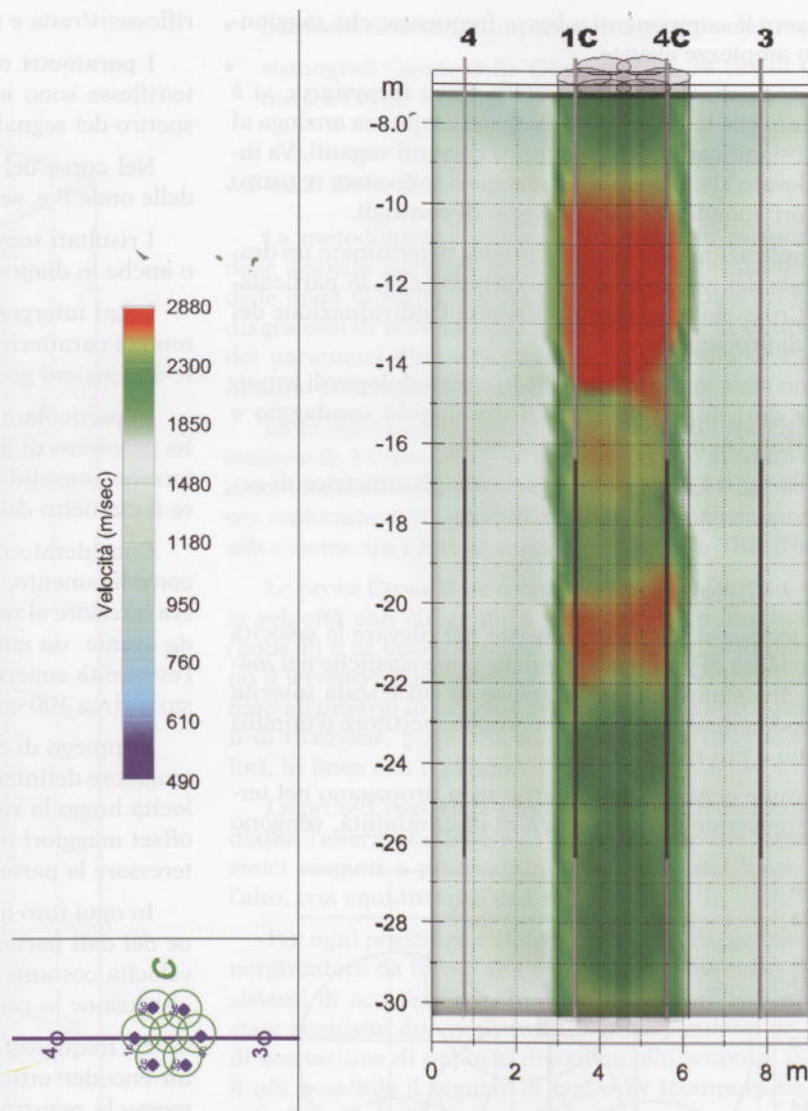


Fig. 12 - Sezione sismica tomografica 2D.

4.3.5.2. 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

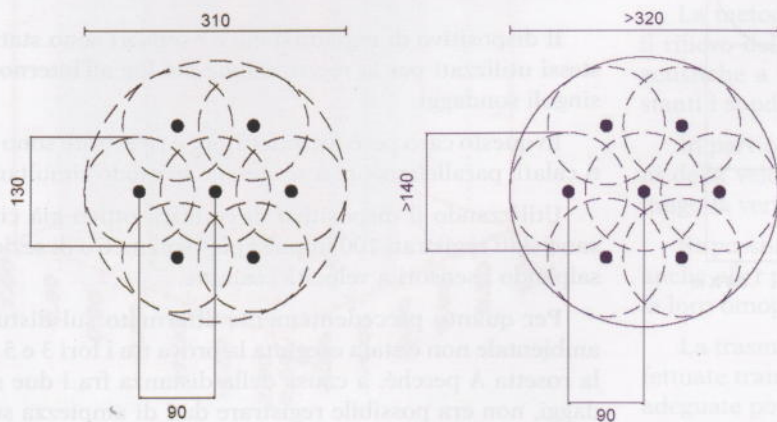


Fig. 13 - Schema planimetrico diametri minimi attesi (a sinistra) e verificato (a destra).

