



ITA/AITES
International Tunnelling Association
Association Internationale des Travaux en Souterrain



SIG
Società Italiana Gallerie

Congresso Internazionale su «Grandi Opere Sotterranee»
International Congress on «Large Underground Openings»
Congrès International sur «Grands Ouvrages en Souterrain»

Firenze, Italy, 8-11 giugno 1986

P. LUNARDI - E. MONGILARDI - R. TORNAGHI

**Il preconsolidamento mediante jet-grouting
nella realizzazione di opere in sotterraneo**

ESTRATTO / REPRINT / TIRE A PART



VOLUME II

ATTI - PROCEEDINGS - COMPTES RENDUS

IL PRECONSOLIDAMENTO MEDIANTE JET-GROUTING NELLA REALIZZAZIONE DI OPERE IN SOTTERRANEO

P. LUNARDI

Università di Firenze

E. MONGILARDI

Direttore Tecnico RODIO S.p.A.

R. TORNAGHI

Responsabile Sezione Geotecnica RODIO S.p.A.

1. INTRODUZIONE

La realizzazione di opere in sotterraneo può richiedere interventi preventivi di consolidamento, particolarmente utili ed impegnativi in terreni incoerenti o coesivi di bassa consistenza, ed ancora più in zone urbane per la salvaguardia di fabbricati e servizi.

Le tecniche più note sono quelle connesse all'iniezione di adeguate miscele ed al congelamento temporaneo, che ha il campo di applicazione più interessante e competitivo nei terreni a granulometria più fine, cioè oltre i limiti pratici delle iniezioni tradizionali basate sulla permeazione di fluidi atti ad impregnare il terreno senza alterarne sensibilmente la struttura.

Questa tecnica è applicabile con una ampia varietà di miscele (dalle sospensioni cementizie alle soluzioni chimiche) in una gamma di terreni che può estendersi fino ai materiali limo-sabbiosi; ma le incertezze ed i costi aumentano iperbolicamente man mano che ci si avvicina al limite di permeabilità compatibile con una efficace impregnazione, che è dell'ordine di 10^{-4} cm/s per le soluzioni più penetranti (a base di resina).

In un trattamento concettualmente impostato sulla permeazione le portate e le pressioni devono essere regolate in modo da evitare fenomeni di idrofratturazione ("claquage"). Tuttavia, l'efficace trattamento di terreni eterogenei comporta sempre fenomeni più o meno accentuati di claquage quando si iniettano sospensioni.

Il problema è quello di controllare questi effetti in modo da renderli utili ad un proficuo trattamento di massa limitando il ricorso ad iniezioni chimiche complementari.

Si realizza quindi un procedimento misto con effetti prevalenti di permeazione o fratturazione a seconda della natura del terreno e dei parametri operativi adottati.

In materiali difficilmente penetrabili, l'idrofratturazione può essere una tecnica deliberata per ottenere un effetto di incapsulazione mediante un reticolo di fratture create e contemporaneamente riempite con miscele reologicamente idonee; nel caso estremo di sospensioni molto dense si tende alla formazione di bulbi o lenti con spostamento del terreno circostante.

La compattazione ottenibile dipende dalla permeabilità del terreno "incapsulato" o "spostato" e non può quindi essere rilevante nei depositi limo-argillosi.

Questi procedimenti sono comunque utilizzabili solo in casi particolari e con molte cautele, per lo più come pronti interventi di ricomprensione o per la correzione di cedimenti differenziali.

Il grande interesse delle tecniche più recenti basate sul

"jet grouting" è dovuto alla peculiare capacità di disgregare il terreno miscelandolo contemporaneamente con un fluido stabilizzante.

Si può quindi trattare qualsiasi tipo di terreno che richieda il miglioramento delle proprietà meccaniche con una semplice sospensione cementizia, evitando i problemi di penetrabilità in rapporto alla granulometria del mezzo e quelli eventualmente connessi al costo, alla durabilità ed all'inquinamento di prodotti chimici, come pure le limitazioni dei metodi di incapsulazione e spostamento.

In effetti il jet grouting può offrire una valida alternativa alle iniezioni convenzionali ed anche talvolta ai diaframmi gettati in opera, al congelamento e ad altri metodi di stabilizzazione profonda.

2. PRESOSTEGNO E PRECONSOLIDAMENTO

Se il jet grouting rappresenta una valida alternativa alle iniezioni tradizionali per gli interventi specialistici nelle opere civili in genere, ciò vale a maggior ragione nel campo delle gallerie. Infatti, mai come negli interventi di stabilizzazione in sotterraneo è indispensabile che sia garantita da un lato l'ottimizzazione dell'energia spesa per il consolidamento del terreno e dall'altro l'attendibilità dei risultati conseguiti.

Basta pensare al meccanismo che assicura la stabilità di un cavo realizzato in terreni incoerenti o debolmente coesivi che per autosostenersi hanno bisogno di trattamenti preventivi di consolidamento. La mobilitazione degli sforzi di taglio al contorno della cavità all'atto dello scavo ed il conseguente innesco dell'"effetto arco" è tanto più immediata e tanto meno foriera di fenomeni deformativi quanto più il flusso di tensioni deviato, si canalizza in una fascia di terreno dotato di caratteristiche meccaniche il più possibile uniformi e sufficienti a sopportare le sollecitazioni indotte restando in campo elastico.

Operando con iniezioni tradizionali si fa riferimento, nella progettazione degli interventi di consolidamento in avanzamento, a fasce di terreno trattato con potenze dell'ordine del raggio, quindi di almeno qualche metro; operando invece con il jet grouting, grazie alla possibilità di ottimizzare l'energia di iniezione, di avere garantita l'uniformità del terreno e di poter quindi contare su notevoli incrementi di resistenza al taglio del terreno naturale, si può fare affidamento su spessori molto più ridotti, almeno dell'ordine dei decimetri.

