

LA PRIMA APPLICAZIONE DEL JET-GROUTING IN ORIZZONTALE COME PRECONTENIMENTO DELLO SCAVO DI GALLERIE IN TERRENI INCOERENTI

THE FIRST APPLICATION IN THE WORLD OF JET-GROUTING TECHNOLOGY TO SUPPORT IN ADVANCE THE TUNNEL EXCAVATION IN LOOSE SOIL

Giorgio Golinelli, Italstrade S.p.A., Roma, Italia
Pietro Lunardi, Rocksoil S.p.A., Milano, Italia
Andrea Perelli Cippo, Rodio S.p.A., Milano, Italia

La prima importante applicazione del metodo jet-grouting in avanzamento è stata effettuata nel 1983 su un tronco di galleria ferroviaria a doppio binario in località **Campiolo** sulla linea Udine-Tarvisio.

Il terreno era costituito da detriti di falda con blocchi lapidei anche di grosse dimensioni in matrice limo-sabbiosa.

Il trattamento della prima sezione è stato eseguito con una serie di 41 colonne orizzontali secanti a 0,5 metri di interasse. In questa fase iniziale si è utilizzata un'attrezzatura a rotazione; da controlli mediante carotaggi furono confermati i buoni risultati durante lo scavo che, iniziato prudentemente con centine ogni metro, fu poi proseguito con una spaziatura di 2,5 metri.

Nelle successive fasi si è fatto ricorso all'attrezzatura speciale a roto-percussione SR-500 realizzando serie di 41 colonne lunghe 13 metri con una inclinazione del 10%, consentendo sezioni di 10 metri di scavo.

Nel complesso si sono trattati circa 170 metri di galleria sotto coperture variabili da qualche metro a 70 m circa; l'avanzamento venne proseguito in tutta sicurezza alla media di 2,0 m/giorno. L'effetto del consolidamento è stato tale che le centine sono risultate praticamente scariche e le misure di convergenza, eseguite sistematicamente, hanno dato valori praticamente nulli.

The first application in the world of jet-grouting technique has been realized in 1983 for a railway tunnel project along the Udine-Tarvisio railway line at Campiolo site. In the paragraph 2 the theoretic features of the new soil consolidation technology in a conical shape all around the tunnel excavation profile are explained. Then the Authors refer about the drilling and jet-grouting methods, the trial-tests done and the working relative parameters definition.

A specific equipment has been designed for this kind of job. A roto-percussion driller mounted on a 15 m long mast allowed to drill and grouted 13÷15 m long holes. A special device "monitor" with a spherical valve turns the drilling axial fluid to high-pressure grout cement mix.

In paragraph 7 the Author relates about the plants, equipment, organization, out-put of the workmanship, and the phases of the whole work along the 200 m of the Campiolo tunnel.

Advantages and disadvantages of the technology of such secant grouted poles drilled in advance along the excavation profile are explained.

At last the Authors refer about a new alternate proposal which foresees to realize the conical grouted section more inside and earlier in order to improve the safety and stability of the system.

1. GENERALITA'

La presente relazione si propone di analizzare le circostanze che hanno portato ad sperimentare per la prima volta l'impiego del jet-grouting per realizzare il precontenimento dello scavo in galleria in terreni difficili incoerenti. Si esaminano poi i vantaggi e gli svantaggi della tecnologia nei risvolti programmatici e contrattuali.

Agli inizi del 1983 l'Azienda Autonoma delle Ferrovie dello Stato affidava alla ITALSTRADE la costruzione della sede della ferrovia a doppio binario di un tratto del raddoppio della linea Udine-Tarvisio tra il km 40+385 ed il km 47+250, il quale comprende tra l'altro le gallerie di Campiolo e Palis per uno sviluppo complessivo di km 5,536.

In particolare ci interesseremo delle tecnologie applicate nel tratto Sud della galleria Campiolo fra le progressive km 41+700 e km 41+900. (FIG. 1)

A quel tempo era in corso nella valle anche la realizzazione dell'Autostrada Udine-Carnia, Confine di Stato, e si stava sperimentando con successo la tecnica del jet-grouting per risolvere alcuni casi di fondazioni indirette, specie nei terreni di natura alluvionale, anche in prossimità di corsi d'acqua.

Questa tecnica di iniezioni di fluido più o meno stabilizzante ad altissima pressione aveva consentito di realizzare robusti diaframmi circolari consolidando il terreno in posto secondo una geometria ben definita e rendendo quest'ultimi anche sufficientemente impermeabili.



FIG. 1

2. ASPETTI PROGETTUALI

Il tratto Sud della galleria Campiolo, si sviluppa per circa 200 m in un terreno costituito da detriti di falda di natura calcarea classificabile, dal punto di vista geomeccanico, come materiale incoerente.

L'avanzamento di una galleria in materiali di questo tipo fino a quella data aveva sempre presentato notevoli difficoltà connesse all'instabilità del fronte di scavo.

La mobilitazione dell'attrito al fronte ed al contorno dello scavo con "effetto cupola", quando non sopportata da una sufficiente resistenza coesiva del terreno, avviene infatti a spese di ingenti fenomeni deformativi che, se non prontamente contenuti all'atto dello scavo, provocano rifluimenti di materiale in galleria fino a causarne il crollo.

Prima dell'esecuzione della galleria "Campiolo", situazioni di questo tipo venivano affrontate a prezzo di notevoli difficoltà operative, mediante avanzamento a sezione pluriparzializzate, o in presenza di nucleo al fronte, cercando di "sostenere" il terreno sul profilo di scavo con centine e marciavanti.

