

SISTEMI INNOVATIVI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO PER GALLERIE IN ARGILLA: il caso della galleria Cavallo, Autostrada A14 Adriatica tratta Ancona Nord - Senigallia

G. Lunardi⁽¹⁾, F. Carriero⁽¹⁾, A. Magliocchetti⁽¹⁾, D. Vanni⁽²⁾

⁽¹⁾Rocksoil SpA

⁽²⁾Trevi SpA

ABSTRACT: La galleria Cavallo fa parte del lotto 4 dei lavori di creazione della terza corsia dell'Autostrada A14, nell'ambito dei quali è prevista la realizzazione di un terzo fornace ex novo e l'allargamento di uno dei due esistenti. La formazione interessata dallo scavo è costituita da argille pleistoceniche e da una coltre di alterazione superficiale. Nel presente articolo si illustrano le principali problematiche affrontate per la progettazione costruttiva dove alla necessità di garantire la stabilità degli scavi si è aggiunta l'esigenza di ridurre al minimo i risentimenti superficiali sulle preesistenze. In particolare, verranno descritte le scelte progettuali e tecnologiche che hanno consentito di proporre una variante ex art. 11 realizzando la galleria con tempi e costi inferiori alle previsioni del progetto esecutivo eliminando in particolare i consolidamenti da piano campagna in corrispondenza dei fabbricati, il cui sottopasso è potuto avvenire in assenza di danni rilevabili. Il progetto di variante si è avvalso dell'esperienza della Rocksoil S.p.A. e della innovativa tecnologia della rotazione realizzata con monitor ad alta efficienza ETJ, sistema brevettato dalla Trevi SpA che ha consentito la realizzazione in argille compatte di colonne in jet grouting di elevato diametro e resistenza, senza la creazione di sovrappressioni pericolose per i fabbricati sovrastanti.

1 Introduzione

Nell'ambito delle attività da svolgere legate al IV atto aggiuntivo alla concessione per l'esercizio di tratte autostradali tra Autostrade per l'Italia S.p.A. ed ANAS, è previsto l'ammodernamento e l'ampliamento alla terza corsia dell'Autostrada A14 Bologna – Bari – Taranto, comunemente denominata “Adriatica”, nel tratto compreso tra gli svincoli di Rimini Nord e Porto S. Elpidio. All'interno del più esteso intervento di ampliamento ed ammodernamento dell'autostrada A14 sopra richiamato, si inserisce il progetto esecutivo di ampliamento alla 3° corsia della tratta Senigallia – Ancona Nord (**LOTTO 4**), dalla progr. km 194+800 alla progr. km 213+740 (progressiva riferita all'asse carreggiata sud), per una lunghezza complessiva di 18,940 km circa. In particolare l'intervento ha inizio in corrispondenza del rettilineo posto all'altezza dello svincolo esistente di Senigallia e termina in posizione immediatamente successiva (procedendo in direzione sud) allo svincolo esistente di Ancona Nord.

L'intervento è costituito da un ampliamento da due a tre corsie più emergenza della A14 tra gli svincoli di Senigallia ed Ancona nord che prevede:

- L'ampliamento di 4 viadotti per una lunghezza di 820 m;
- La galleria naturale Cavallo: realizzazione nuova canna sud in variante (510 ml.) e l'ampliamento dell'attuale canna sud (523 m.) da utilizzare in direzione nord;
- l'ampliamento di 92 opere d'arte minori (tombini, sottovia, ponticelli,...);
- la demolizione di n.9 cavalcavia e ricostruzione di n.8;
- l'installazione di 14 km di barriere fonoassorbenti;
- la realizzazione del Nuovo Svincolo di Marina di Montemarciano che sarà realizzato fra quello di Senigallia e quello di Ancona Nord e consentirà una migliore accessibilità alla zona di Marina di Montemarciano e Falconara evitando così la congestione sulla S.S.16.

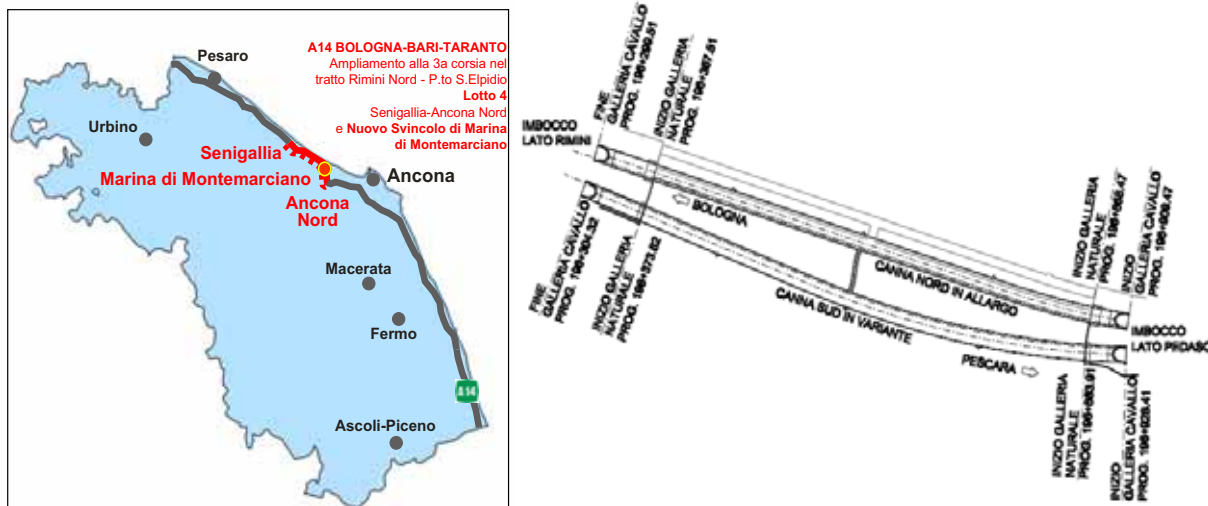


Figure 1 – Ubicazione intervento (Lotto 4) e planimetria opere

2 La galleria Cavallo – caratteristiche generali e fasi esecutive

La nuova galleria Cavallo si estende in carreggiata nord dalla p.k. 196 + 299,51 alla p.k. 196 + 909,47 ed in carreggiata sud dalla p.k. 196 + 304,32 alla p.k. 196 + 928,41. In particolare la carreggiata sud è in galleria naturale per un tratto di circa 510m. L'intervento prevede la realizzazione di un nuovo fornice, in carreggiata sud e l'allargamento dell'attuale galleria che verrà destinata, una volta allargata, al traffico in direzione nord. Il rimanente fornice esistente, che si trova lato mare, non verrà allargato, verrà dismesso da Autostrade per l'Italia e trasferito alle amministrazioni locali per il suo utilizzo nell'ambito della circonvallazione di Senigallia. La figura seguente illustra sinteticamente le fasi esecutive dell'opera.