Le fasce di terreno preconsolidato ottenute per accostamento di colonne realizzate a partire dal perimetro dello

scavo e lanciate come marciavanti oltre il fronte di avanzamento, rappresentano la risposta più efficace e più moderna al problema della stabilità delle gallerie da scavarsi nei terreni incoerenti o debolmente coesivi, una risposta che una volta per tutte ridimensiona l'impiego di infilaggi metallici (tubfix, micropali, etc.) che essendo dei semplici "presostegni" hanno il grosso difetto di non far partecipare il terreno alla statica della cavità sia nel breve che nel lungo termine.

3. CENNI TECNOLOGICI

3.1. Metodologie operative

Il termine "jet grouting" implica l'iniezione attraverso piccoli ugelli con pressioni assai più elevate di quelle convenzionali (fino a 600 atm o più).

Le tecniche attuali consistono nel disgregare il terreno miscelandolo nel contempo con una sospensione cementizia oppure nella rimozione della frazione più fine mediante jetting di aria e acqua per ampliare la diffusione del trattamento, con un effetto di parziale sostituzione.

Il jet grouting può quindi comportare l'uso di un singolo fluido come mezzo disgregante e stabilizzante oppure di due o tre fluidi: aria o aria + acqua come agenti disgreganti e dilavanti, mentre alla sospensione cementizia è riservata essenzialmente la funzione stabilizzante.

La sequenza operativa per il primo procedimento (fig. 1) 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 e contemporanea estrazione e rotazione del monitor.

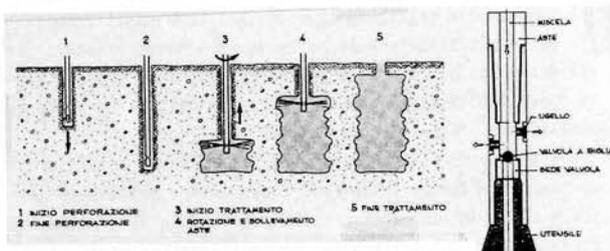


Fig. 1 - Rodinjet-1:
fasi operative e particolare del monitor.

La dimensione e le proprietà meccaniche delle colonne di terreno stabilizzato dipendono dalle caratteristiche naturali del mezzo e dagli effetti combinati dei vari parametri operativi: composizione della miscela, portata e pressione in rapporto al numero ed al diametro degli ugelli, velocità di rotazione e di risalita del monitor.

Il diametro delle colonne (da 0,4 a 0,9 m in generale) può essere incrementato fino a 2 metri e più con il procedimento a 3 fluidi, ma la maggiore flessibilità operativa del primo ne ha diffuso maggiormente l'impiego nel campo delle gallerie ed in particolare per trattamenti conici suborizzontali in avanzamento. Ci soffermeremo quindi sulle applicazioni basate su un unico fluido con particolare riferimento al procedimento Rodinjet-1 messo a punto dall'Impresa Rodio.

3.2. Attrezzature

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

L'avanzamento a rotazione è preferibile nei terreni a granulometria media fine in quanto richiede sonde leggere.

L'impiego di una testa di rotazione con mandrino passante su un mast di 4-5 metri consente di operare con una singola asta fino a 16-17 metri di profondità.

In terreni incoerenti grossolani o comunque in presenza di blocchi lapidei la roto-percussione può essere più conveniente in termini di produzione, ma richiede attrezzature più ingombranti se si vogliono minimizzare i tempi di manovra; il mast deve avere infatti una lunghezza analoga a quella delle aste, non potendo utilizzare una testa con mandrino passante.

La fig. 2 mostra lo schema della prima attrezzatura realizzata appositamente dalla Rodio per perforazioni suborizzontali a rotopercussione (SR 500).

Un complesso di martinetti idraulici consente di ruotare il mast di 180° con inclinazioni regolabili fino a 14° (25%) rispetto all'orizzontale.

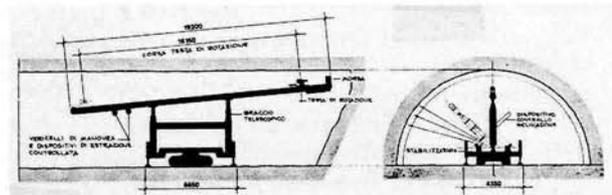


Fig. 2 - Attrezzatura a rotopercussione SR 500.

Ne consegue la possibilità di eseguire tutti i fori necessari ad un trattamento conico fino a 15 metri circa oltre il fronte di scavo con un unico posizionamento della macchina e con una sola manovra per foro.

E' stata in seguito realizzata una attrezzatura (SR 510), attualmente in corso di utilizzazione per la Galleria Ferroviaria Monte Olimpino. Questa nuova macchina aggiunge notevoli vantaggi operativi alle caratteristiche fondamentali della SR 500, essendo dotata di una piattaforma mobile che consente una più diretta accessibilità dell'operatore all'imposta dei fori ed una maggiore versatilità nella geometria dei trattamenti (foto 1).

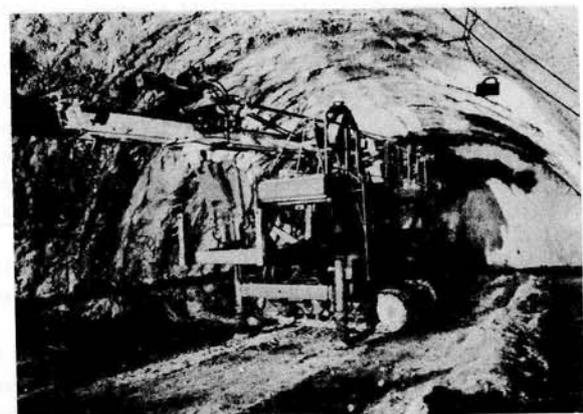


Foto 1 - Attrezzatura a rotopercussione SR 510.

Con una inclinazione usuale attorno al 10% è possibile operare entro scavi di raggio variabile fra 4 e 7 metri, mentre con la SR 500 il campo è compreso fra 5 e 6 metri circa.

Il trattamento viene eseguito mediante una pompa speciale in grado di iniettare miscele cementizie con pressioni fino a 600-700 atm.

La miscela viene confezionata in centrali automatiche concepite in modo da garantire un preciso dosaggio e la fornitura delle quantità necessarie per un trattamento continuo (da 5 a 8 m³/ora).

Nel procedimento Rodinjet-1 la stessa batteria di aste viene usata sia per la perforazione che per l'iniezione.