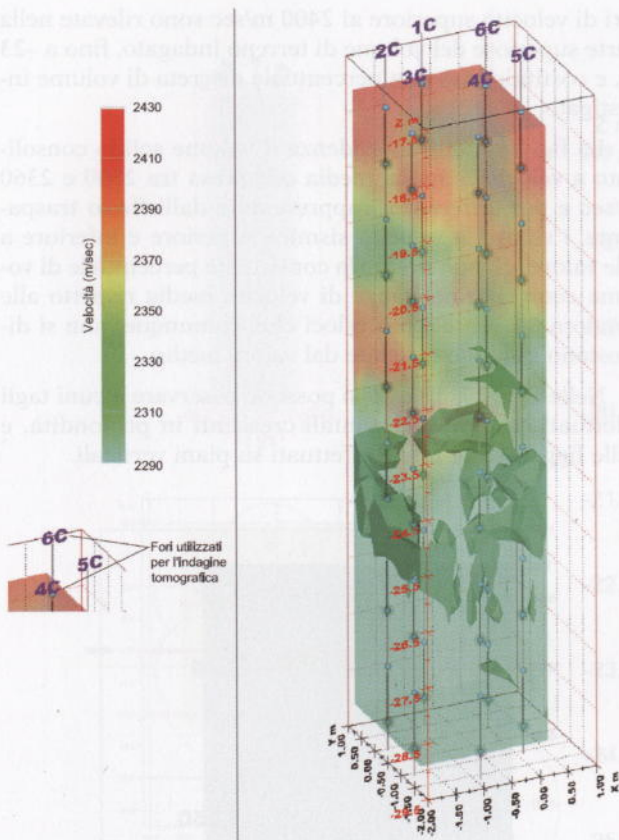


Fig. 14 - Isovolumi di terreno trattato con velocità inferiore a 2.300 m/sec.

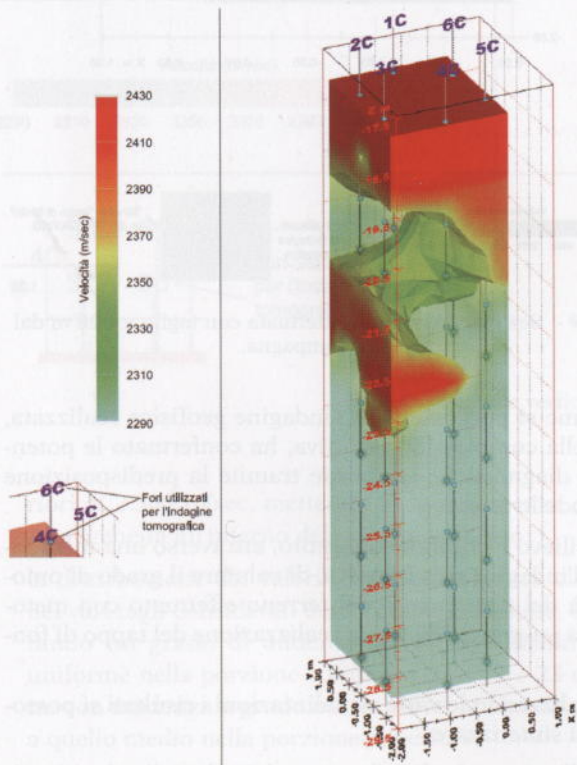


Fig. 15 - Isovolumi di terreno trattato con velocità maggiore di 2.360 m/sec.

velocità sismica ricavati dall'elaborazione tomografica 3D, sono stati elaborati mediante l'impiego di un 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 figg. 14, 15 e 16 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 fig. 14 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, espressa, 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 fig. 15 rappresenta una particolare elaborazione dei dati, con visualizzazione delle porzioni caratterizzate da