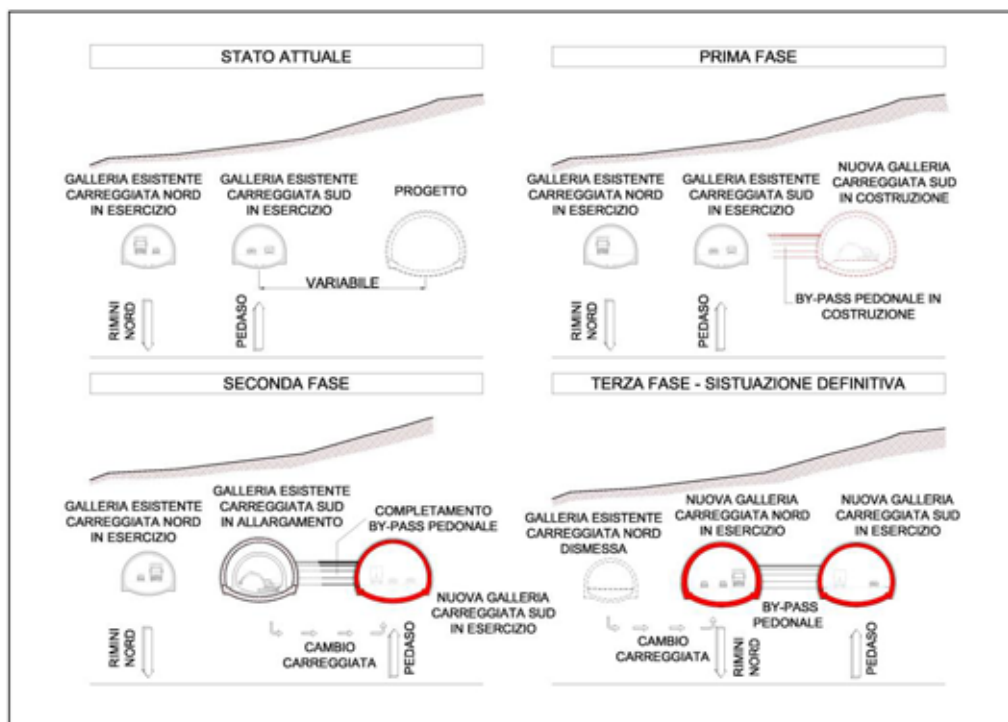


Figura 2 – Fasi realizzative gallerie Cavallo sud e nord

Il progetto prevede l'impiego di una sezione composta da n.3 corsie aventi larghezza pari a 3.75m (due corsie di marcia ed una di sorpasso), dalla banchina in destra e sinistra di 0,70 metri, e da marciapiedi, su ambo i lati, di larghezza minima di 0.90 m. Ne deriva la necessità di realizzare la galleria con diametro di scavo pari a circa 18 m e sezione massima di circa 218 m².

3 Inquadramento geologico - geotecnico

L'area risulta caratterizzata dalla presenza di litologie prevalentemente argilloso-limose appartenenti a Depositi di Avanfossa adriatica. Lungo i fianchi dei rilievi collinari sono presenti abbondanti depositi colluviali appartenenti a successioni quaternarie costituiti da materiale argilloso-limoso-sabbioso.

Le gallerie naturali interessano interamente le argille; unicamente in corrispondenza dell'imbocco lato Rimini della Canna Sud i primi campi di scavo attraversano anche i depositi eluvio-colluviali.

Le indagini ed i rilievi condotti mostrano nell'area della galleria la seguente successione stratigrafica:

- strato superficiale di riporto (ec), sino a 4÷5 m di profondità argilla marrone, limosa, talvolta con livelli sabbiosi centimetrici, da 4÷5 m a 14÷15 m di profondità;
- argilla (ap) di colore grigio azzurrognolo, molto consistente con intercalazione di sottili livelli sabbiosi di pochi centimetri, oltre i 15 m di profondità.

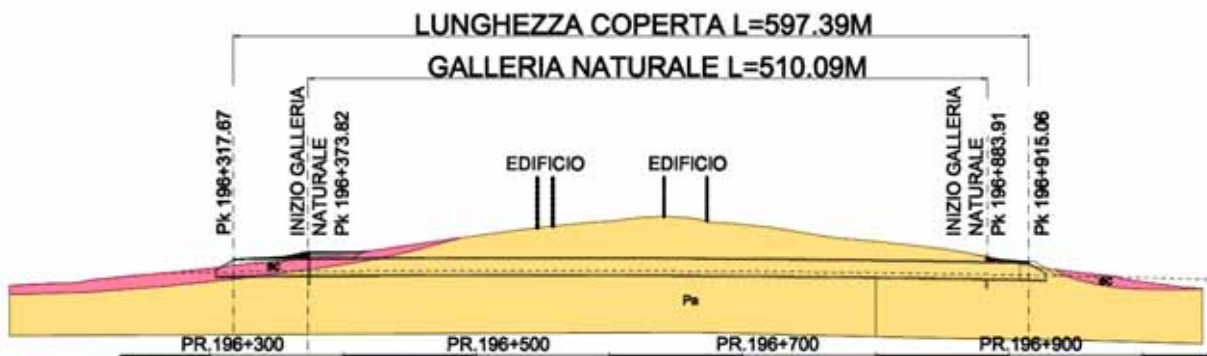


Figura 3 – Profilo geologico di Progetto Esecutivo (P.E)

La fotografia seguente (fig.4) mostra in maniera evidente le argille marnose compatte e le stratificazioni limose nocciola a traverso-poggio.



Figura 4 – Fronte di scavo nelle argille marnose

Dal punto di vista geotecnico le argille, che risultano sovraconsolidate, con variazione del parametro OCR da 2.7 (a p.c.) a 1.0 (a 60m), sono così caratterizzate in termini di resistenza e deformabilità in condizioni drenate.

Tabella 1. Principali parametri geotecnici argille (ap)

c'	10÷38 KPa
ϕ'	20°÷23°
E'	40÷150 MPa

4 Interferenze

Le interferenze presenti lungo la carreggiata sud sono le seguenti:

- edificio 3, sito in prossimità della canna di variante, caratterizzato da una copertura di calotta nella zona in scavo pari a 23 m circa.
- edificio 2, sito planimetricamente fra la canna in variante e quella di allargamento, caratterizzato da una copertura di calotta nella zona in scavo pari a 28m circa, e la sua dipendenza (edificio 1), prossima alla posizione planimetrica della canna in allargamento.

