



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

Parte II

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

5. Esecuzione del tappo di fondo e sistema di posizionamento con gps

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

Le macchine utilizzate in produzione hanno raggiunto un numero di 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 e 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 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.

La soluzione per il posizionamento sviluppata è il sistema *Easy Drill Guide*, che guida l'operatore direttamente sul punto di perforazione con precisione centimetrica, 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.

Nel caso in esame il sistema *Easy Drill Guide* si somma a quello tradizionale di picchettamento a terra senza il bisogno della verifica quotidiana necessaria, per correggere la quota di inizio e fine perforazione.

La sedimentazione dello spurgo infatti determina generalmente un aumento della quota del piano di lavoro, portando a quote di trattamento diverse da quelle di progetto (fig. 26).

Per mantenere l'altezza minima di progetto si sarebbe dovuto, 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.

In realtà dove si hanno movimenti sia verticali che orizzontali del piano campagna per fenomeni di claquage dovuti ad assenza di reflu per chiusura dei fori di spurgo il sistema di posizionamento con GPS può sostituire totalmente il picchettaggio a terra, che, altrimenti dovrebbe



Fig. 26 - Vista dello spurgo e della conseguente sedimentazione.

^(*) Italferr S.p.A.



Fig. 27

essere fatto di volta in volta per ogni singola colonna, con notevole aggravio dei tempi e risorse umane.

I componenti del sistema *Easy Drill Guide* 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, fig. 27, 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 (figg. 28, 29 e 30).

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 "Layer - Livelli":

- 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 visualizzare sul pannello di guida della macchina operatrice la situazione aggiornata delle perforazioni eseguite e quelle ancora da effettuare.

Nella fig. 31 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'ope-



Fig. 28.



Fig. 29.

ratore deve confermare l'inizio della lavorazione.

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 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.

L'esperienza acquisita e la conoscenza delle criticità ha portato a continuare la sperimentazione di nuove tecnologie che permettessero da una parte di ridurre al minimo le anomalie e dall'altra di ridurre ulteriormente i tempi per le operazioni preliminari, così come è avvenuto per le operazioni di posizionamento con l'implementazione del sistema *Easy Drill Guide*.

L'evoluzione del sistema, oramai perfettamente funzionante dopo un periodo di sperimentazione in cantiere,



Fig. 30.

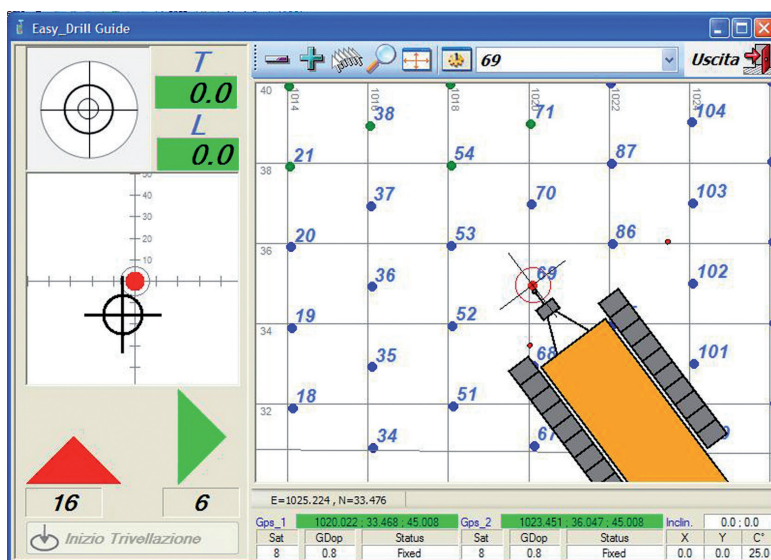


Fig. 31 - Funzioni visualizzate nel display.

prevede il colloquio tra il sistema di posizionamento *Easy Drill Guide* ed il sistema di acquisizione dati di iniezione in automatico. Tale sperimentazione prevede che, una volta posizionata correttamente la macchina sul punto da trattare, nel momento in cui l'operatore preme il tasto di inizio trivellazione (attivatosi, come detto precedentemente, solo dopo un periodo di tempo in cui tutti i valori di posizionamento e inclinazione rimangono all'interno del range preimpostato), il sistema *Easy Drill Guide* comunica a quello di acquisizione dati di perforazione e iniezione le seguenti informazioni:

- identificativo della colonna;
- coordinate della colonna (longitudine e latitudine);
- inclinazione del must (longitudinale e trasversale);
- profondità di fine trivellazione e di fine trattamento rispetto al piano campagna.