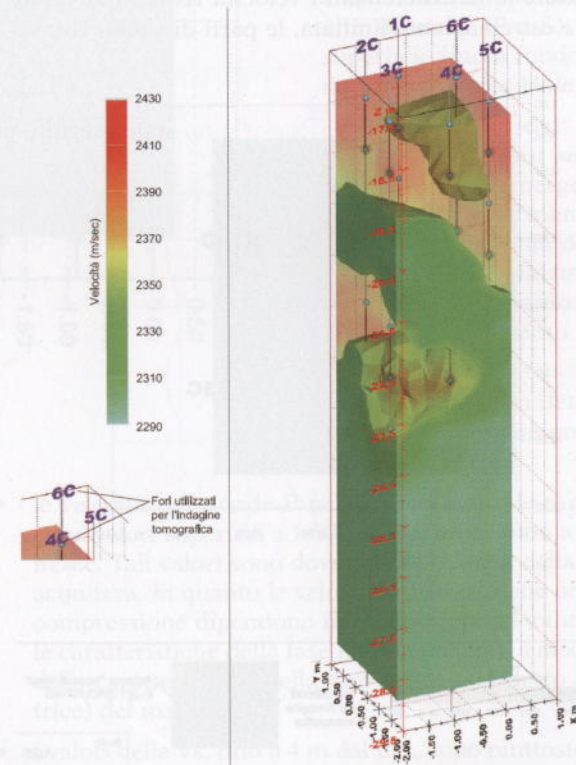


Fig. 16 - Isovolumi di terreno trattato con velocità comprese tra 2.300 e 2.360 m/sec.

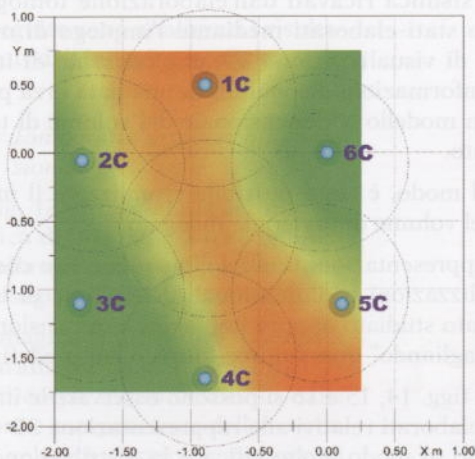


Fig. 17 - Sezione orizzontale effettuata con taglio a - 20 m dal piano campagna.

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 va-

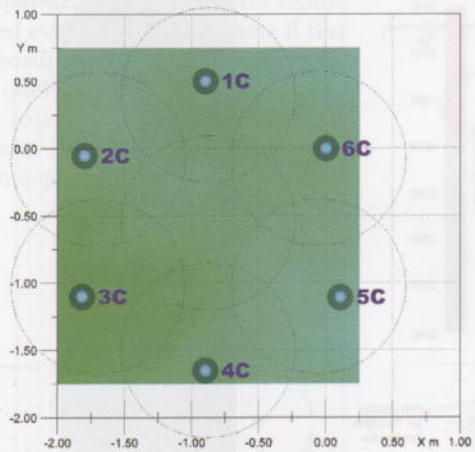


Fig. 18 - Sezione orizzontale effettuata con taglio a - 24,5 m dal piano campagna.

lori 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 fig. 16 mette in evidenza il volume solido consolidato a velocità sismica media compresa tra 2300 e 2360 m/sec e 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 figg. 17, 18 e 19 si possono osservare alcuni tagli effettuati su piani orizzontali crescenti in profondità, e nelle figg. 20 e 21 quelli effettuati su piani verticali.

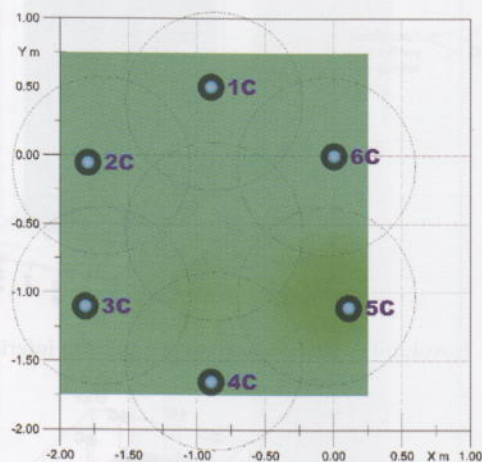


Fig. 19 - Sezione orizzontale effettuata con taglio a - 28 m dal piano campagna.