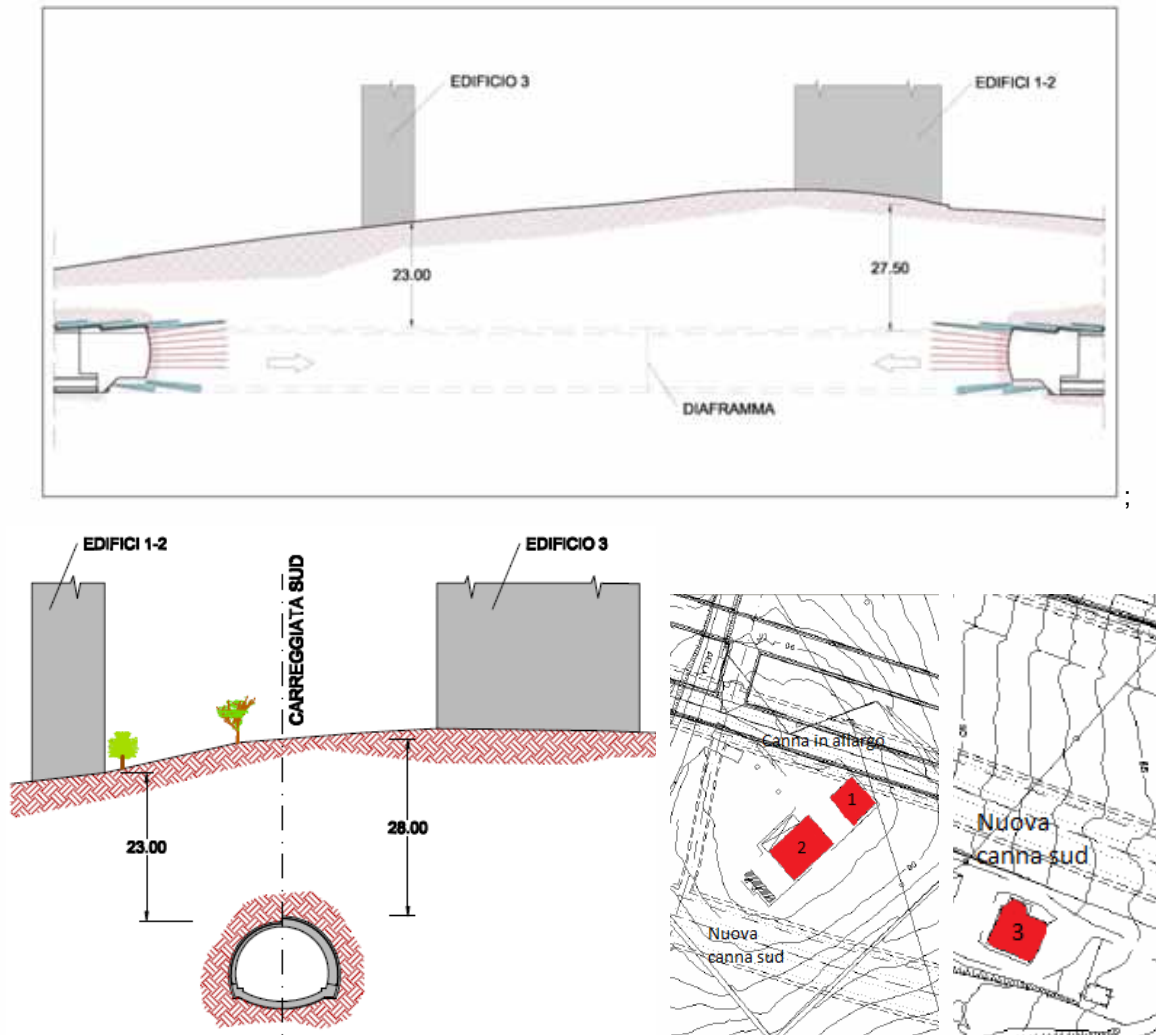


Figura 5 – Planimetrie, profilo e sezioni tipo – ubicazione edifici

5 Il Progetto Esecutivo

Il progetto esecutivo redatto dalla Società SPEA seguendo i principi dell'approccio ADECO-RS era articolato, in sintesi, su due tipologie di sezioni tipo:

- la B2 che prevede il rinforzo del nucleo-fronte mediante elementi strutturali in VTR;
- le sezioni tipo C2a, C2b e C2c, che prevedono, oltre al trattamento del nucleo-fronte, il consolidamento al contorno del cavo sempre mediante elementi strutturali in VTR, in questo ultimo caso valvolati, 2 vlv/m, ed iniettati con miscele cementizie.

Per le sezioni tipo C2a e C2b, da impiegarsi a basse coperture, in corrispondenza degli imbocchi, nei depositi sciolti e per le tratte di faglia era inoltre previsto l'impiego di una coronella di tubi metallici in calotta, con campi di scavo rispettivamente pari a 6.0 m e 9.0 m. I rivestimenti di prima fase erano costituiti da centine 2 IPN240 o 2 IPN260 disposte a passo 1.0m, inglobate in 30+5 cm di spritz-beton. Per i rivestimenti definitivi erano previsti spessori di 1.10 m in arco rovescio, realizzato in c.a., e 1.0 m (ovvero troncoconico con spessore minimo di 0.50 m e massimo di 1.30 m per le sezioni tipo C2a e C2b) in calotta.

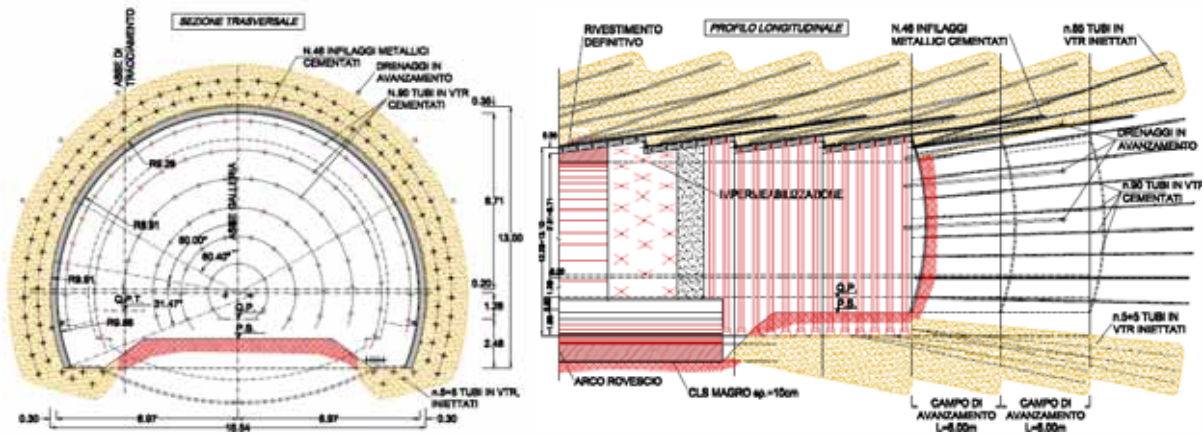


Figura 6 – Sezione tipo C2a di Progetto Esecutivo

5.1 Interventi da piano campagna

Le analisi condotte in sede di progetto esecutivo dalla Spea mostravano che l'insieme degli interventi di preconsolidamento e rivestimento della galleria non erano sufficienti a garantire il passaggio in corrispondenza dei fabbricati, senza che questi superassero la classe di danno 2. In corrispondenza di tali fabbricati erano previsti interventi di presidio effettuati da piano campagna secondo le seguenti tipologie:

- in corrispondenza dell'edificio 3: trattamento "a sotto" verticale in jet-grouting, a formare una zona consolidata fra l'edificio citato e la galleria in variante;
- in corrispondenza dell'edificio 2, un trattamento "a capanna" al contorno della zona in scavo della galleria, realizzato attraverso colonne in jet grouting.