Lo schema del monitor, solidale con l'utensile di perforazione, è illustrato nel particolare (a destra) della fig.1.

Al termine dell'avanzamento si introduce una valvola a biglia per passare dal flusso assiale del fluido di perforazione a quello radiale del jet grouting attraverso gli ugelli del monitor.

4. CRITERI DI PROGETTO

4.1. Indagini preliminari

Per accertare la fattibilità del jet grouting ed orientare la scelta dei parametri operativi in base alle esigenze di progetto si richiedono le seguenti indagini di carattere generale (cioè valide anche per altri tipi di intervento) e specifico per il metodo in oggetto:

- sondaggi atti a fornire dettagliati profili geognostici e dati idrologici
- semplici prove in situ (penetrometriche statiche o SPT) per avere indicazioni sulla consistenza di terreni coesivi o sulla densità relativa di formazioni incoerenti
- prove di classificazione su campioni rappresentativi per determinare la granulometria dei materiali incoerenti e nel caso di terreni coesivi: l'umidità, i limiti di Atterberg e possibilmente le caratteristiche volumetriche
- prove di laboratorio su miscele cementizie ed impasti miscela-terreno in proporzioni variabili entro un campo di realizzabilità pratica
- prove di jet grouting in situ per la messa a punto dei parametri operativi e per fornire, se necessario, più dettagliate informazioni utili alla progettazione esecutiva.

Le indagini "specifiche" possono essere più o meno impegnative a seconda dell'importanza del lavoro e delle garanzie richieste, ma il programma sperimentale è comunque più semplice nei confronti di quanto sarebbe generalmente necessario per garantire il buon esito di iniezioni basate sulla "permeazione".

4.2. Geometria dei trattamenti

La flessibilità applicativa del jet grouting consente la soluzione di un'ampia varietà di problemi comportanti l'impermeabilizzazione od il consolidamento di terreni secondo adeguati schemi geometrici quali ad esempio:

- trattamenti nastroforni continui mediante una o più file di colonne verticali secanti per formare diaframmi impermeabili od opere di sostegno, che possono anche avere

forma circolare od ellittica per la protezione di scavi profondi

- trattamenti di massa con elementi verticali più o meno ravvicinati per incrementare la capacità portante di fondazioni o per migliorare le proprietà meccaniche di terreni interessati da scavi in sotterraneo; in quest'ultimo caso gli interventi vengono effettuati, se possibile dalla superficie, attorno alla prevista sezione della galleria od interessando se necessario anche il volume di terreno da scavare
- trattamenti suborizzontali in avanzamento per consentire lo scavo di gallerie profonde, quando gli interventi dall'alto sono impossibili o troppo onerosi.

4.3. Scelta della miscela stabilizzante

I componenti ed i dosaggi atti a soddisfare le esigenze di progetto possono essere definiti con criteri assai meno selettivi rispetto al caso delle iniezioni convenzionali.

Per quanto riguarda le proprietà reologiche iniziali, la viscosità deve essere abbastanza contenuta per consentire un efficace trattamento di adeguata estensione.

Nei problemi di consolidamento si può usare una semplice sospensione cementizia, scegliendo il rapporto cemento/acqua (normalmente in una gamma fra 0,5 e 1,2) in base alle proprietà meccaniche da ottenere e tenendo conto di vari altri fattori da definire a priori o da stimare, quali: la granulometria e la permeabilità del terreno in ogni caso, il grado di umidità nelle formazioni coesive di bassa permeabilità, la quantità media di miscela in rapporto al volume di terreno trattato.

Nelle formazioni granulari permeabili è da prevedersi un considerevole effetto di drenaggio contrariamente al caso di terreni coesivi di bassa permeabilità. E' questa la principale motivazione del fatto che la resistenza ottenibile (essenzialmente connessa al rapporto cemento/acqua finale del complesso terreno-miscela) è molto più elevata in sabbie e ghiaie che in materiali limo-argillosi.

Il quantitativo di cemento può essere limitato da una adeguata scelta della composizione e del volume di miscela iniettata, entro campi definiti dall'esperienza già acquisita e da prove specifiche preliminari in modo da ottenere un buon risultato al minimo costo.

L'aggiunta di un prodotto stabilizzante come la bentonite può essere conveniente per ridurre il drenaggio nei terreni granulari quando l'obiettivo principale è la riduzione della permeabilità.

4.4. Scelta dei parametri operativi

L'esperienza acquisita in appositi campi di prova ed in ormai numerose applicazioni pratiche ha consentito di definire i principali parametri operativi contenendone le variabilità entro i seguenti limiti usuali:

- pressione: da 300 a 600 atm
- diametro degli ugelli: da 1,5 a 3 mm
- velocità di rotazione del monitor: da 10 a 20 giri/min.
- velocità di risalita: da 25 a 50 cm/min.
- portata d'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.

In ogni specifico caso la scelta è ovviamente condizionata dal tipo di terreno e dai risultati che si vogliono ottenere..

Una volta stabilita la portata in base al diametro degli ugelli ed alla pressione, la velocità di risalita è determinata dal volume specifico di miscela che si prevede di iniettare. In generale l'estensione e la omogeneità del trattamento richiedono di aumentare la pressione e ridurre le velocità di rotazione ed estrazione man mano che si passa a terreni più fini od addensati.

Un altro importante fattore è la regolazione dello spurgo in fase sia di perforazione che di iniezione, in modo da evitare eccessivi effetti di spostamento laterale e sollevamento; nel caso estremo di formazioni coesive sature il materiale rifluito (terreno e miscela nel loro complesso) dovrebbe corrispondere ad una elevata percentuale del volume di miscela immessa, data l'entità scarsa o nulla del drenaggio presumibile, come vedremo nell'esempio pratico della Metropolitana di Singapore.

4.5. Applicabilità ed effetti

Come già detto in precedenza i campi di applicabilità sono assai ampi per quanto riguarda sia i tipi di terreno (praticamente qualsiasi formazione non lapidea) che i tipi di intervento, attuabili con la stessa flessibilità delle iniezioni convenzionali dall'alto od in avanzamento per le opere in sotterraneo (par. 4.2.).