Questa tecnologia, alquanto primitiva, oltre a non escludere la possibilità di formazione di fornelli, non garantiva altresì una adeguata sicurezza alle maestranze. L'alternativa era consolidare il terreno in avanzamento mediante iniezioni tradizionali, ma ciò risultava spesso economicamente oneroso con risultati incerti per la difficoltà di controllare la diffusione della miscela nel terreno.

La disponibilità di una nuova tecnologia di trattamento detta "jet-grouting" già da qualche anno applicata con successo per il consolidamento di fondazioni e caratterizzata dalla possibilità di concentrare l'azione consolidante entro raggi d'azione ben definiti, ottenendo notevoli incrementi di resistenza al taglio del materiale trattato, permise di concepire un nuovo sistema di attacco capace finalmente di risolvere per la prima volta nella sua globalità il problema dello scavo in terreni incoerenti.

Il Prof. Lunardi, incaricato dall'ITALSTRADE S.p.A. della progettazione della galleria, propose allora di applicare il sistema jet-grouting, in orizzontale, allo scopo di creare in avanzamento sul fronte della galleria, in corrispondenza al profilo del futuro scavo, un arco di terreno consolidato di notevole resistenza.

Si otteneva così un duplice effetto :

- in senso longitudinale si creava una protezione al terreno costituente il nucleo, che risultava così alleggerito e stabile;
- in senso trasversale si assicurava un precontenimento al cavo tale da impedire la decompressione del terreno al suo contorno ed i fenomeni deformativi ad essa connessi, e permettere così di procedere nelle successive fasi di scavo sotto la garanzia di un "effetto arco" già operativo, quindi in piena sicurezza.

Naturalmente, minori decompressioni e minori fenomeni deformativi significano anche minori spinte sul rivestimento definitivo, che potrà quindi essere realizzato di spessore più ridotto.

In pratica l'esecuzione dell'intervento di consolidamento e dello scavo della galleria avviene in quattro sequenze distinte :

- sequenza 1) trattamento della calotta per 13 ml oltre il fronte d'attacco con 41 colonne suborizzontali (inclinazione 9 % rispetto all'asse galleria) di terreno consolidato, compenstrate, poste ad interasse di 45÷50 cm; (FIG. 2)

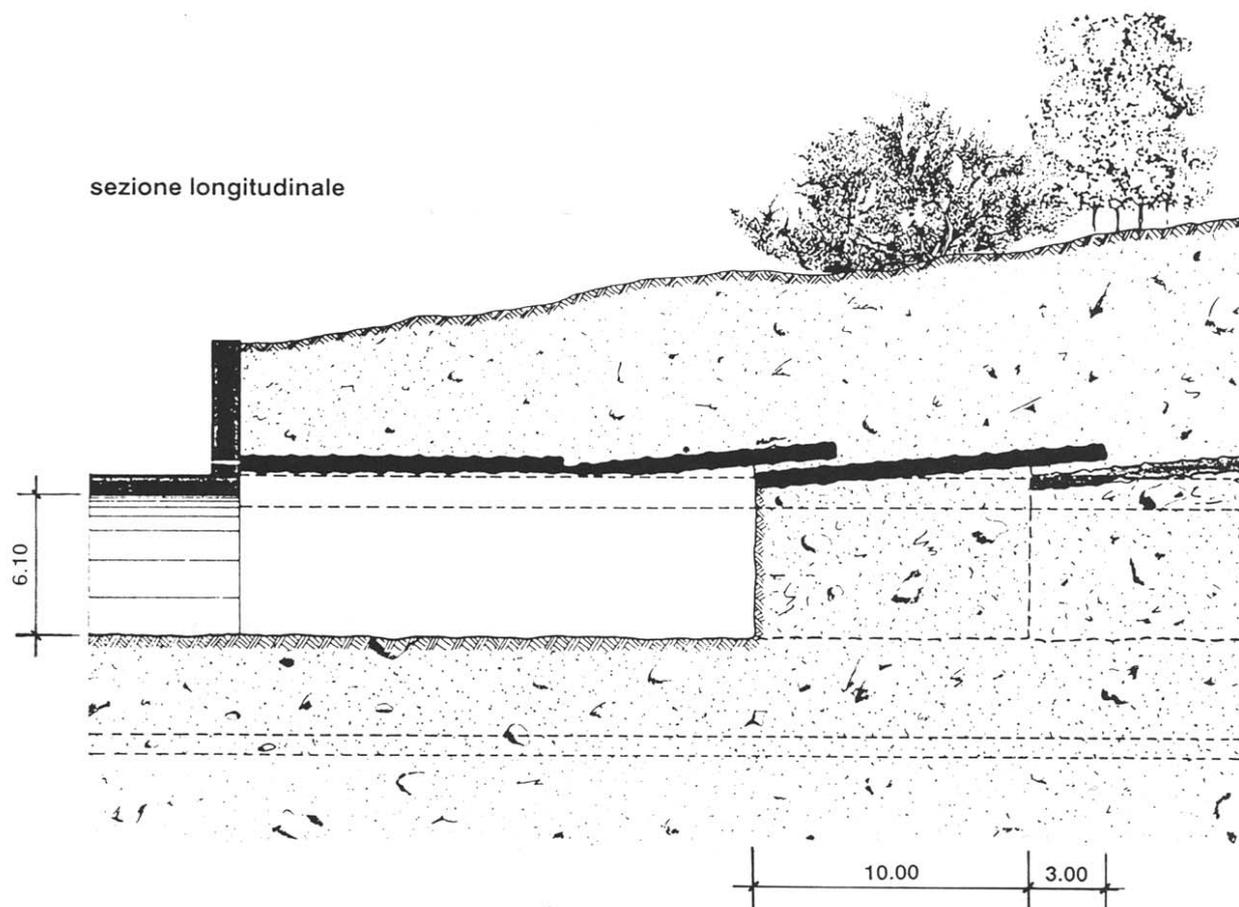
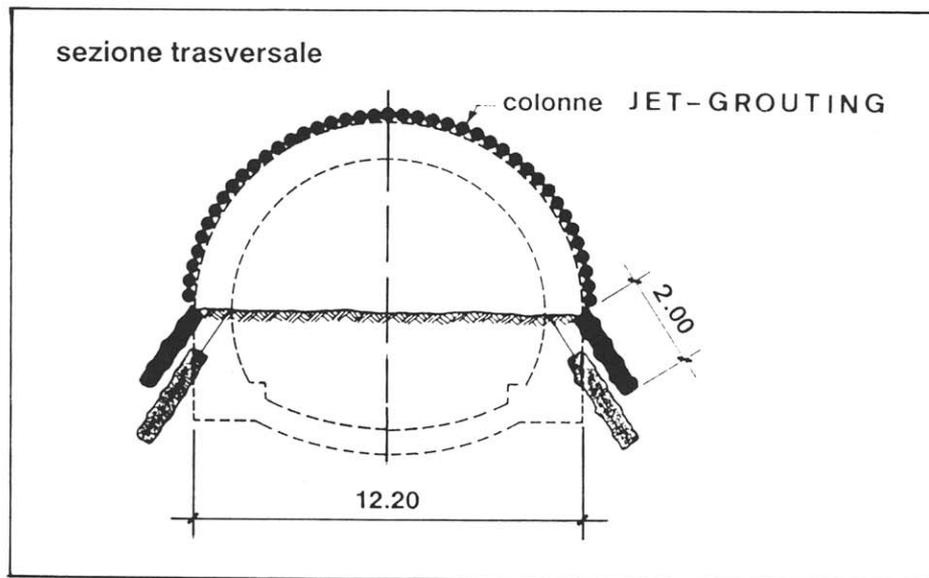