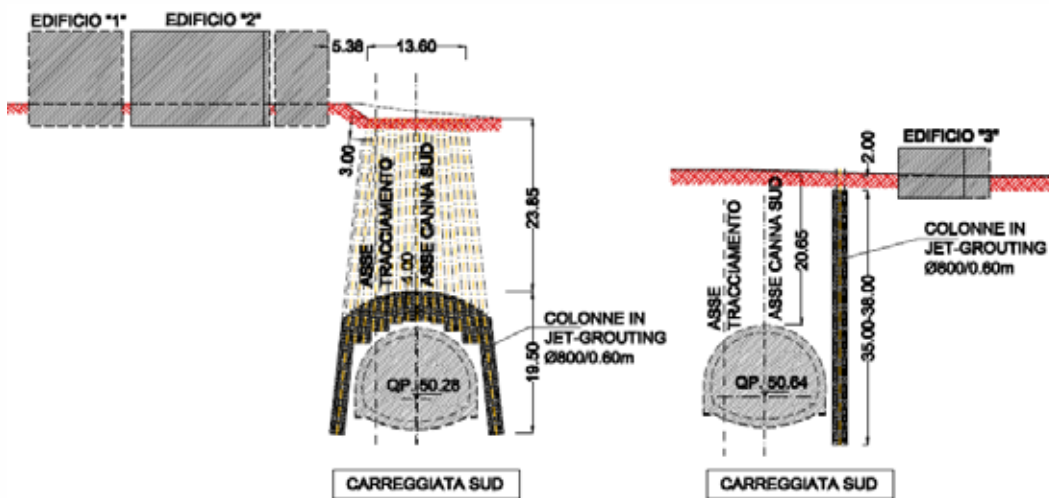


Figura 7 – Interventi da p.c. a protezione fabbricati previsti in Progetto Esecutivo

6 Il progetto di variante e l'intervento della Rocksoil S.p.A.

All'avvio dei lavori si è proceduto, come di consueto, alla sperimentazione della eseguibilità e della riuscita dei trattamenti previsti; i riscontri non sono stati del tutto positivi; in particolare si sono osservati i seguenti fenomeni:

- difficoltà di spurgo durante l'esecuzione dei consolidamenti in jet-grouting da piano campagna e conseguente tendenza al sollevamento del piano campagna;
- mancanza di assorbimento da parte del terreno, nei confronti delle iniezioni selettive da tubi in VTR (trattamento previsto al contorno delle sezioni tipo C); conseguente tendenza alla creazione di vie di fuga preferenziali ("claquage");
- estrema lentezza della realizzazione del campo di consolidamento (3000 valvole da iniettare selettivamente ogni 6-8 m di campo);

Si è quindi analizzata la possibilità di proporre una soluzione alternativa, in termini di consolidamento, allo scopo di sostituire i trattamenti da piano campagna e i consolidamenti al contorno delle sezioni tipo C. Sempre seguendo i principi dell'approccio ADECO-RS (P.Lunardi 2006), dopo un'accurata fase di diagnosi che confermava condizioni d'avanzamento con nucleo-fronte instabile, in fase di terapia si è giunti alla proposta di variante, finalizzata ad introdurre miglioramenti nel processo produttivo e nella qualità del prodotto finale dell'opera in oggetto. La proposta di variante prevede le seguenti modifiche:

- introduzione di nuove sezioni tipo C1 ETJ, che prevedono consolidamenti al contorno mediante la tecnologia della "rotiniezione" ad alta efficienza, invece delle iniezioni cementizie attraverso VTR valvolati;
- conseguente taratura dei campi di applicazione di sezioni tipo;
- eliminazione delle opere di presidio degli edifici eseguite da piano campagna (jet-grouting), la cui funzione viene di fatto sostituita dalla applicazione, in corrispondenza delle zone di interferenza con gli edifici stessi, da sezioni tipo con "rotiniezione" in avanzamento in grado di realizzare comunque una idonea protezione.

6.1 Le nuove sezioni tipo (fase di terapia)

Si è quindi predisposta la sezione tipo C1 ETJ, di seguito sinteticamente descritta (fig.8):

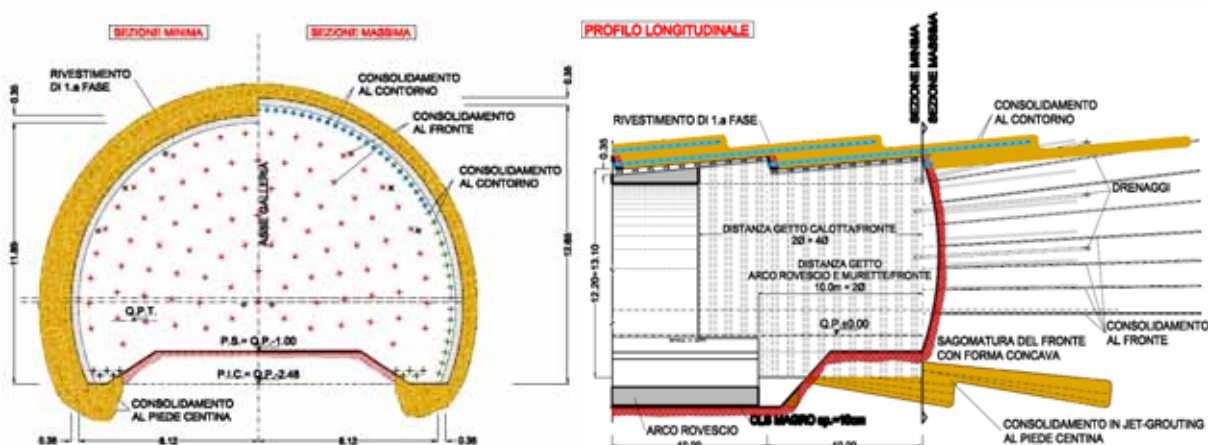


Figura 8 – Sezione tipo C1 ETJ di variante

- al contorno: n°47 trattamenti in jet-grouting eseguiti con rotiniezione L=17 m e armati, per necessità esecutive, con tubi metallici;
- al contorno: n°16+16 trattamenti in jet-grouting eseguiti con rotiniezione L=17m;
- al piede centina n°5+5 trattamenti in jet-grouting eseguiti con rotiniezione L=10/12 m (C1ETJ/C1ETJb);
- nel nucleo-fronte: n°90 tubi in vetroresina cementati (VTR) L=18m.