Pur con la più adeguata scelta dei parametri operativi, la dimensione e le proprietà meccaniche delle colonne ottenibili con il procedimento a fluido singolo (Rodinjet 1) sono essenzialmente condizionate dalla natura del terreno.

Nelle formazioni incoerenti grossolane si possono raggiungere diametri da 0,7 a 0,9 metri, mentre i depositi coesivi saturi non consentono generalmente di superare i 0,5 - 0,6 metri.

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche a lungo termine, il trattamento di sabbie e ghiaie comporta resistenze alla compressione variabili da 100 a 300 kg/cm², riducibili ad una più modesta entità operando con miscele stabili a basso dosaggio di cemento, se richiesto da valutazioni tecniche od economiche. Nel caso estremo opposto di formazioni limo-argillose sature di media-alta plasticità non è generalmente possibile superare i 20 - 30 kg/cm² per i motivi citati nel par. 4.3.

Per i terreni da limosi poco argillosi a limo-sabbiosi si ha una gamma intermedia di resistenze massime ottenibili usualmente (da 30 a 100 kg/cm² circa).

L'esperienza ci fornisce dunque degli ordini di grandezza, che lo studio preliminare di ogni singolo caso può meglio precisare riducendo i margini di incertezza in fase di progettazione.

E' comunque inevitabile che in terreni eterogenei le dimensioni e le proprietà meccaniche delle colonne siano soggette ad una variabilità dipendente dalla successione stratigrafica.

Per rendere più omogenei i risultati si possono variare i parametri operativi (esclusa la composizione della miscela) adattandoli alla natura delle singole formazioni attraversate, se ben differenziabili; ai fini di una maggiore flessibilità nei casi di più fitte alternanze si sta sperimentando la possibilità di regolare automaticamente i para-

metri di iniezione in base all'elaborazione dei parametri di perforazione registrati con sonda strumentata (diagramme).

4.6. Controlli

Nel corso del lavoro si eseguono i seguenti tipi di controllo con modalità e frequenze da programmare in base alle specifiche esigenze:

- (a) - controlli iniziali sulla miscela
- (b) - livellazioni di precisione per accertare eventuali movimenti verticali della superficie e di strutture esistenti
- (c) - misure inclinometriche a complemento delle livellazioni ove si temano gli effetti di spostamenti orizzontali
- (d) - valutazioni quantitative e qualitative (peso di volume e resistenza) del materiale defluito.

Questi ultimi controlli sono essenziali per una stima della quantità di cemento rifiutata e quindi della reale composizione del terreno trattato, a verifica dei dati ottenibili direttamente sulle colonne dopo l'ultimazione.

I controlli successivi al trattamento possono essere effettuati con una o più delle seguenti modalità:

- (e) - carotaggi con prelievo di campioni da sottoporre a prove di laboratorio
- (f) - esame diretto mediante scavi appositi di ispezione o nel corso di lavori in sotterraneo che offrano l'opportunità di rilievi geometrici e qualitativi con l'eventuale possibilità di campionamenti rappresentativi
- (g) - prove penetrometriche statiche o dinamiche e pressiometriche per valutare l'incremento di capacità portante del terreno contenuto fra colonne di diametro inferiore all'interasse
- (h) - prove di controllo mediante carotaggio sonico, sia per la valutazione del miglioramento delle caratteristiche meccaniche, sia per verificare la continuità del trattamento e l'eventuale saldatura di colonne contigue.

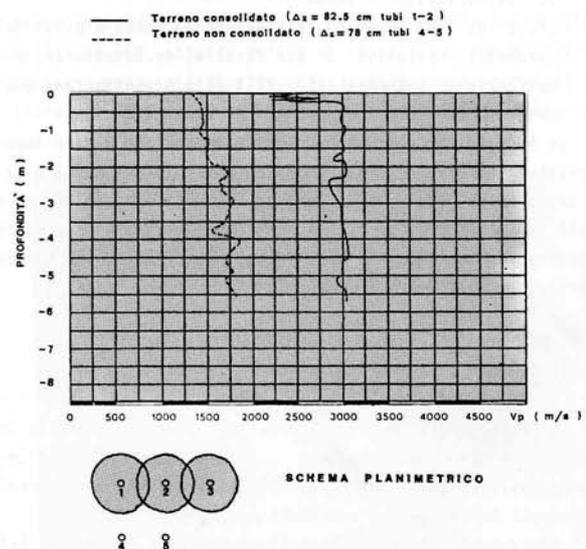


Fig. 3 - Esempio di carotaggio sonico.

In pratica si predispongono a distanze prefissate dei tubi verticali entro i quali far scorrere, durante l'analisi, le sonde (emittente e ricevente).

La registrazione continua della velocità di propagazione degli impulsi, durante la lenta traslazione delle sonde, permette di ottenere diagrammi del tipo esemplificato nella fig. 3, in base ai quali si può stimare l'incremento di qualità meccanica del terreno consolidato.

5. ESEMPI DI APPLICAZIONI

5.1. Gallerie metropolitane

Nell'ambito dei più impegnativi interventi in aree urbane, merita di essere segnalata la prima importante applicazione del metodo Rodinjet 1 operando dalla superficie ed in formazioni costituite in gran parte da argille molli di alta plasticità.

Questo lavoro riguarda il Lotto 106 della Metropolitana di Singapore (Mass Transit System) e comprende 4 tronchi di galleria con una lunghezza complessiva di circa 380 m.

La geologia dell'Isola di Singapore è assai complessa, comportando svariati tipi di terreno come depositi litorali, estuarini e fluviali, argille marine e rocce tenere sedimentarie.

In generale, sotto una copertura sabbiosa di qualche metro, si hanno argille torbose di bassa consistenza, argille marine e depositi fluviali fino a 15 o più metri di profondità.

La base di questa sequenza è costituita da formazioni coesive compatte o rocce tenere; la falda acquifera si trova a soli 1 - 2 metri sotto il livello stradale.

In queste condizioni idrogeologiche e data l'ubicazione altimetrica delle gallerie (in generale fra 10 e 18 metri circa sotto il p.c.) era necessario un preconsolidamento del terreno da scavare sopra il substrato compatto, per la sicurezza dei servizi di pubblica utilità e degli edifici circostanti.