FIG. 2

- sequenza 2) avanzamento a mezza sezione per circa 10 ml e proiezione immediata di spritz-beton, armato con centine e rete elettrosaldata, per uno spessore di circa 10÷15 cm ;
- sequenza 3) esecuzione, a partire dal nuovo fronte, di un successivo tratto (circa 13 ml) di colonne di terreno consolidato e trattamento dei piedritti nel tratto retrostante già scavato con colonne subverticali di terreno consolidato di circa 2 m di lunghezza (Vedi FIG. 3), distribuite in funzione delle condizioni idrogeologiche del terreno circostante e del comportamento del cavo, tenuto continuamente sotto controllo mediante misure di convergenza sistematiche;

- sequenza 4) scavo dello strozzo nel tratto già totalmente consolidato e proiezione dello spritz-beton sulle pareti; esecuzione delle murette, dell'arco rovescio e quindi del rivestimento definitivo in calcestruzzo.



3. IL JET-GROUTING

FIG. 3

Il termine "jet-grouting" implica l'iniezione attraverso ugelli di sezione particolare, con pressioni assai più elevate di quelle convenzionali (fino a 600 atm e più).

A differenza delle iniezioni tradizionali che si basano principalmente sulla permeazione e impregnazione di fluidi e quindi limitate dalla capacità di assorbire del terreno, il jet-grouting si basa principalmente sulla idrofratturazione ("claquage") la quale, disgregando il terreno, grazie all'azione meccanica del getto del fluido ad altissima pressione e quindi ad alta velocità, lo mescola, lo consolida e compatta in un intorno ben definito, e rimuovendone le parti più fini mediante jetting di aria ed acqua è possibile ampliare l'intorno del trattamento, e migliorare il consolidamento.

Il jet-grouting può essere eseguito utilizzando un solo fluido come mezzo disgregante e stabilizzante insieme, oppure utilizzare più fluidi: aggiungendo aria e acqua come agenti disgreganti e dilavanti; alla sospensione cementizia è riservata essenzialmente la funzione stabilizzante.

La sequenza operativa del procedimento si articola in due fasi distinte:

- perforazione fino alla profondità richiesta con una batteria di aste munita al fondo di un apposito dispositivo di iniezione (monitor)
- iniezione attraverso il monitor e contemporanea estrazione e rotazione dello stesso con velocità predeterminate.

La geometria e le proprietà meccaniche delle colonne di terreno stabilizzato dipendono dalle caratteristiche naturali del terreno e dagli effetti combinati dei vari parametri operativi: composizione della miscela, portata, pressione di iniezione, numero e diametro degli ugelli, velocità di rotazione e di ritiro del monitor.

Il diametro delle colonne (da 0,50 a 1,00 m in generale) può essere incrementato fino a quasi 2 metri e più con il procedimento a 3 fluidi, ma la maggiore flessibilità operativa del sistema con un fluido solo, ne ha diffuso maggiormente l'impiego nel campo delle gallerie per realizzare i trattamenti conici suborizzontali in avanzamento.

4. STUDI DI PRECONSOLIDAMENTO PER SCAVI IN GALLERIA

Nei primi anni del decennio 80 sono iniziati gli studi per mettere a punto un sistema innovativo che risolvesse i problemi di scavo in sotterraneo nei terreni incoerenti.

La ricerca si orientò all'impiego del jet-grouting sub-orizzontale per costituire un preconsolidamento tutti intorno alla sezione di scavo della galleria, da realizzarsi con colonne di terreno consolidato.

La formazione di un arco di terreno sufficientemente portante, preventivo allo scavo, presenta l'indubbio vantaggio di ridurre gli effetti deformativi dei terreni conseguenti a fenomeni di decompressione causati dalle lavorazioni di scavo.