Il profilo riportato in fig. 9 mostra la distribuzione delle sezioni tipo lungo il tracciato della galleria; a parte i primi metri, realizzati con le sezioni tipo C2 previste dal progetto esecutivo, prima dell'approvazione della variante, il principio generale di applicazione è stato il seguente:

Sezione di scavo tipo C1 ETJ (campo da 8m) / C1 ETJb (campo da 10m)

- Area di imbocco a bassa copertura
- Sotto-attraaversamento degli edifici

Sezione di scavo tipo B2 (invariata rispetto al PE)

- Medio-alte coperture
- Assenza di edifici a piano campagna

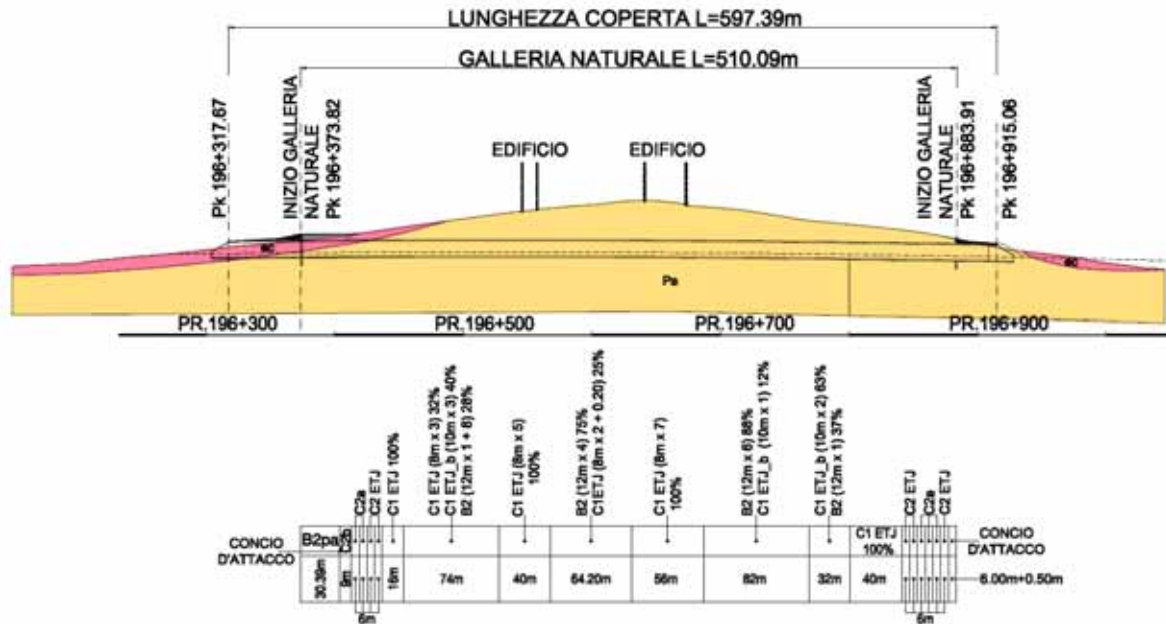


Figura 9 – Profilo geomeccanico di variante

Per dimostrare l'efficacia in termini deformativi della sezione tipo C1 ETJ, sulla base di quanto previsto in sede di diagnosi, si è sviluppata una analisi numerica 2D (fig. 11) che modella:

- l'effetto dei consolidanti al contorno in avanzamento (jet-grouting con rotoiniezione);
- le fasi di scavo che prevedono una installazione dei rivestimenti ravvicinati al fronte;
- l'interazione con gli edifici attraverso una modellazione schematica dei medesimi.

Per quanto concerne gli edifici si sono adottate le seguenti schematizzazioni:

- l'edificio è considerato proiettato perpendicolarmente al tracciato della galleria;
- è considerata la condizione di fondazione isolata (più gravosa per l'analisi) ipotizzando una spaziatura media dei pilastri di circa 4 m;
- le caratteristiche elastiche delle "beam" con cui si sono modellati i telai sono state scalate per tenere conto della spaziatura media di cui al punto precedente presente fuori dal piano dell'analisi.

Le simulazioni tridimensionali (fig. 10) nella zona del fronte di scavo hanno consentito la verifica dell'intervento di rinforzo del nucleo-fronte e la taratura dei rilasci parziali delle forze nell'ambito delle analisi bidimensionali, utilizzate in fase di terapia per le verifiche strutturali e l'analisi di danno sui fabbricati.

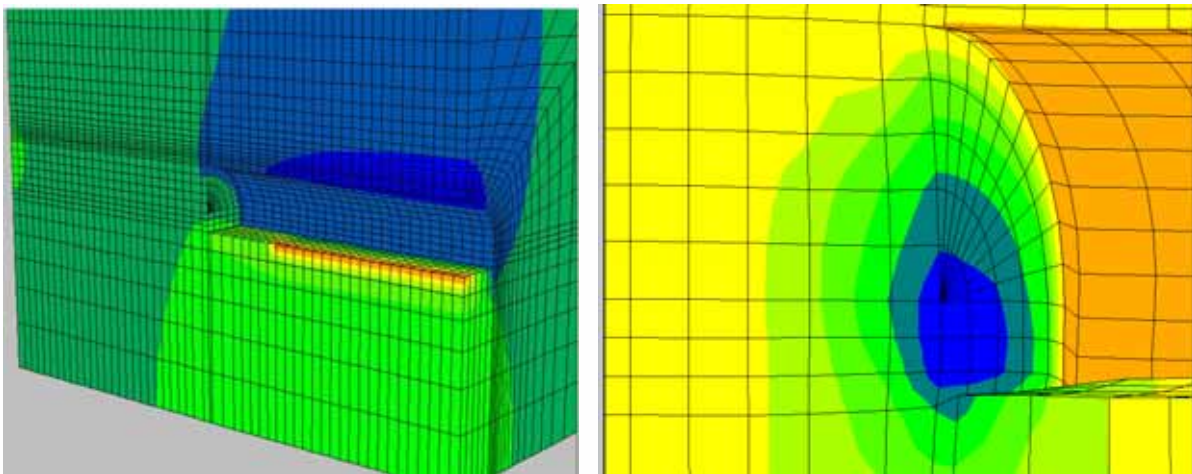


Figura 10 – Sezione tipo C1 ETJ - analisi numeriche 3D – comportamento del fronte di scavo