La soluzione tecnica prescelta è stata quella del trattamento dall'alto mediante jet grouting, esteso a tutta la sezione di scavo fino al limite inferiore del terreno da migliorare, e limitato superiormente in modo da creare un arco di terreno consolidato dello spessore di 1,5 metri attorno alla sezione di scavo; lo spessore è stato aumentato a 3 metri in prossimità della Stazione (fig. 4 a destra) ove non era possibile operare con lo scudo.

La fig. 4 mostra gli stralci planimetrici delle due zone di intervento, due sezioni tipo e la distribuzione planimetrica delle colonne realizzate (a maglia triangolare equilatera con lato di 0,7 metri).

Per verificare la soluzione proposta e per la messa a punto del programma esecutivo è stato attuato un campo prove su grande scala, eseguendo un complesso di 62 colonne con interassi da 0,6 a 0,8 metri e diverse quantità di miscela con rapporto cemento/acqua = 0,6 (da 187 a 444 l/m).

L'esame visivo delle colonne, che erano state distribuite in modo da proteggere un successivo scavo d'ispezione a sezione quadrata, ha consentito di definire la geometria del trattamento (fig. 4).

I risultati di 8 sondaggi e delle analisi di laboratorio su 40 campioni hanno confermato l'ordine di grandezza delle proprietà meccaniche previste in base alle indagini preliminari (resistenza media attorno a 6 kg/cm² a compressione semplice dopo 1 mese di maturazione).

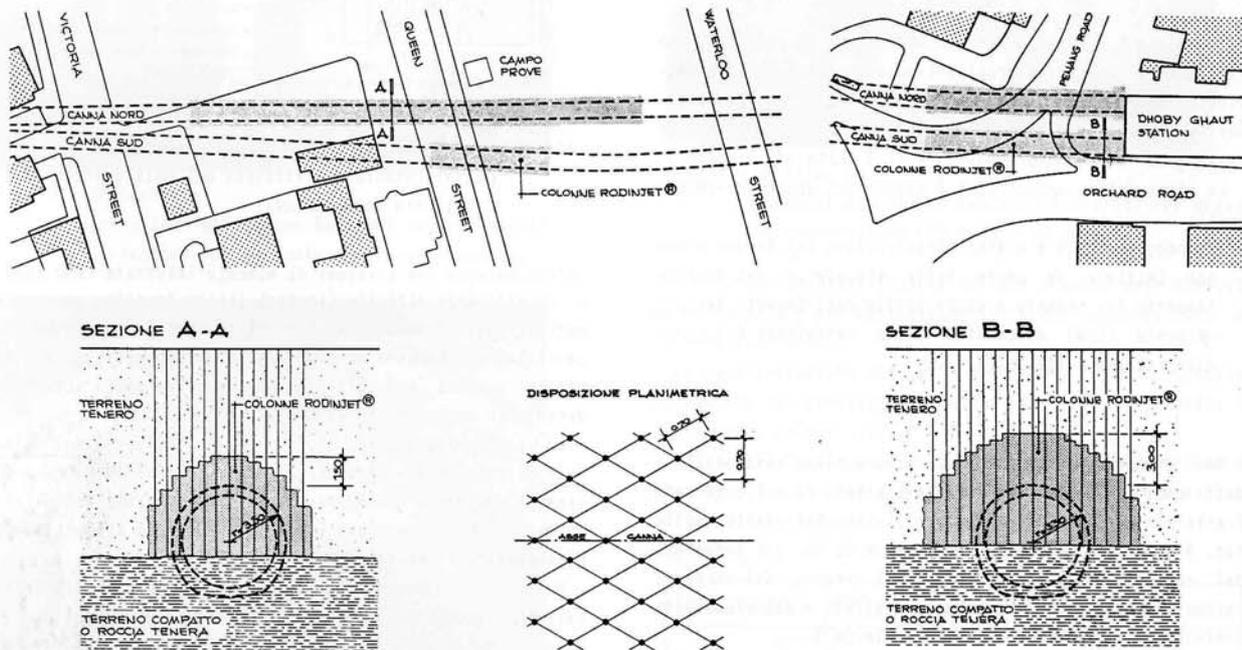


Fig. 4 - Metropolitana di Singapore: schemi di trattamento mediante Rodinjet-1.

Per contro la notevole entità dei sollevamenti e dei movimenti orizzontali, rilevati mediante livellazioni e misure inclinometriche, hanno richiesto modifiche operative atte a minimizzare tali effetti, favorendo al massimo lo spurgo.

Il problema è stato risolto con opportune messe a punto delle modalità di perforazione e di iniezione.

Nel complesso si sono realizzate oltre 10.000 colonne con il trattamento di circa 9.400 m³ di terreno, contenendo i sollevamenti entro i limiti prescritti di sicurezza (2-3 cm).

Oltre alle sistematiche livellazioni i controlli in corso d'opera comprendevano prelievi continui del materiale rifluito, carotaggi e prove penetrometriche nel terreno trattato.

Le analisi di laboratorio su centinaia di campioni ci hanno consentito interessanti elaborazioni e correlazioni statistiche, delle quali daremo ora un sintetico resoconto.

Nella tabella A sono riportate le medie dei dati sperimentali (peso di volume e resistenza) e delle composizioni stimate per quanto riguarda sia il terreno trattato che il materiale rifluito.

TABELLA A

campioni analizzati		γ	R	R ₀	C/W	C	M	S	w _s	μ
terreno trattato (colonne Rodinjet)	gruppo A	1,408	4,88	40	0,349	268	767	373	0,86	0,536
	gruppo B	1,609	14,71	80	0,429	280	652	687	0,27	0,559
	medie	1,531	10,90	70	0,395	276	699	556	0,43	0,550
materiale rifluito (medie)		1,614	5,19	70	0,272	175	642	797	0,44	0,350

γ = peso di volume (t/m³)
R = resistenza alla compressione (kg/cm²)
R₀ = indice di resistenza (kg/cm²)
R = R₀ (C/W)²

C, M, S = contenuti di cemento, acqua e terreno secco (kg/m³)
w_s = contenuto di acqua terreno inglobato
 μ = rapporto volumetrico fra miscela e impasto terreno + miscela

I campioni del gruppo A si riferiscono alle formazioni argillose più plastiche e talvolta torbose; il basso peso di volume del terreno trattato (1,4) e l'alto contenuto d'acqua stimato per il terreno naturale incluso (86%) lo confermano.