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 supe-

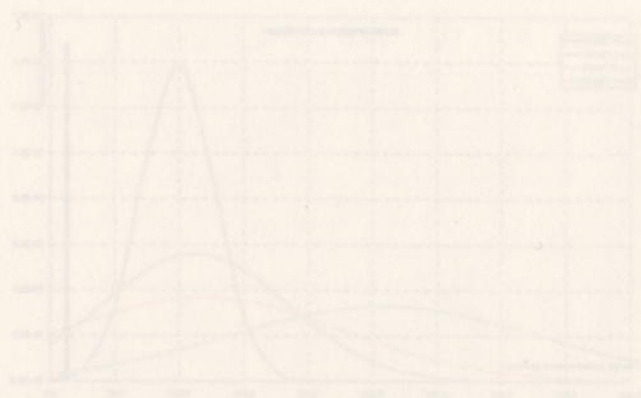


Fig. B - Densità di probabilità della resistenza a compressione



Fig. C - Curve della probabilità cumulata della resistenza a compressione

Scheda di RQD (Rock Quality Designation)

La qualità del trattamento di fertirrigazione e la sua omogeneità sono correlabili anche al parametro R.Q.D., il quale fornisce il recupero percentuale di carotaggio per metro.

In tutte le roccie del campo prova si hanno valori medi di R.Q.D. superiori all'87%, con scarti medi inferiori al 1%.

Nelle roccie A, C e D in particolare si osserva la buona qualità del trattamento in termini di "omogeneità" della coltura, che presenta un R.Q.D. medio del 90%. Si di-

scosta leggermente nella roccia B, come si può osservare nella tabella di fig. A.

roccia	valore medio	dev. std.
A	87,1	0,8
B	87,2	0,8
C	90,2	0,7
D	90,1	0,8

Fig. A - Tabella di sintesi delle caratteristiche di RQD

Nelle figg. B e C sono riportate rispettivamente la curva della densità di probabilità e quella della probabilità cumulata.

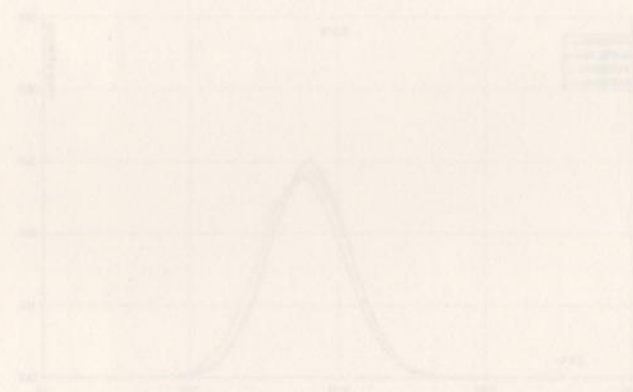


Fig. B - Densità di probabilità di RQD

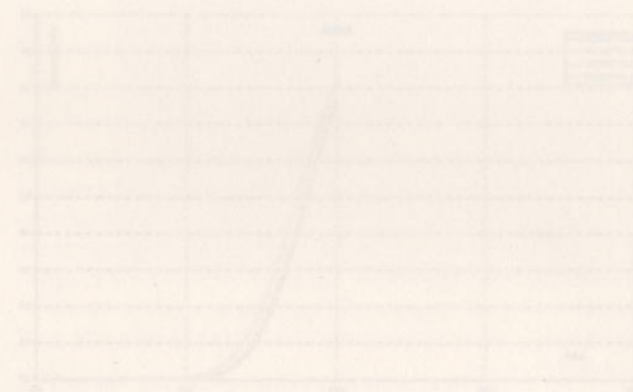


Fig. C - Curve della probabilità cumulata di RQD

Estratto dalla Rivista: «Ingegneria Ferroviaria» - n. 10 - Ottobre 2008
 Dott. Ing. Renato CASALE, direttore responsabile
Registrazione del Trib. di Roma 16 marzo 1951, n. 2035 del Reg. della Stampa
Edizioni CIFI - Via Giolitti, 48 - 00185 Roma
 Stampa Stab. Tipolit. Ugo Quintily S.p.A. - Roma - Viale Enrico Ortolani, 149/151
 Finito di stampare nel mese di Febbraio 2009