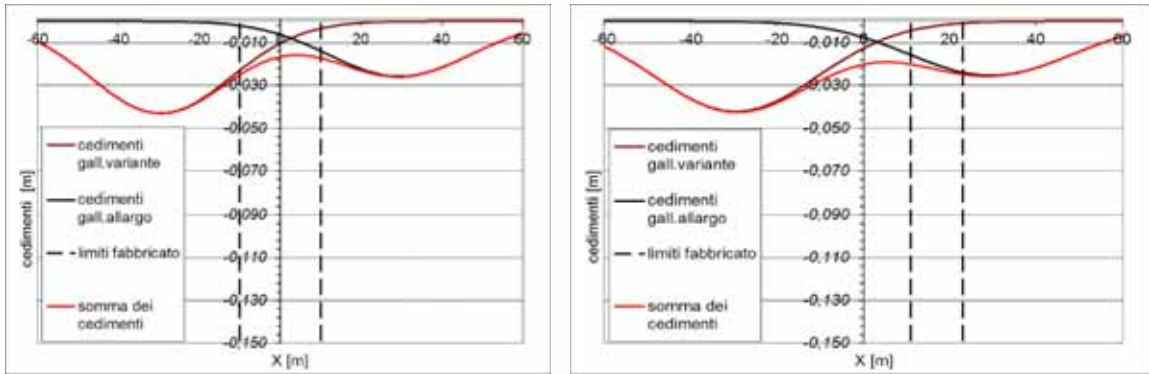
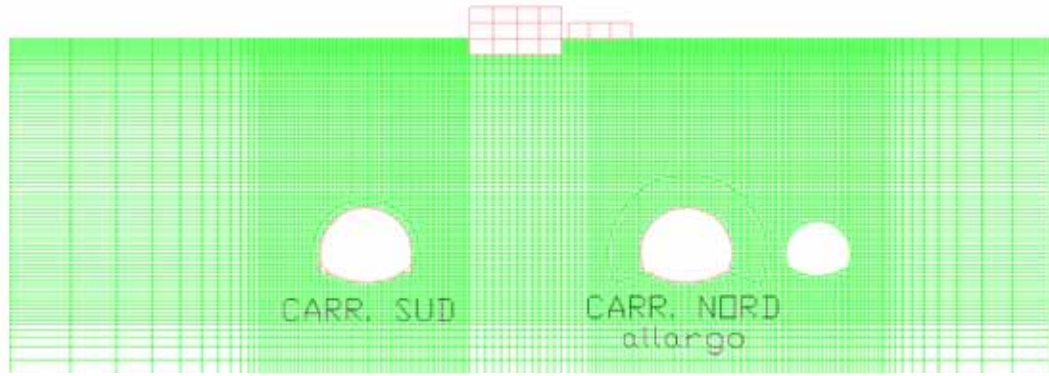


Figura 11 – Sezione C1 ETJ - analisi numeriche 2D per la stima dei cedimenti

Il cedimento massimo per gli edifici 1 e 2 è risultato pari a circa 4cm (fig.11) con un volume perso pari a circa 1%. La valutazione del danno potenziale secondo Rankine (1988) ha mostrato, per gli edifici interessati, l'appartenenza al massimo alla classe di rischio 2 (danno leggero).

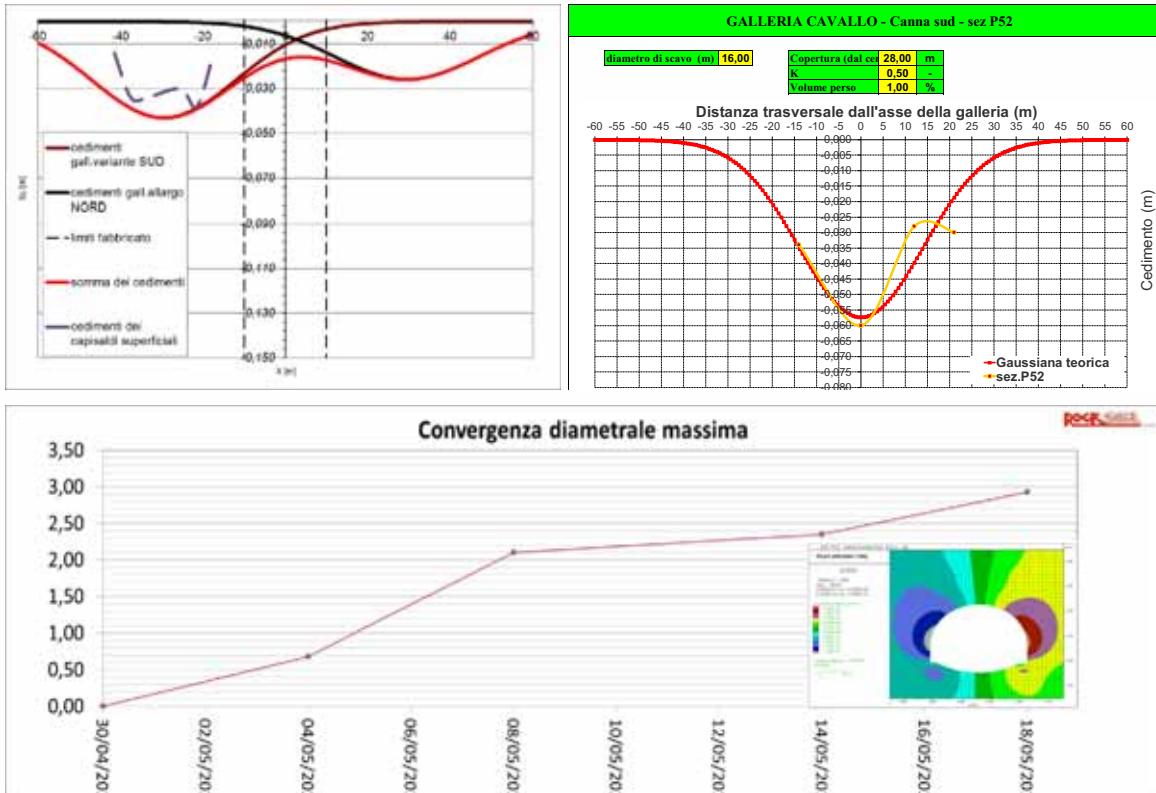


Figura 12 – Confronto fra misure ed ipotesi di progetto - Cedimenti e convergenze in galleria

Durante la costruzione della galleria il monitoraggio ha consentito di verificare le ipotesi progettuali e tarare localmente il progetto (cadenze e fasi esecutive). Alcuni esempi di buona rispondenza delle ipotesi progettuali con quanto misurato è rappresentato nella fig.12.