Gli aspetti teorici del sistema erano confortanti sia dal lato tecnico che economico, infatti col jet-grouting è possibile trattare terreni incoerenti, migliorandone le proprietà meccaniche con iniezione a pressione di una sospensione cementizia, superando gli inevitabili problemi di permeazione dipendenti dalla granulometria del terreno delle iniezioni tradizionali. Questa tecnologia inoltre offre un'ottima durabilità nel tempo, e fra l'altro è meno inquinante rispetto all'iniezione di prodotti chimici e, nel suo insieme, è più economica.

Tutto ciò premesso si è proceduto ad effettuare un campo prova a Varallo Pombia (NO) realizzando un cunicolo di 12,00 m di lunghezza, in un terreno alluvionale costituito da sabbie limose e ghiaie in presenza di ciottoli.

Il preconsolidamento, circoscritto alla sezione di scavo (2,50 m di altezza e 2,00 m di larghezza), è stato realizzato con 15 colonne orizzontali poste ad interasse variabile di 0,40-0,60 m; la copertura, sul cervello del cunicolo, era inferiore ai 3,00 m. (FIG. 4)

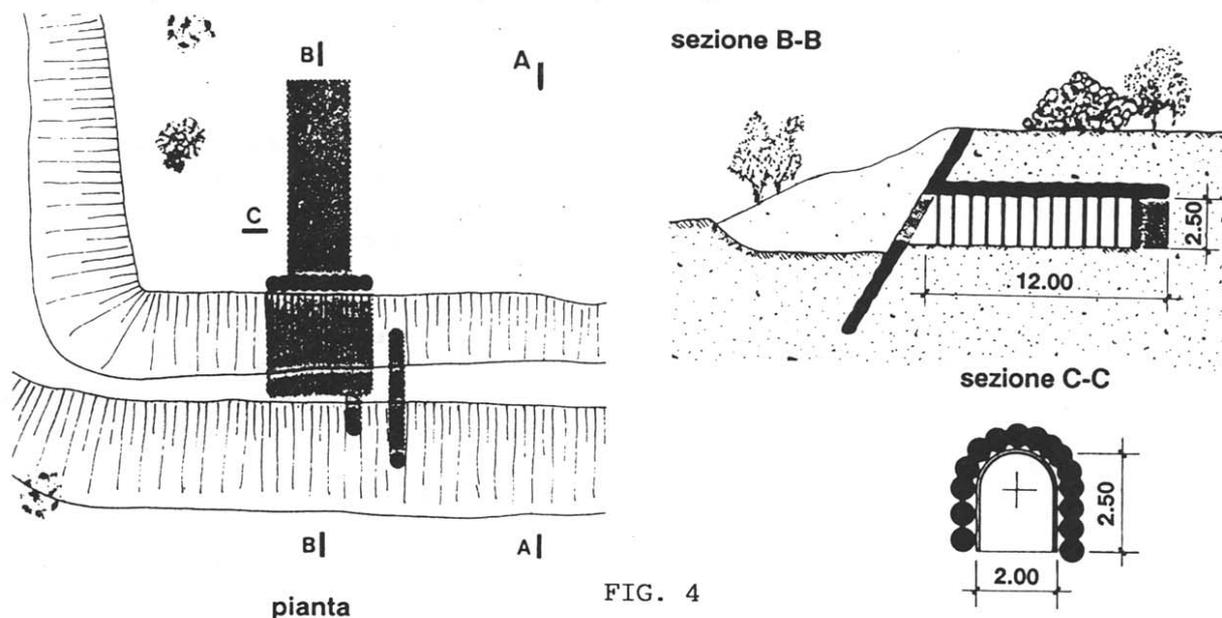


FIG. 4

Lo scavo del cunicolo (**FIG. 5**), eseguito successivamente, ha messo in vista l'ottima qualità e omogeneità del trattamento lungo l'arco della calotta e dei piedritti, nella zona dove le colonne erano state posizionate ad interasse di 0,60 m la compenetrazione del trattamento non era perfetta.

Durante l'esecuzione delle prove sono stati controllati i movimenti della superficie del terreno, sovrastante il cunicolo, mediante livellazioni di precisione.

Nella fase esecutiva del trattamento sono stati registrati sollevamenti dell'ordine di 1 centimetro, mentre nella fase di scavo si è accertato un cedimento di alcuni millimetri.

I risultati positivi delle prove hanno confermato la validità del sistema, e hanno permesso la sua prima applicazione, a livello mondiale, nella galleria di Campiolo a Moggio Udinese (UD).