L'obiettivo è quello di eliminare gli eventuali errori dovuti a errata digitazione o lettura da parte degli operatori.



Fig. 32 - Dettaglio schermata sistema di registrazione dati di perforazione e iniezione.

Alla fine del trattamento, il sistema di registrazione dati comunica al sistema *Easy Drill Guide* le profondità effettive di fine trivellazione e di fine trattamento.

Il sistema *Easy Drill Guide* registra quindi i dati reali di fine trattamento, trasformando le profondità registrate in quote assolute ed evidenziando eventuali anomalie.

6. Controllo e monitoraggio del trattamento

Il controllo è fondamentale per la buona riuscita di qualsiasi tipologia di opera, tanto più per un consolidamento del terreno che, per sua intrinseca natura, è impossibile da controllare con il solo ausilio dei nostri sensi. Come detto il tappo di fondo in jet-grouting, che caratterizza quest'opera, si trova in alcune sue parti a oltre 30 m di profondità rispetto al piano campagna.

La tipologia di controlli effettuati può essere raggrupata in tre famiglie che sono distinte tra loro da un carattere puramente temporale:

- **Controlli pre-trattamento:** prima dell'inizio delle lavorazioni è stato eseguito il controllo delle attrezzature utilizzate con la verifica dei certificati di conformità delle sonde, degli impianti di miscelazione e di pompaggio, dei certificati di taratura della strumentazione di controllo come i manometri e le bilance. E' stata inoltre verificata la presenza e la funzionalità del sistema di registrazione dei parametri di iniezione, nonché quello di posizionamento GPS.
- **Controlli durante il trattamento:** principalmente si tratta di controllare, in fase di iniezione, il mantenimento dei parametri previsti da progetto esecutivo cioè della pressione di iniezione della miscela cementizia, della pressione dell'aria (trattandosi di sistema bifluide), della velocità di rotazione del monitor, della portata della miscela cementizia, nonché di controllare il tempo di stazionamento e il passo di risalita;
- **Controlli post-trattamento:** il primo passo è il controllo dei tabulati del GPS che forniscono, in automatico, le eventuali variazioni di posizionamento, rispetto agli assi est-ovest e nord-sud, che, come detto, vengono registrate, evidenziando quando queste sono maggiori di 3 cm. Il sistema fornisce, inoltre, le variazioni di inclinazione della torre, come percentuale rispetto alla verticale, e la durata temporale da inizio perforazione fino a fine trattamento. Sono poi analizzate le schede di registrazione dei parametri di iniezione per verificare l'assenza di anomalie durante la fase di jettizzazione.

Oltre a queste analisi dei documenti "cartacei", il tappo di fondo viene monitorato attraverso specifici e rigorosi controlli per la verifica del raggiungimento degli obiettivi progettuali, sviluppati sulla base delle esperienze maturate nel campo prova. Nel caso specifico il monitoraggio ha una sua evoluzione, che procede con l'avanzare del cantiere e accresce le esperienze che via via si acquisiscono.

Le tecniche utilizzate per il monitoraggio sono rappresentate da:

- indagini dirette: sondaggi a carotaggio continuo;
- indagini indirette: tomografia sismica bi e tridimensionale;
- prove di laboratorio.