7 Consolidamenti in jet grouting: Tecnica della rotoiniezione con impiego di monitor ad alta efficienza ETJ

Come illustrato nei paragrafi precedenti, i problemi tecnologici da risolvere connessi alla realizzazione del consolidamento in avanzamento con jet grouting erano nel caso specifico essenzialmente tre:

- A causa della presenza di edifici si doveva individuare una modalità esecutiva tale da consentire il controllo e la minimizzazione dei sollevamenti del suolo causati dalle sovrappressioni del jet; il campo prove iniziale infatti aveva evidenziato che un jet grouting (per altro verticale) eseguito con modalità "standard" non consentiva questo controllo. È noto infatti che nei terreni coesivi lo spurgo generato dal pompaggio di boiaccia ad altissima pressione risulta particolarmente denso e difficile da evacuare attraverso lo spazio anulare presente tra perforazione e batteria di iniezione.

La soluzione: uso della tecnologia della rotoiniezione in avanzamento con spurgo assicurato dalla presenza del casing unitamente all'utilizzo di speciali parametri esecutivi

- Evitare lo svuotamento delle colonne jet iniettate a fine trattamento per prevenire la formazione di cavità; è noto infatti che il materiale che rimane in sito generato dal trattamento jet nei terreni coesivi risulta relativamente fluido; operando in sub-orizzontale c'è il rischio che una fuoriuscita (anche molto limitata) di materiale a fine trattamento induca la formazione di cavità nella parte terminale superiore del trattamento

La soluzione: uso della rotoiniezione in avanzamento con tubo di acciaio lasciato in opera come armatura di rinforzo

- Ottenere un diametro delle colonne di almeno 60 cm in terreni coesivi molto consistenti e con le resistenze UCS previste. Questo aspetto risultava determinante per permettere la formazione dell'effetto arco previsto in progetto. La geometria sub orizzontale del trattamento imponeva inoltre che questi diametri fossero raggiunti senza esasperare i tempi esecutivi; è noto infatti che nei terreni coesivi tanto maggiori sono i tempi di trattamento, tanto maggiore risulta l'effetto di sostituzione del terreno presente con la boiaccia pompata. Nel caso specifico utilizzando monitor "normali" (a bassa efficienza e quindi con raggio di disgregazione inferiore) e tempi di risalita "standard" si sarebbero ottenute colonne di diametro insufficiente (30-40cm), come verificato nel campo prova. Dilatando i tempi di risalita invece, oltre a non ottenere comunque il diametro previsto, si sarebbe ottenuto come risultato un eccesso di frazione di terreno in sito sostituita rispetto a quella miscelata e quindi sarebbe risultata incontrollabile la formazione di "scavernamenti".

La soluzione: uso della tecnologia Trevi ETJM (Enhanced Trevi Jet Mono) che grazie all'utilizzo di componenti a maggiore efficienza energetica consente nel caso specifico la formazione del diametro prefissato senza alterare il rapporto tra il terreno in sito sostituito e quello miscelato.

- La chiave di volta quindi per realizzare un consolidamento di caratteristiche tali da soddisfare le esigenze progettuali e cioè di rendere superfluo il ricorso a trattamenti da piano campagna, in corrispondenza dei fabbricati, garantire nello stesso tempo la stabilità dello scavo a basse coperture e realizzare un avanzamento più veloce, oltre che più sicuro, è stata l'adozione della tecnica della roto-iniezione con impiego di monitor ad alta efficienza ETJ.

7.1 Rotoiniezione in avanzamento

Questa tecnica di esecuzione del jet grouting prevede l'impiego di una attrezzatura di perforazione (posizionatore) dotata di mast con doppia rotary azionante (fig.13) una doppia batteria di perforazione (aste jet /rivestimento) contro-rotante. Le aste interne sono costituite dalla batteria jetting, attrezzata (nel caso specifico) con monitor autopercorante ad alta efficienza ETJ. Il tubo di rivestimento viene lasciato in opera come armatura definitiva al termine del trattamento e va dimensionato in funzione del diametro delle aste jet. La posizione della batteria interna (aste jet) può essere regolata in modo da poter fuoriuscire o meno rispetto al casing esterno. Durante il trattamento, lo spurgo del materiale viene convogliato nello spazio anulare fra le aste ed il tubo di rivestimento, in modo da verificarne e controllarne la continuità di flusso ed impedire lo svuotamento della colonna al termine del

trattamento. Tra i vantaggi della metodologia si sottolinea la possibilità di controllare efficacemente lo spurgo. Questo infatti, fluendo entro lo spazio anulare tra aste e rivestimento, non è più soggetto a interruzioni e blocchi dato che si trova un canale di flusso sempre aperto ed è inoltre favorito dalla contro-rotazione delle aste. Nel jet tradizionale invece lo spurgo avviene tra aste di iniezione e superficie non rivestita della perforazione per cui è frequente l'occlusione di questo canale ingenerando facilmente rilevanti fenomeni di sollevamento di terreno e di manufatti soprastanti.

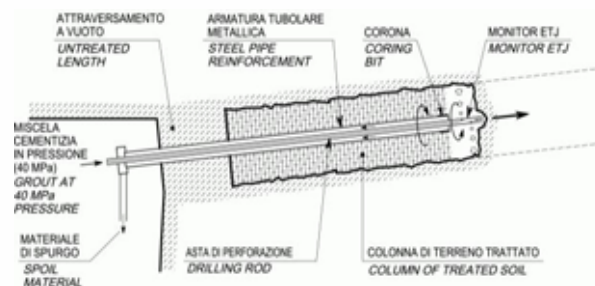


Figura 13 - Schema funzionale rotoiniezione in avanzamento

Quanto sopra a maggior ragione considerando che nel caso della galleria è necessario preservare le importanti preesistenze esistenti in superficie. Nel suo complesso, la tecnica della "rotoiniezione in avanzamento" può suddividersi nelle seguenti fasi operative:

Fase 1: Perforazione sino alla profondità di progetto della batteria di aste di perforazione e contemporanea iniezione di acqua ad alta pressione attraverso gli ugelli posti sul "monitor" jet (fase di "pre-cutting"). Si deve avere cura di lasciare una zona di attraversamento a vuoto di un metro circa ad inizio perforazione con funzione di "tenuta" del terreno trattato lato fronte. Arretramento dal fondo del foro, sino a ridosso del fronte di attacco.

Fase 2: Passaggio da acqua a miscela cementizia e avanzamento nel foro sino alla quota di progetto a velocità di avanzamento e rotazione controllate e contemporanea iniezione ad alta pressione, con inserimento del tubo di armatura.

Fase 3: Giunti alla profondità di progetto, arretramento della batteria jet, inghisaggio del casing a secco entro il terreno vergine in modo da occluderne il passaggio ed evitare il fenomeno di svuotamento, distacco del tubo di armatura dalla testa di rotazione ad esso connessa che rimane come armatura della colonna jet e recupero della batterie di aste jet.