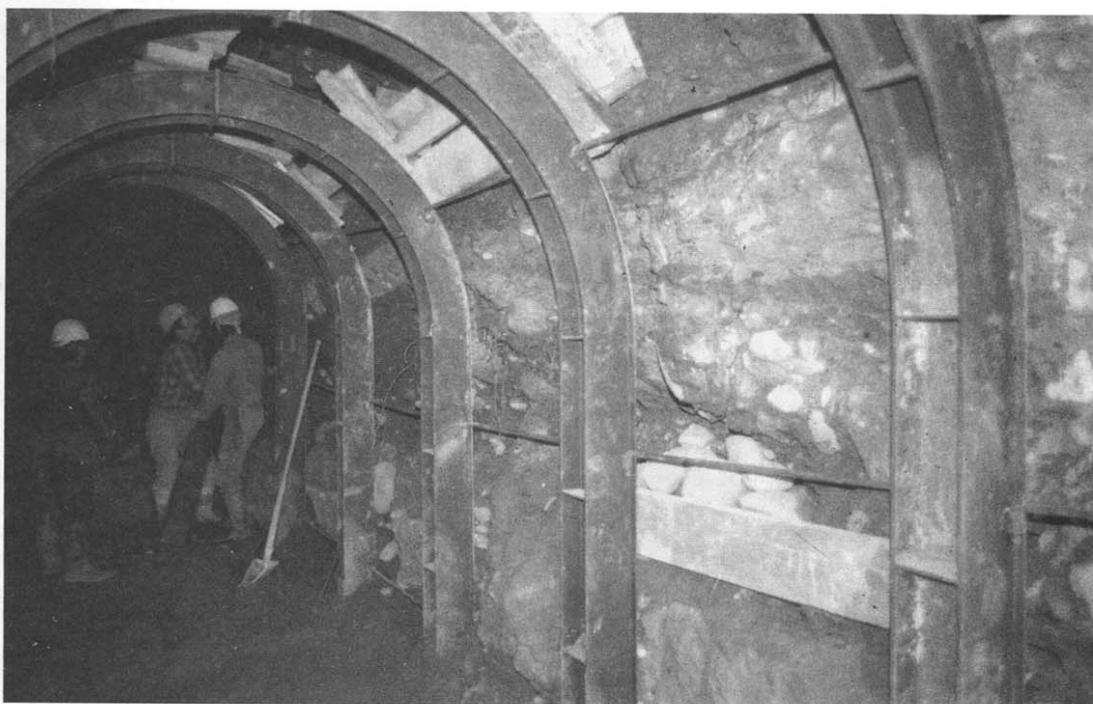


FIG. 5

5. SCELTA DEI PARAMETRI OPERATIVI

Il jet-grouting si attua combinando numerosi parametri operativi la cui taratura è ottimizzata in appositi campi di prova, e tenendo presente le esperienze maturate precedentemente.

I principali parametri operativi si muovono entro i seguenti limiti :

- composizione delle miscele
- pressione: da 300 a 600 atm
- diametro degli ugelli: da 1,5 a 3 mm
- velocità di rotazione del monitor durante il jet-grouting: da 10 a 20 giri/min.
- velocità di risalita: da 25 a 50 cm/min.
- portata di iniezione: da 1 a 3 l/s
- volume di miscela iniettata: da 200 a 350 l/m, corrispondenti in generale ad almeno il 60-70% del volume di terreno trattato.

La combinazione di questi parametri è in stretta relazione con le caratteristiche del terreno e con le specifiche richieste dal progetto.

Una volta fissata la portata e quindi fissati il diametro degli ugelli e la pressione, la velocità di ritorno è funzione del volume di miscela necessario per consolidare quel determinato terreno.

Quando si passa a terreni via via più fini ed addensati, sarà necessario ridurre la velocità di rotazione e di ritiro e contemporaneamente aumentare la pressione per ottenere una omogeneità di trattamento.

Un altro importante parametro da tenere sotto controllo è lo spurgo sia nella fase di perforazione e soprattutto in quella di iniezione, per evitare dannosi effetti di sfondamento del fronte di avanzamento e di sollevamento del terreno sovrastante. Nelle formazioni più coesive, la quantità di materiale rifluente (terreno e miscela nel suo insieme) corrisponde ad una elevata percentuale del volume di miscela immessa, essendo in questo caso la filtrazione attraverso il terreno quasi nulla.

Dal controllo della densità e della quantità del flusso di spurgo si ha un'indicazione sull'effetto di idrofratturazione e di lavaggio dei fini contenuti nel terreno; è possibile altresì regolare la compattazione del terreno, controllando il volume dello spurgo.

6. L'ATTREZZATURA SPECIFICA

Il metodo di perforazione viene scelto in base alla natura prevalente del terreno, alle condizioni generali del sito ed alle specifiche del progetto per quanto attiene la profondità e l'inclinazione dei fori.

Nei terreni a granulometria media fine è preferibile la perforazione a rotazione, utilizzando per tale scopo sonde leggere dotate di testa di rotazione con mandrino passante. Questo tipo di sonde con un mast di 4÷5 metri consentono di utilizzare aste fino a 15 m di lunghezza.

Nei terreni incoerenti grossolani o, con frequenti blocchi lapidei la roto-percussione è più conveniente, la quale consente anche più elevate produzioni; però richiede attrezzature più ingombranti: il mast, in questo caso, deve avere una lunghezza uguale a quella delle aste.

La FIG. 6 mostra lo schema dell'attrezzatura più evoluta per le perforazioni suborizzontali a rotopercussione.

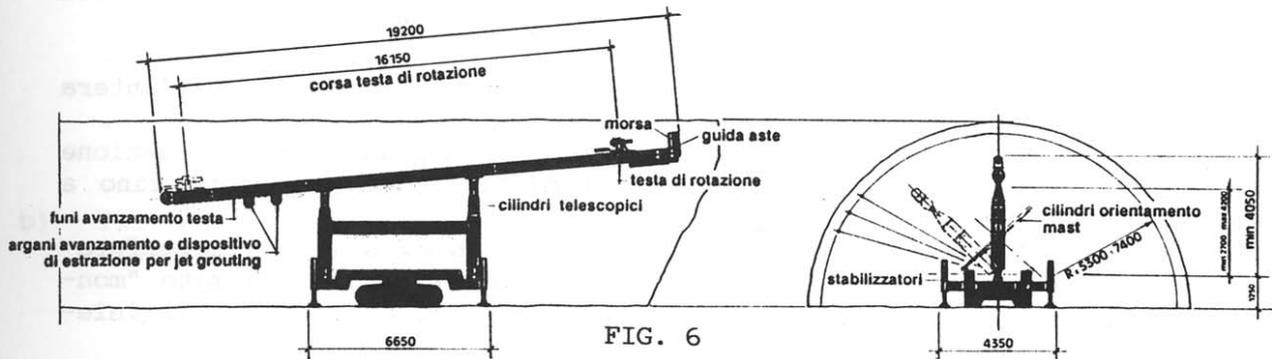


FIG. 6



FIG. 7

Un complesso di martinetti idraulici consente di posizionare il mast lungo l'arco di 180°; l'inclinazione rispetto l'asse della galleria può essere regolata fra 0° a 14°. (FIG. 7)