Il gruppo B comprende invece una gamma di materiali che si estende dai limi argillosi meno plastici ai limi sabbiosi, comportando un maggior peso di volume (1,6), un minor contenuto d'acqua del terreno inglobato (27%) ed una resistenza mediamente superiore di 3 volte (14,7 kg/cm²).

La stima delle composizioni è basata sui seguenti presupposti:

drenaggio nullo e quindi conservazione del tenore d'acqua iniziale da parte della miscela e del terreno rapporto fra cemento e acqua totale dell'impasto terreno-miscela (C/W) deducibile dalla resistenza R in base alla relazione statistica:

$$R = R_0 \cdot (C/W)^2$$

Per affinare l'analisi statistica abbiamo considerato i dati medi generali del terreno trattato (A + B), in raffronto con quelli del materiale rifluito. Nei grafici della fig. 5 si sono riprodotti, in funzione di R₀, gli andamenti del rapporto C/W, del contenuto di cemento, del rapporto volumetrico fra miscela e terreno trattato e del risultante contenuto d'acqua del terreno naturale (w).

L'intersezione fra le due curve dell'ultimo grafico ci consente di definire il valore di R₀ (70 kg/cm²) al quale corrisponde lo stesso valore di w_s (43%) per il terreno naturale contenuto sia nelle colonne che nello spurgo.

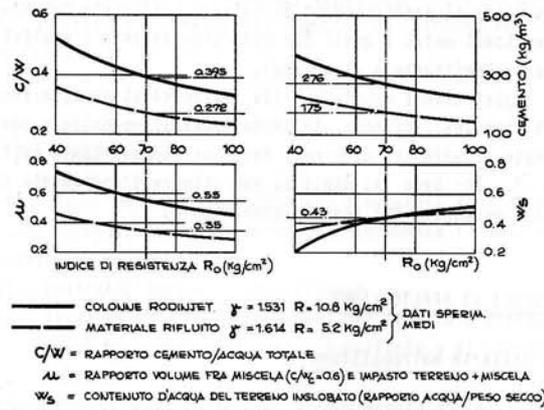


Fig. 5 - Metropolitan di Singapore: correlazioni fra indice di resistenza e composizione del terreno trattato mediante Rodinjet-1.

Il contenuto di miscela risulta pari a 550 l/m³ (molto prossimo ai 600 teorici di progetto) e notevolmente inferiore nel materiale rifluito (350 l/m³).

Da queste proporzioni si può pervenire ad un bilancio globale, introducendo anche il diametro D della colonna realizzata (fig. 6).

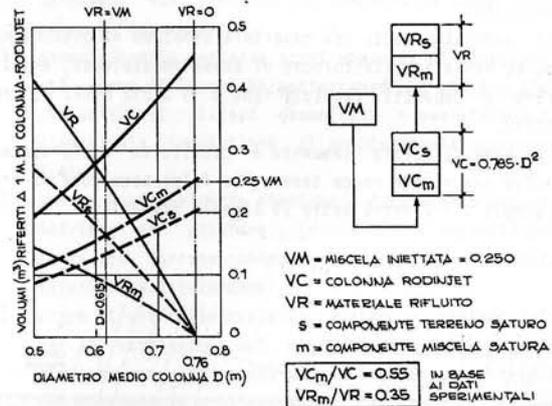


Fig. 6 - Metropolitan di Singapore: interpretazione statistica dei dati sperimentali (bilancio volumetrico).

L'equivalenza fra i volumi di miscela iniettata (250 l/m) e di materiale rifluito (ipotesi lecita in prima approssimazione data la modesta entità dei movimenti indotti in superficie) corrisponde ad un diametro di 0,6 metri circa, in ottimo accordo con l'ordine di grandezza medio accertato durante lo scavo delle gallerie (foto 2).

La realizzazione della Linea 2 della Metropolitan Milanese ha comportato estesi interventi di consolidamento preventivo mediante iniezioni tradizionali, basate essenzialmente sulla permeazione (soluzioni chimiche a complemento di sospensioni cementizie stabili).

Nei lavori attualmente in corso per la Linea 3 le motivazioni ecologiche hanno imposto sinora l'uso quasi esclusivo di sospensioni cementizie, con effetti spesso predominanti di "incapsulazione" (par. 1).

La preclusione alle miscele chimiche già usate in precedenza, ha quindi stimolato la sperimentazione di altre tecniche complementari od alternative come il jet grouting.

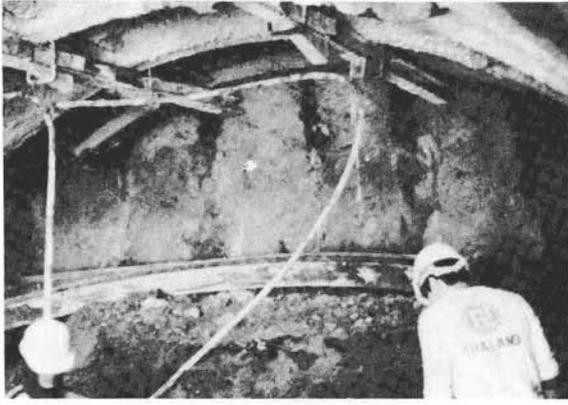


Foto 2 - Metropolitana di Singapore:
fronte di scavo stabilizzato.

Gli interventi sinora eseguiti e programmati mediante Rodinjet-1 riguardano la protezione dei cunicoli di preavanzamento, entro i quali si realizzano poi le raggere di fori equipaggiati con tubi valvolati per il trattamento protettivo dello scavo a piena sezione (fig. 7-g).

Le foto n. 3 e 4 mostrano la fase esecutiva del jet-grouting suborizzontale ed il fronte dello scavo finale con le colonne Rodinjet attorno al cunicolo.