6.1. Sondaggi a carotaggio continuo

Il metodo tradizionale per la verifica della qualità del getto è l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo. Esso, però, fornisce informazioni puntiformi, permettendo il massimo grado di approfondimento delle caratteristiche del terreno indagato, non fornendo però alcun valore aggiunto sull'area presente nell'intorno dello stesso e ancor meno infor-

mazioni sulla presenza di anomalie diffuse. Inoltre l'attrezzaggio con tubi inclinometrici ha permesso di verificare come la deviazione rispetto alla verticale dei fori sia spesso significativa, anche superiore al metro, lasciando quindi l'incertezza sulla vera colonna indagata. Al fine di ottenere il miglior risultato possibile, si è deciso di effettuare carotaggi con carotieri aventi diametro di 131 mm, che forniscono un risultato di qualità più elevata rispetto a quelli normalmente utilizzati con diametro di 101 mm.

Nella fig. 33 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 di compenetrazione di due colonne, mentre nella fig. 34 è riportata la foto della cassetta dei campioni prelevati alla stessa quota con carotiere da 101 mm nella parte centrale di una delle due colonne.



Fig. 33 - Campioni prelevati con carotiere T6S con diametro da 131 mm.



Fig. 34 - Campioni prelevati con carotiere T6S con diametro da 101 mm.

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

Infine, per ridurre al minimo i disturbi durante la perforazione, il carotiere utilizzato è stato, come detto, prevalentemente il T6S, che si differenzia dal T6 per la diversa modalità di scarico dell'acqua di circolazione per il raffreddamento e il trasporto dei residui di perforazione.

Nel T6, infatti, l'acqua esce all'interno della corona, e, in presenza di terreno consolidato con granulometria fine,

lo scarico può essere in parte o totalmente bloccato, generando una sovrappressione all'interno del carotiere stesso che impedisce la corretta risalita della corona. Nel T6S lo scarico dell'acqua avviene direttamente sulla corona, senza entrare mai in contatto con la carota di terreno consolidato, annullando qualunque rischio di disturbo al campione stesso. L'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo ha permesso di prelevare campioni di terreno per la verifica delle caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno trattato, nonché dell'impermeabilità dell'ammasso per mezzo di prove di permeabilità Leugeon.

6.2. 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.

I risultati ottenuti sono simili a quelli ottenuti sui campioni del campo prova e i valori ottenuti superano i valori di progetto richiesti.



Fig. 35 - Carotiere T6S.

6.3. Indagine geofisica tridimensionale

Per la verifica della qualità del trattamento è stata sviluppata, inizialmente, 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 e in questo modo poteva essere verificato un volume di terreno consolidato costituito da 19 colonne, avendo modo di valutare la omogeneità del trattamento anche nelle zone di compenetrazione.

Nell'evolversi dell'esperienza si è deciso di "allargare" il volume monitorato, eseguendo i carotaggi nelle zone di compenetrazione della fila di colonne più esterna rispetto a quella precedente passando così ad un volume indagato pari a circa 50 colonne (fig. 36).

Prima di sperimentare tale soluzione è stato sviluppato il modello teorico fissando le dimensioni di un'eventuale anomalia minima da indagare ed è stato verificato se la potenza delle energizzazioni sarebbe stata sufficiente ad attraversare tutti gli strati e ad essere ricevuta con buona qualità dagli idrofoni.

Una volta ottenuta la fattibilità teorica di tale geometria sono state eseguite 2 "rosette" concentriche, verificando la perfetta concordanza dei risultati registrati nelle zone di sovrapposizione.

L'indagine tridimensionale che è stata eseguita con la stessa tecnica precedentemente illustrata ha generato un analogo modello solido del terreno trattato avente dimensioni molto maggiori.