E' così possibile eseguire tutti i fori necessari ad un trattamento conico, profondi fino a 15 metri circa oltre il fronte di scavo, con un unico posizionamento della macchina e con una sola manovra per ogni foro.
(FIG. 8)

Le attrezzature sono state ulteriormente sviluppate, e oggi consentono una maggior flessibilità nella geometria dei trattamenti, l'inclinazione usuale è attorno al 10%, ed è possibile operare entro cavi di raggio variabile fra 4 e 7 metri.

Con le nuove macchine è possibile estendere il trattamento sull'intera sezione, ed eventualmente, anche nell'arco rovescio. L'insieme delle attrezzature è completato da un'impianto d'iniezione speciale, in grado di iniettare miscele cementizie con pressioni fino a 600÷700 Atm.

Alcuni sistemi utilizzano le stesse batterie di aste, sia per la perforazione, che per l'iniezione, grazie a uno speciale utensile chiamato "monitor", che funziona sia come testina di perforazione, che ugello di iniezione.

Infatti introducendo una valvola a sfera, si passa dal flusso assiale del fluido di perforazione (acqua) a quello radiale del jet-grouting attraverso gli ugelli del monitor. **(FIG. 9)**



FIG. 8

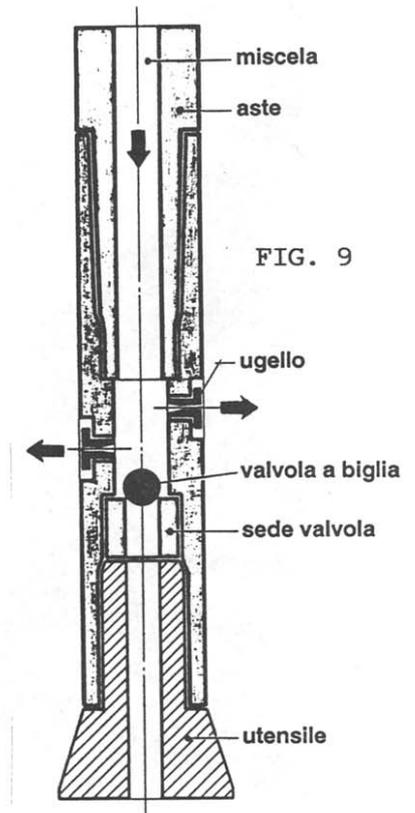


FIG. 9

7. GALLERIA DI CAMPIOLO ORGANIZZAZIONE DEL LAVORO E TEMPI DI LAVORAZIONE

Esaminiamo la dotazione di impianti e mezzi per l'esecuzione di una galleria, a un fornice solo, in terreni sensibili alla tecnologia del jet-grouting, prevedendo l'avanzamento in calotta seguito dai ribassi, secondo lo schema di cui alla FIG. 10.

Oltre agli usuali impianti di ventilazione, illuminazione, smaltimento di acque reflue e di distribuzione di energia elettrica, di acqua ed aria in pressione, opportunamente dimensionati per rispondere alle norme di igiene e di sicurezza sul lavoro e di protezione ambientale, di solito vengono previsti i seguenti macchinari specifici e non :

- a) per la lavorazione del jet-grouting:
 - una sonda di elevata potenzialità (170 CV) per i trattamenti di calotta tipo SR 500
 - una o due sonde di più ridotte dimensioni per i trattamenti nei piedritti
 - idoneo impianto di produzione delle miscele e di iniezione con le portate e pressioni come sopra indicate.

- b) Per la lavorazione di scavo convenzionale e sostegno dello stesso in presenza dei trattamenti colonnari:
 - due escavatori rovesci, uno con benna oscillante per eseguire meglio la profilatura dello scavo, l'altro con il martellone per la demolizione di trovanti interessanti la sezione della galleria.
 - Pala caricatrice e autocarri per il carico e trasporto del materiale di risulta.
 - Pompa autocarrata per la posa dello spritz-beton e pianale di servizio per la posa delle centine di sostegno e della rete metallica.

Tutti i mezzi devono avere la massima mobilità per facilitare lo scambio all'alternarsi delle lavorazioni.

Il trattamento colonnare suborizzontale in calotta (35÷40 colonne della lunghezza di 13 m) per una sezione utile di 10 m, chiede per la sua realizzazione tre turni di 8 ore per 2÷3 giorni, con una produzione media oraria di circa 6÷8 m di colonna trattata per macchina.

Per i piedritti sono previsti circa 30 m di trattamenti colonnare per metro di galleria spezzettati in circa 12÷14 trattamenti molto brevi, con elevata percentuale di perforazione a vuoto per cui la produttività scende molto e ogni unità produce circa 2÷3 m/h, un terzo della macchina di calotta.

Questa lavorazione di consolidamento dei piedritti non è sul percorso critico e segue a 100÷150 m dal fronte di avanzamento, e può, pertanto essere eseguita contemporaneamente alle altre lavorazioni, c'è tutto il tempo dell'intero ciclo di calotta per poter eseguire una sezione di 10 m.