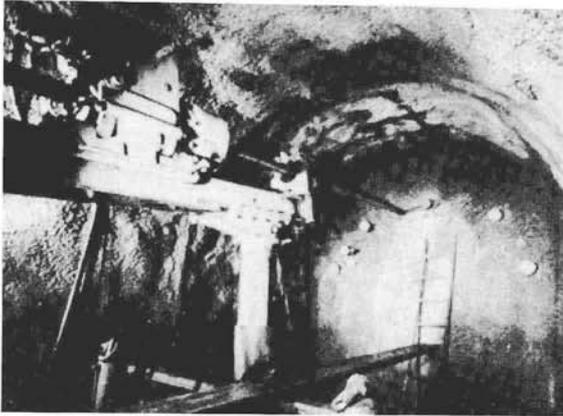


Foto 3 - MM Linea 3:
esecuzione di colonne Rodinjet suborizzontali a protezione del cunicolo di pre-avanzamento.

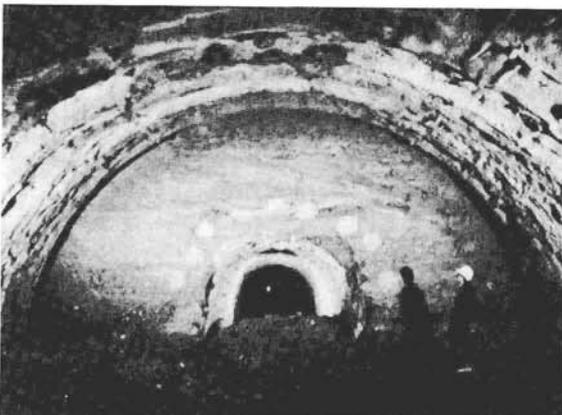


Foto 4 - MM Linea 3:
fronte della galleria di linea con vista delle colonne Rodinjet.

Queste modalità operative hanno consentito un sistematico controllo della geometria (che è risultata conforme al progetto per quanto riguarda l'inclinazione delle colonne ed il diametro medio previsto di 0,7 m circa) ed il prelievo di campioni con notevoli dimensioni (foto 5).

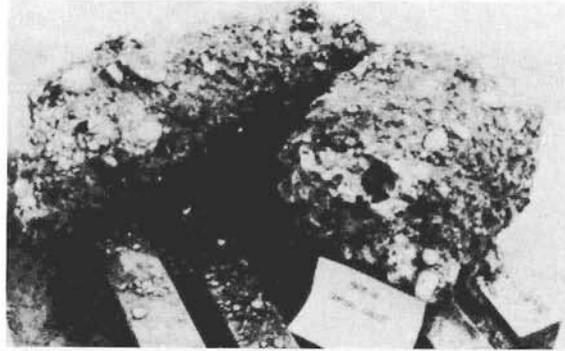


Foto 5 - MM Linea 3:
campioni di colonne Rodinjet.

Da questi campioni si sono ricavati numerosi provini prismatici con base di 15 cm e altezza di 30 cm, per la determinazione delle caratteristiche di resistenza alla compressione e di deformabilità (foto 6).

A quest'ultimo proposito i provini sono stati strumentati con 2-3 ponti estensimetrici nel caso di ghiaia prevalente e con unico ponte centrale per una serie di campioni costituiti da sabbia media fine più o meno limosa.

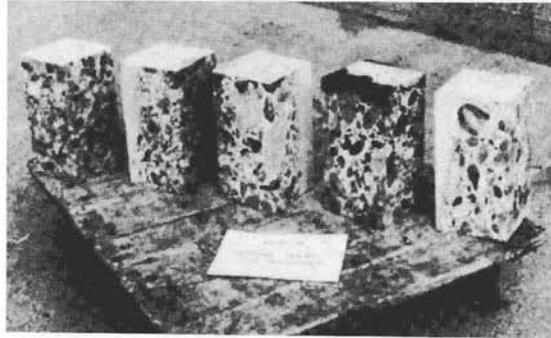


Foto 6 - MM Linea 3:
campioni di colonne Rodinjet preparati per prove di compressione (15 x 15 x 30 cm).

I dati sperimentali (valori estremi e medi) sono elencati nella Tabella B con distinzione fra i due suddetti tipi di terreno trattato.

Le caratteristiche del primo gruppo di campioni (ghiaia prevalente con sabbia) sono mediamente prossime a quelle di un discreto calcestruzzo.

Nell'ambito delle sabbie si registra lo stesso ordine di grandezza della resistenza ma un modulo di deformazione nettamente inferiore.

TABELLA B

tipi di terreno trattato mediante Rodinjet	peso di volume γ (t/m ³)	resistenza R (kg/cm ²)	deformazione ϵ (%)	modulo E (kg/cm ²)	E/R	
ghiaia con sabbia	min.	2,075	106	0,0220	119.800	572
	max.	2,410	309	0,0699	291.500	1.818
	media	2,240	193	0,0438	175.950	913
sabbia media-fine	min.	1,680	137	0,0806	54.340	181
	max.	1,840	232	0,1480	75.150	497
	media	1,745	180	0,1105	64.950	362

ϵ = deformazione assiale corrispondente a 0,4 R
Modulo elastico secante E = 0,4 R/ ϵ