Per verificare la qualità del trattamento eseguito il modello solido di terreno trattato è stato "tagliato" lungo piani orizzontali (fig. 37) e verticali (fig. 38); sono state "estratte" immagini tridimensionali di porzioni significative di dati (fig. 39), in cui siano evidenziati volumi con uguale velocità (isovolumi). Confrontando i risultati di indagini dirette e attribuendo le velocità caratterizzanti le

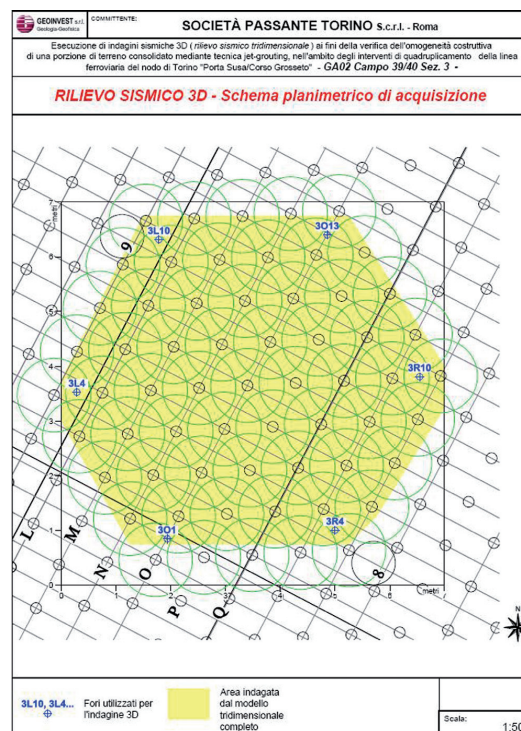


Fig. 36 - Planimetria delle indagini.

varie litologie incontrate, è stato possibile valutare le eventuali anomalie e verificare la loro influenza con il progetto di consolidamento.

Nella figure precedenti si può osservare la continuità di terreno non trattato, tra l'inizio e la fine del tappo di fondo, è facile intuire quale sarebbe stato l'impatto sulle

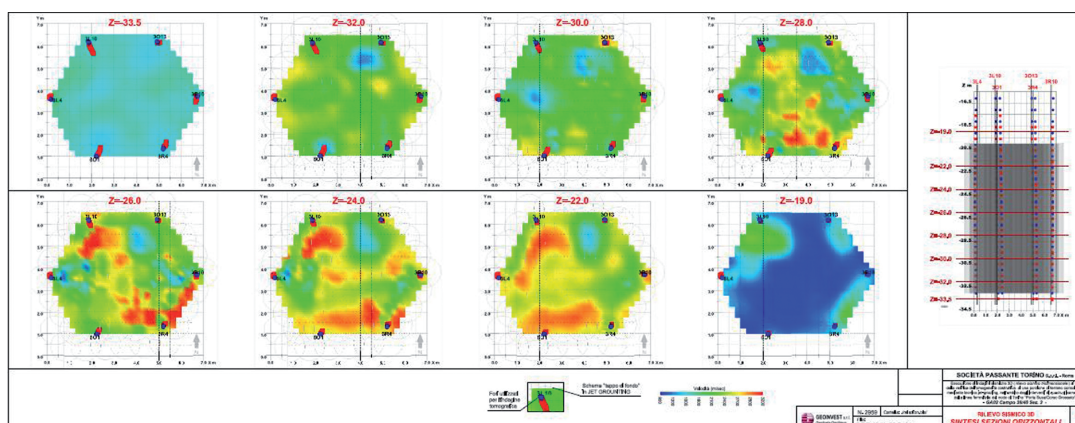


Fig. 37 - Sezioni orizzontali.