7.2 Tecnologia jet in funzione della litologia dei terreni interessati: sistema ETJ

La geologia in cui si sviluppa la galleria è costituita da litotipi prevalentemente argillosi e limosi con intercalazioni sabbiose ad elevata coesione. I sondaggi condotti da superficie hanno consentito di verificare che questi terreni coesivi sono caratterizzati da elevati valori di resistenza al taglio in condizioni non drenate crescenti al variare della copertura con valori di C_u compresi tra 200 e 350 KPa. In considerazione dell'elevata consistenza del terreno da trattare è stato previsto l'impiego di un sistema jet-grouting monofluido "ottimizzato" dal punto di vista energetico denominato ETJ (Enhanced Trevi Jet). Questa tecnologia utilizza una serie di dispositivi (teste di alimentazione, condotti, monitor, ugelli) particolarmente studiati per conservare l'energia del fluido iniettato ad altissima velocità e concentrare la forma del getto stesso dopo l'uscita dall'ugello. In questo modo è possibile aumentarne il potere disagregante a parità di energia impiegata. La tecnologia deriva da esperienze giapponesi e francesi ed è stata messa a punto da Trevi dopo un lungo periodo di test condotti in collaborazione con l'Università di Bologna per individuare le geometrie ottimali. Cuore del sistema è il monitor: quelli "tradizionali" non sono altro che cilindri cavi con una o più aperture su cui sono ricavate la sedi per ugelli forzosamente "inefficienti". Il monitor ETJ (fig.13) consente invece di "accompagnare" il getto verso ugelli di dimensioni "ottimali". Il risultato in termini di capacità di disagregazione e coerenza del getto è apprezzabile dalle figure 14a e 14b, in cui è stata fotografata la conformazione dei getti nei due casi (monitor tradizionale ed ETJ) nonché dal risultato di test di erosione su campioni di calcestruzzo prefabbricato (fig. 15). Il sistema monofluido (ETJM) consente un miglioramento delle prestazioni compreso tra il 60% e oltre il 100% in termini di volume trattato a parità di energia specifica impiegata. Mediamente il guadagno in termini di diametro raggiungibile rispetto al tradizionale è di circa il 33%.

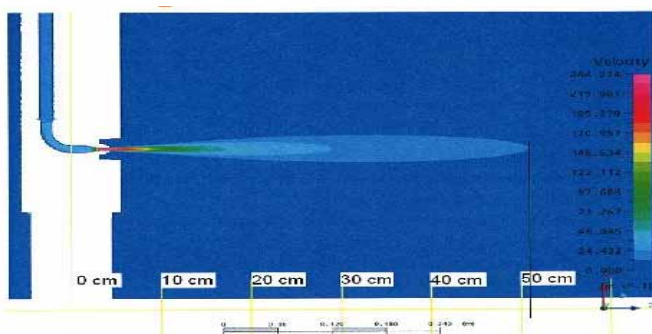


fig. 10: velocità di penetrazione del fluido acqua in acqua per monitor ETJ a 300 bar



Osservazioni:

La penetrazione del getto di acqua in acqua si estende per una lunghezza pari a circa 51,1 cm dall'asse del monitor.
 La forma del getto risulta regolare e compatta

Figura 14a - Velocità penetrazione monitor ETJ in acqua - schema monitor ETJ a destra



Figura 14b - A sinistra - conformatore getto con monitor ETJM - a destra con monitor "tradizionale"



Figura 15 -Test di disgregazione con monitor ETJ e con monitor "tradizionale"

7.3 Esito del campo prova jet grouting

In corrispondenza del concio di attacco lato Pedaso sono state realizzate 9 colonne jet secondo il metodo della rotoiniezione ad alta efficienza ETJ. Tutte le colonne sono state eseguite a partire da fori carotati sulla paratia dell'imbocco. L'esecuzione di ogni colonna è stata preceduta da una fase preliminare di pretaglio con acqua. Sono stati testati dei set di parametri, andando ad interessare sia lo strato più superficiale ed alterato delle argille (per il quale risulta critico il controllo dell'iniezione, per evitare fuoriuscite indesiderate) sia lo strato più consistente inferiore, allo scopo di verificare l'ottenimento del diametro previsto.

La fase di pretaglio è stata eseguita senza rivestimento, consentendo quindi una maggiore sezione di evacuazione allo spurgo. In questa fase lo spurgo è risultato piuttosto liquido e a bassa viscosità. Durante tutta l'esecuzione del trattamento si è costantemente tenuto sotto controllo il volume di spurgo, sia quello proveniente da bocca foro, sia quello dal convogliatore della rotary del rivestimento. La qualità e quantità dello spurgo è apparsa buona. Durante l'esecuzione delle colonne non si sono segnalate fuoriuscite di miscela o spurgo in superficie, che avrebbe rappresentato un segnale di

indesiderata idrofratturazione. Durante lo scavo della galleria è stato misurato il diametro delle colonne di prova (fig.16). I diametri rilevati hanno ampiamente soddisfatto le aspettative, risultando sempre al di sopra del diametro nominale di 600 mm. Le colonne eseguite nelle argille grigie inferiori, rappresentano il test più significativo per giudicare la fattibilità tecnica dell'intervento nella geologia in esame. Come testimoniato dalla figura seguente il diametro trasversale misurato è risultato ben oltre 700mm. I campioni di colonna prelevati durante lo scavo sono stati sottoposti a prove di schiacciamento ed hanno fornito valori di resistenza adeguati allo scopo del trattamento: la resistenza media a compressione a 28gg richiesta in progetto è pari a 4MPa.



Figura 16 – Foto rappresentative delle colonne in jet grouting ottenute nel campo prova

8 Conclusioni

La variante proposta per la galleria Cavallo sud unitamente alla tecnica innovativa della rotoiniezione con sistema ETJ ha raggiunto gli obiettivi prefissati consentendo:

- l'avanzamento comunque in condizioni di sicurezza anche per le tratte a bassa copertura;
- il contenimento dei cedimenti in corrispondenza dei fabbricati e l'eliminazione di eventuali effetti indesiderati nell'esecuzione del consolidamento;
- il mantenimento di produzioni adeguate, in rapporto alle dimensioni della galleria (1m/gg circa di avanzamento) con una riduzione dei tempi di consolidamento pari al 40% rispetto a quanto previsto nel Progetto Esecutivo.

9 Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento a ing. G. Scotto Lavina (Autostrade SpA), Ing. Alberto Selleri (SPEA), Ing. C. Lombardi (SPEA), Ing. A. Delle Chiaie (SAMAC), Ing. Mario Claps (SAMAC), Dott. Luca Rosiello (Rocksoil SpA).

10 Bibliografia

P. Lunardi - "Progetto e costruzione delle gallerie. Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e Suoli (ADECO-RS)", Editore Hoepli, 2006.

P. Lunardi, G. Cassani, M. Tanzini - "Lo scavo di gallerie di grandi dimensioni nei terreni a grana fine strutturalmente complessi", Gallerie e Grandi Opere in Sottterraneo, n° 4, Ottobre/Dicembre 2009.