Lo scavo viene eseguito con le seguenti fasi:

1) scavo di calotta; 2) strozzo; 3) piedritti; 4) arco rovescio. (FIG. 10)

Il piano d'imposta delle centine di calotta è scelto a m 5,50 dalla chiave della sezione teorica di scavo. Lo scavo relativo a una sezione di calotta consolidata (10,0 m) si svolge per tratte successive di 1÷2 m dovendosi provvedere, immediatamente dopo lo scavo stesso, dapprima al posizionamento delle centine metalliche, poi alla posa della rete metallica elettrosaldata e alla spruzzatura di un primo strato di spritz-beton (circa 10 cm).

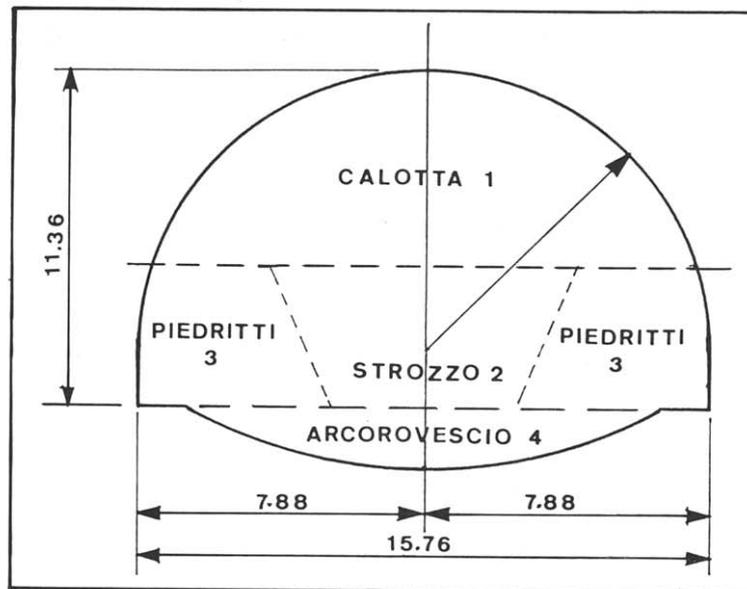


FIG. 10

Lo scavo viene eseguito con turni giornalieri di 8 ore durante ognuno dei quali operano 12 operai, 2 escavatori, 2 pale, autocarri e un pianale di servizio.

Il completamento dello spritz-beton, fino allo spessore di progetto viene effettuato nel terzo turno di lavoro. La produzione settimanale media nel caso di un fornice solo è di 10,0 m, pari a 2,0 m al giorno di sezione completa.

Di seguito all'avanzamento in calotta, 150÷200 m dietro e, subito dopo aver completato il trattamento colonnare nei piedritti, viene effettuato lo scavo dello strozzo per tratte di 10÷15 m.

Si prosegue poi con lo scavo dei piedritti per tratte di 3,0÷4,0 m su ogni paramento mantenendo uno sfasamento fra i due paramenti di almeno 10,0÷12,0 m. Completata la posa dei piedini delle centine e della rete elettrosaldata si esegue lo spritz-beton. Prima di procedere allo scavo dell'arcorovescio, si eseguono le murette armate in calcestruzzo per solidarizzare al piede le centine.

Nel complesso sono stati trattati circa 170 m di galleria con coperture variabili da pochi metri a circa 70 m; l'avanzamento degli scavi è stato eseguito in completa sicurezza con una media di 2,0 m al giorno.

In corso d'opera sono stati eseguiti vari controlli al fine di perfezionare le modalità esecutive e garantire la rispondenza del trattamento alle esigenze progettuali; in sequenza cronologica sono state effettuate le seguenti operazioni :

- controllo della densità e viscosità della miscela per rispondere alle prescrizioni progettuali ($c/w = 1$; $\gamma = 1,50 \text{ t/mc}$) e tenere sotto controllo la taratura della centrale automatica di confezionamento;

- l'esatto posizionamento della batteria di perforazione veniva controllato su ogni foro verificando l'inclinazione radiale e il punto di attacco tracciato sul fronte, questo controllo è importante per garantire il trattamento tridimensionale secondo la geometria richiesta dal progetto;
- un accorgimento interessante è la sequenza esecutiva delle colonne la quale impone il rispetto di una distanza minima fra le colonne in lavorazione in modo da evitare dilavamenti fra i trattamenti eseguiti e di effettuare le ultime colonne di chiusura dopo almeno 24 ore dal trattamento delle colonne adiacenti;
- durante lo scavo delle singole tratte si accerta la corretta esecuzione del trattamento conico, eventuali deviazioni delle colonne, e la completa compenetrazione delle stesse;
- carotaggi radiali accertano lo spessore del trattamento che è risultato variabile fra 0,55 e 0,70 m; sui campioni prelevati sono state effettuate le prove di schiacciamento che hanno fornito valori a rottura compresi fra 5 e 15 MPa.

8. VANTAGGI E SVANTAGGI DEL JET-GROUTING

Dall'analisi dell'organizzazione necessaria ci si accorge delle elevate incidenze delle risorse impiegate sulla produzione raggiunta, le incidenze migliorano nel caso di due fornici paralleli, perchè è possibile scambiare le due lavorazioni speciale e tradizionale, ma peggiorano terribilmente quando il jet-grouting diventa indispensabile per superare un imprevisto geologico, perchè in questo caso, si ha anche uno sconvolgimento di tutta l'organizzazione di cantiere.

E' chiaro che tutto ciò si ripercuote pesantemente sull'andamento economico della commessa, e di conseguenza sui prezzi delle lavorazioni relative specializzate.

Quasi tutti i capitolati, quando definiscono i prezzi dei trattamenti colonnari, di solito non prevedono di adeguare anche i prezzi di quelle lavorazioni convenzionali da eseguirsi in presenza ed in alternanza con le lavorazioni speciali, per cui si è costretti a scaricare sui prezzi di quest'ultime tutti quegli extra costi dovuti principalmente all'intermittenza delle lavorazioni, extra costi che sono usualmente sopportati dall'impresa generale.