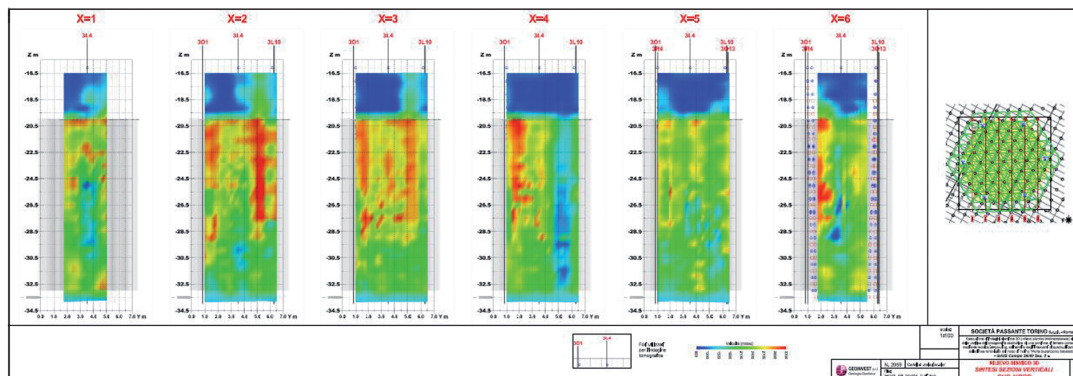


Fig. 38 - Sezioni verticali.

lavorazioni per la risalita di acqua durante le fasi di scavo della galleria artificiale se l'anomalia non fosse stata corretta.

Questa metodologia di indagine è, senza dubbio, attualmente la più precisa e minuziosa; essa è tale da evidenziare anche piccole discontinuità in un ammasso, secondo lo schema ottenuto, composte da una cinquantina di colonne compenetranti.

Il presentarsi, tuttavia, di anomalie, come quella delle figure precedenti e nei carotaggi eseguiti per la verifica delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso, ha portato a sviluppare metodologie di indagine bidimensionale, che forniscono un minore dettaglio ma permettono di indagare un numero maggiore di colonne eseguite.

6.4. Indagini geofisiche bidimensionali

Sulla base della profondità del tappo di fondo dal piano campagna si è puntato, per indagini più estese, a due tipologie di monitoraggio: l'indagine geofisica bidimensionale con stendimenti superficiali e idrofoni in foro (detti brevemente "Rettangoli") e quella con stendimenti superficiali affiancati.

I profili tomografici affiancati vengono realizzati disponendo catenarie di geofoni affiancate tra loro ad una distanza massima di 4 ÷ 5 m. Attraverso la registrazione dei tempi di arrivo delle onde sismiche longitudinali (onde P), emesse da una fonte di energia, si correla alla stessa la densità del materiale che le onde percorrono e si discriminano, visualizzandole in bidimensionale, le porzioni di terreno non trattato da quello jettinettato e le eventuali discontinuità presenti.

Il caso studio qui riportato riguarda una discontinuità presente nel campo 7. In tale area sono stati eseguiti 3 stendimenti così come riportati nella planimetria della fig. 40.

Analizzando i risultati riportati nella fig. 41 si può osservare nell'allineamento centrale una anomalia in corrispondenza dei geofoni 14 - 16.

L'assenza di trattamento, a cui sembrava ricondursi tale anomalia (evidenziata con il retino nella fig. 41), è stata verificata con 2 sondaggi a carotaggio continuo che hanno confermato l'ipotesi formulata.

L'azione correttiva è consistita nel rifacimento delle colonne che erano risultate "anomale".

I risultati dell'indagine eseguita successivamente evidenziano la bontà dell'azione correttiva (fig. 42) intrapresa e la continuità ritrovata di trattamento nel terreno indagato.

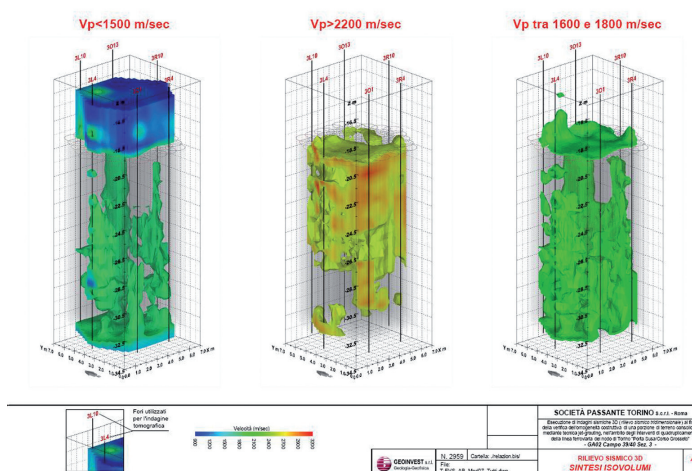
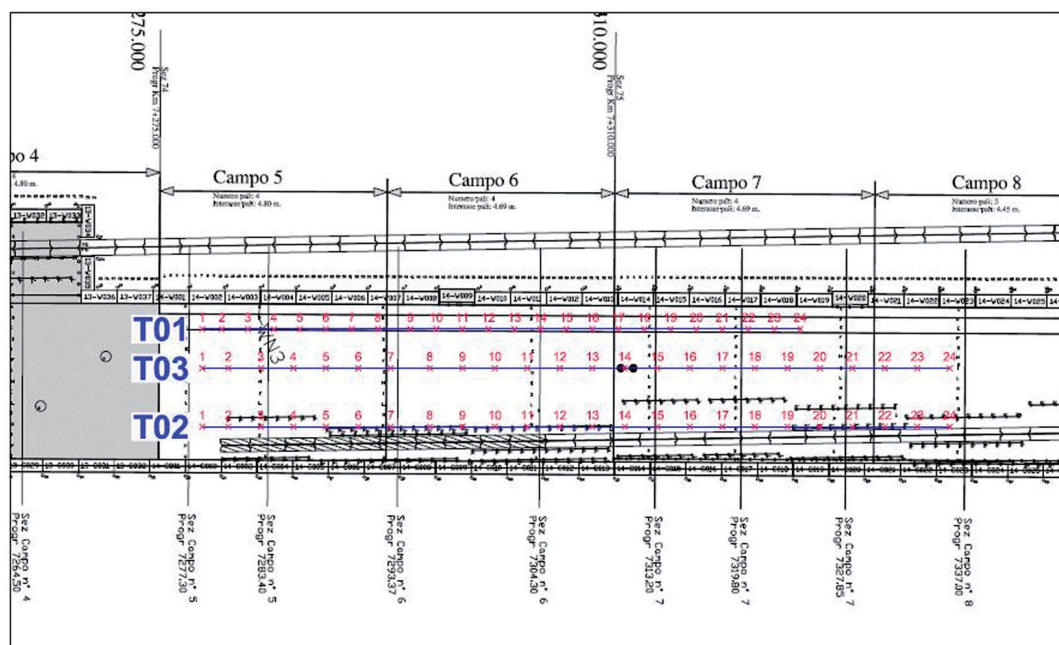


Fig. 39 - Isovolumi.



TORINO CAMPO 5-6-7 TOMOGRAFIA SISMICA - PLANIMETRIA DI RIFERIMENTO - scala 1:300

Fig. 40 - Planimetria indagine campo 7.

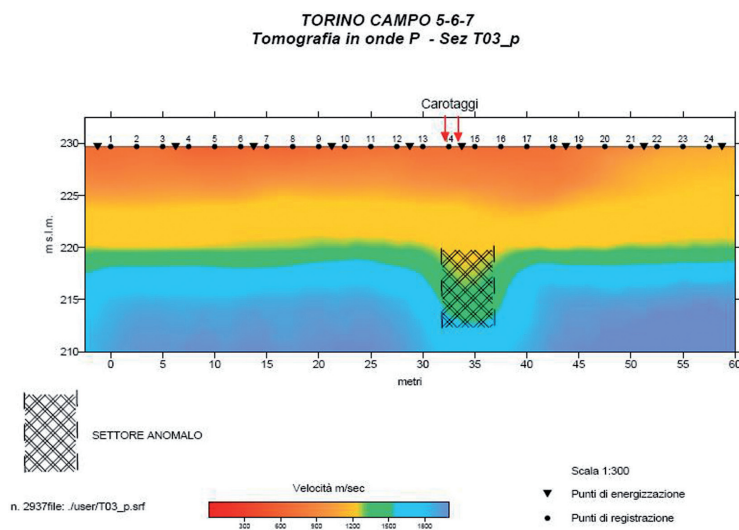


Fig. 41 - Profilo centrale indagine campo 7.