Altri svantaggi della tecnologia sono concentrati nei seguenti punti :

- necessità di arrestare il trattamento di idrofratturazione e di iniezione ad alta pressione, almeno 3,0 m dal fronte d'attacco, per evitare lo sfondamento e il crollo del fronte stesso, con conseguenti oneri quindi di robusti rafforzamenti di questo con rete metallica e spritz-beton;
- impossibilità di proseguire, subito dopo il trattamento con le operazioni di scavo e di sostegno, per concedere il tempo necessario alla maturazione delle miscele iniettate.

Per contro la tecnologia del jet-grouting ha indubbiamente il vantaggio dell'elevato grado di sicurezza anche sotto il profilo antinfortunistico, che si manifesta come segue :

- l'operazione di consolidamento (idrofratturazione e mescolazione) si sviluppa tutta all'interno del terreno da trattare e quindi senza rischi per il personale addetto;
- il trattamento colonnare suborizzontale si traduce praticamente in un sondaggio continuo, distribuito lungo tutto il settore del trattamento, che, individuando e trattando in via preventiva eventuali sacche di terreni fluidi o falde sospese, annulla i rischi di possibili sifonamenti all'interno dello scavo;
- il consolidamento preventivo e la posa in opera dei sostegni durante la fase di scavo contribuiscono a realizzare un ambiente perfettamente sicuro;
- infine il diaframma conico del trattamento colonnare stabilizza sufficientemente il fronte di scavo anche quando l'ombrello è ridotto alla profondità della sola sovrapposizione.

9. PROPOSTA ALTERNATIVA

Come evoluzione dello schema di lavorazione illustrato, peraltro già largamente sperimentato, si può analizzare la seguente proposta, che prevede di realizzare il trattamento di consolidamento colonnare più avanti di una intera sezione. (FIG. 11)

Questo schema ha lo svantaggio di una maggior perforazione a vuoto, con l'aggiunta di un'asta alla batteria di perforazione. Il trattamento di consolidamento ha lo stesso sviluppo e viene realizzato ad una profondità maggiore. La perforazione a vuoto, però, si sviluppa tutta in terreno già trattato dove è possibile mantenere velocità di perforazione elevate (15÷20 m/h) e quindi con oneri contenuti.

Questo schema presenta i seguenti vantaggi :

- non è più necessario rafforzare il fronte di scavo per contenere l'elevata pressione d'iniezione, venendo questa effettuata molto dentro al fronte di scavo, oltre 14,0 m;
- è possibile impiegare attrezzature più potenti dotate di due slitte di perforazione con conseguenti notevoli riduzioni nei tempi di lavorazione;
- è possibile uniformare il trattamento nella zona dei piedritti a quello della calotta con un recupero economico notevole;
- la stabilità del fronte di scavo è migliore;
- è possibile ridurre la conicità dei trattamenti colonnari a valori del 4÷5%, col che si riducono sensibilmente gli inevitabili e costosi fuori sagoma del rivestimento definitivo;
- è possibile ridurre la sovrapposizione longitudinale fra i trattamenti a circa 1 m, col risultato di allungare la sezione utile da 10,0 m a 13÷14,0 m;
- si minimizza, per non dire che si annulla, il fenomeno di mobilitazione plastica del terreno al fronte di avanzamento verso lo scavo, perchè rimane sempre un'intera sezione consolidata davanti;
- si dà maggior tempo alla miscela iniettata di maturare e consolidarsi;
- si migliora ulteriormente il grado di sicurezza e di stabilità del sistema.

Praticamente le incidenze di lavorazione, espresse in metri di perforazione e i metri quadri di trattamento per metro lineare di galleria, rimangono inalterate, il ciclo ha la stessa durata, migliorano però di un 30÷40% le produzioni specifiche, che significano un risparmio in senso assoluto.

10. CONCLUSIONI

Il sistema d'avanzamento mediante jet-grouting applicato in orizzontale si è ormai affermato come il sistema operativo più idoneo allo scavo gallerie entro terreni di tipo sciolto.

Le ragioni di questo successo sono molteplici e vanno ricercate nella piena affidabilità del metodo, nella sua semplicità e nella sua versatilità ad essere adattato a differenti 'situazioni operative'.

I costi iniziali, già competitivi, si sono ulteriormente ridotti con la sua diffusione ed il suo perfezionamento.

Ma l'aspetto più importante che certamente ha giocato a suo favore è la grande sicurezza operativa garantita.

In 8 anni di applicazioni eseguite su un totale di parecchi chilometri di gallerie scavate in terreni incoerenti, si è conseguita una significativa riduzione di crolli ed incidenti in galleria.

Alla galleria Campiolo è quindi legata una tappa importante del progresso del Tunnelling.

Bibliografia

Lunardi P., Louis C. (1984) - Méthodes de présoutènement et pré-étanchement pour les travaux en souterrain, Journées d'études internationales, Lione

Louis C., Lunardi P. (1984) - Consolidation des sols par la technique de jet-grouting. Etat des connaissances et expériences, Colloque International "Renforcement en place des sols des roches", Parigi

Lunardi P., Mongilardi E., Tornaghi R. (1986) - Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo, Atti del Congresso Internazionale su "Grandi Opere Sotterranee", Firenze

Lavoro:	Linea F.S. Udine-Tarvisio Galleria "Campiolo"
Committente:	Ferrovie dello Stato
Impresa generale:	Italstrade S.p.A.
Impresa specializzata:	Rodio S.p.A.
Progettazione esecutiva:	Rocksoil S.p.A.