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

L'acquisizione di ogni sezione prevede il posizionamento in un foro di una catenaria di idrofoni spazati a 1m, mentre nel foro opposto vengono creati impulsi sismici procedendo da fondo foro a superficie ad intervalli regolari di 1 m; contemporaneamente vengono anche registrati gli arrivi relativi ad una serie di geofoni allstiti sulla superficie lungo la congiungente dei sondaggi citati. La procedura di acquisizione è ripetuta invertendo la posizione dei sensori e dei punti di energizzazione.

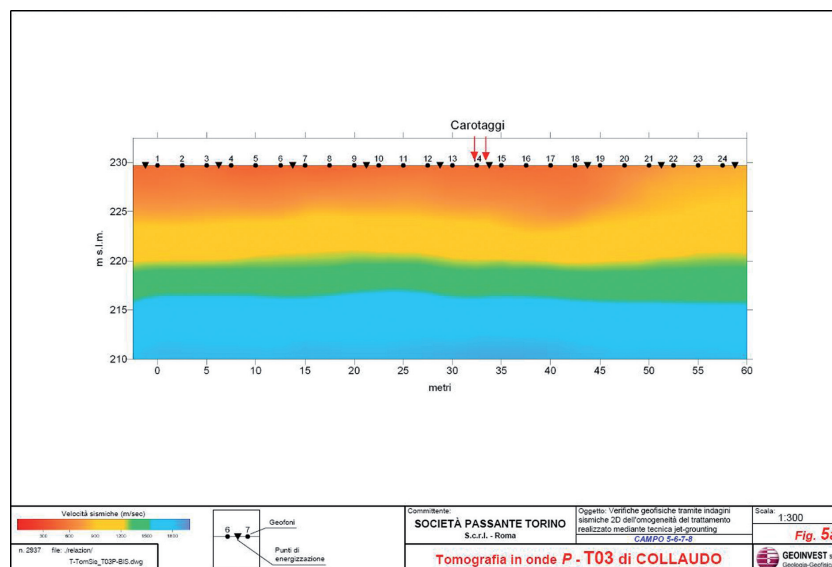


Fig. 42 - Profilo centrale ripetuto dopo il rifacimento delle colonne.

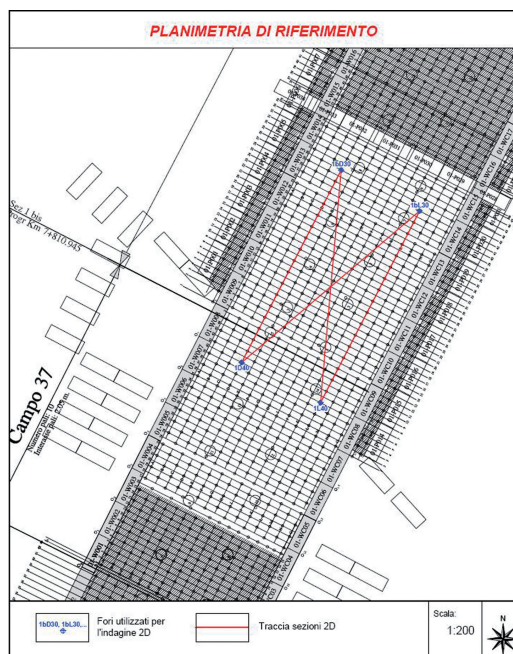


Fig. 43 - Planimetria e schema indagine 1 tratto sottoattraversamento del Fiume Dora.

Tale tecnica di indagine, con l'ausilio di stendimenti superficiali è stata utilizzata nella GA01, cioè nel primo tratto del sottoattraversamento del fiume Dora. In questo particolarissimo tratto dell'appalto è stato fondamentale controllare che non vi fossero anomalie di grossa entità nel tappo di fondo.

In fig. 43 è riportata la planimetria con lo schema di indagine.

L'analisi ha dimostrato che vi erano alcune zone anomale, (figg. 44 e 45) nel terreno trattato, aventi velocità (e dunque densità) minori.

La particolare velocità di organizzazione e di analisi del sistema, associata all'esperienza maturata, ha permesso di ricollocare, immediatamente dopo l'acquisizione dei risultati, una sonda nelle zone "incerte" al fine di provvedere al rifacimento delle colonne anomale.

La bontà dell'intervento di correzione delle anomalie è testimoniato dal fatto che ad oggi è stato realizzato il sottotono superiore della futura galleria ferroviaria, andando a scavare sotto il letto del fiume (dunque in piena falda) senza che si verificasse alcuna infiltrazione di acqua dal fondo scavo, così come dalle pareti laterali (fig. 46).

Queste metodologie di analisi sono utilizzate in maniera diffusa su tutto l'intervento e, analizzando cautelativamente il numero di colonne studiate con un'indagine di questo tipo, si può affermare che esso interessa, in maniera cautelativa circa l'82% delle colonne.

Nella fig. 47, che mostra lo scavo della galleria artificiale nei pressi della Dora, la modesta quantità di acqua presente è quella che viene dai terreni al fronte, saturi, non essendo state eseguite specifiche operazioni di drenaggio e, in parte, dai giunti dei pannelli dei diaframmi.

7. 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.

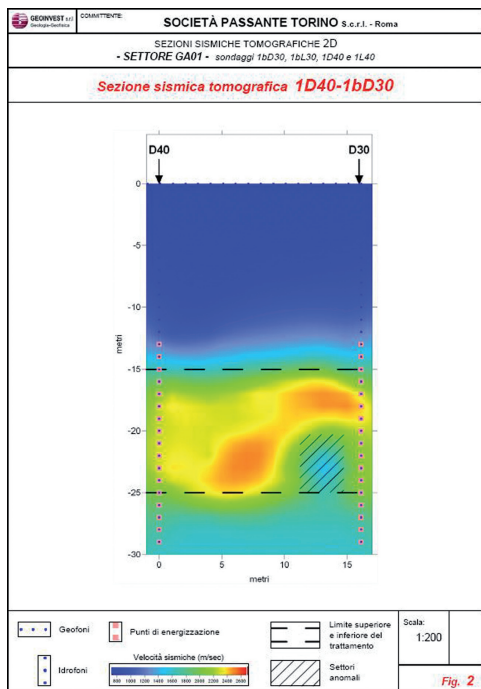


Fig. 44 - Sezione tomografica in cui è evidenziata l'anomalia.

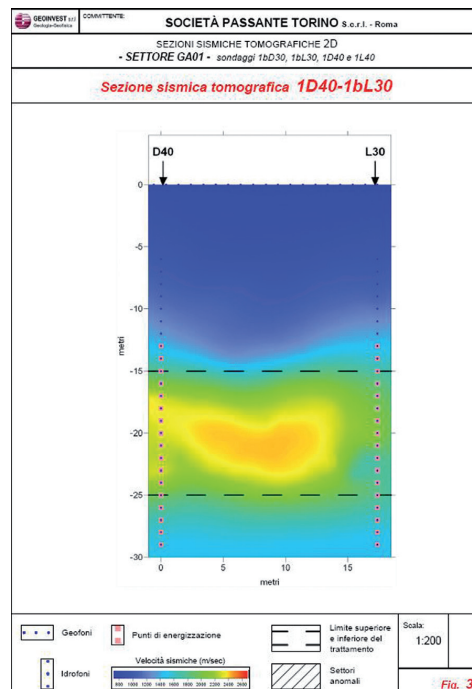


Fig. 45 - Sezione senza anomalia.

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 assunti in fase di progettazione esecutiva, c'è

piena conferma dei valori 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 grado di approssimazione, pur in presenza di anomalie, la funzionalità dell'intervento e la sicurezza nelle successive fasi lavorative.



Fig. 46 - Scavo per costruzione soletto di sottopassaggio del fiume Dora.



Fig. 47 - Scavo galleria artificiale.