Provini - 15 x 15 x 30 cm strumentati con ponti estensimetrici

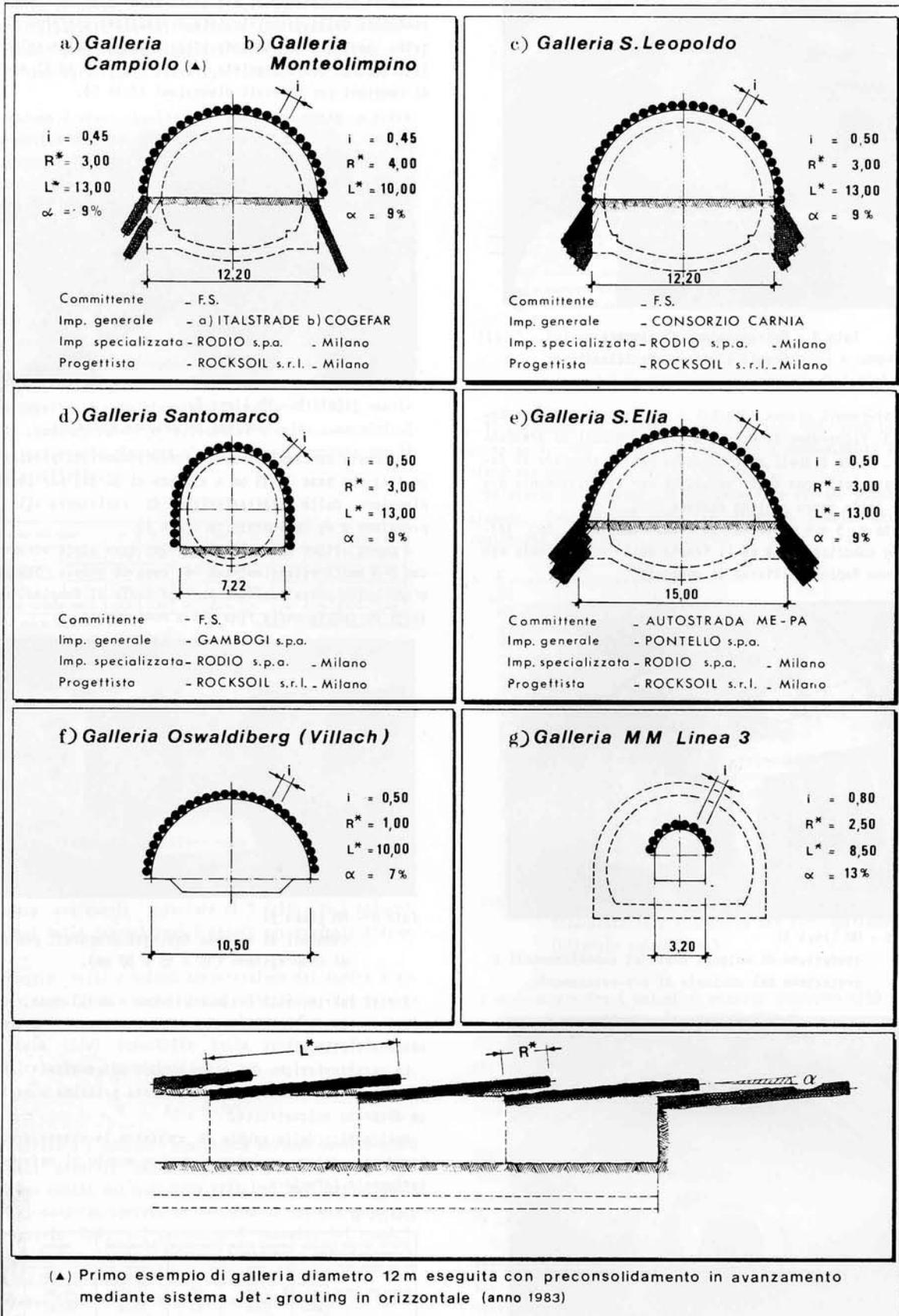


Fig. 7 - Schemi di trattamento conico suborizzontale mediante Rodinjet-1.

Come illustrato nella fig. 8 il rapporto E/R fra modulo e resistenza è mediamente attorno a 900 nel primo caso, scendendo a meno di 400 per le sabbie.

Il raffronto con il caso di Singapore evidenzia i due campi estremi di resistenze ottenibili a seconda della natura del terreno.

Pur considerando che la miscela usata a Milano aveva un maggiore rapporto cemento/acqua (1,0 contro 0,6) il divario di resistenza media (da 10 all'ordine di 200 kg/cm²) conferma l'influenza determinante del drenaggio e cioè del contenuto d'acqua finale.

Si sono finora trattati circa 1300 m di cunicoli con serie di 9 colonne di 8,5 metri, ogni 6 metri di scavo, corrispondenti complessivamente a quasi 17.000 metri di colonne.

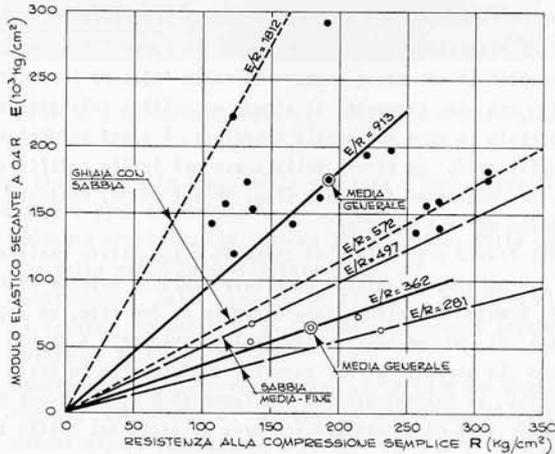


Fig. 8 - MM Linea 3:
correlazioni fra modulo di deformazione e resistenza delle colonne Rodinjet.

Sono già stati programmati gli interventi per altri 400 metri di cunicoli ed il primo intervento di consolidamento basato unicamente sul jet grouting per lo scavo della galleria di linea (circa 300 m con serie di 23 colonne), cioè con una geometria analoga a quella dei successivi esempi.

5.2. Gallerie ferroviarie e autostradali

La prima importante applicazione del metodo Rodinjet-1 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 (SR-41); i buoni risultati dei controlli mediante carotaggi furono confermati durante lo scavo che, iniziato prudentemente con centine ogni metro fu poi proseguito con una spaziatura di 2,5 metri (foto 7).

Nelle successive fasi si è fatto ricorso all'attrezzatura speciale a roto-percussione SR-500 (fig. 2 e foto 8) realizzando serie di 41 colonne lunghe 13 metri con una inclinazione del 10% e consentendo ogni volta 10 metri di scavo (fig. 7-a).

Nel complesso si sono trattati circa 170 metri di galleria sotto coperture variabili da qualche metro a 70 m circa; l'avanzamento è proseguito in tutta sicurezza alla media di 1,5 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 sempre nulli.



Foto 7 - Galleria Campiolo:
vista del trattamento suborizzontale mediante Rodinjet.

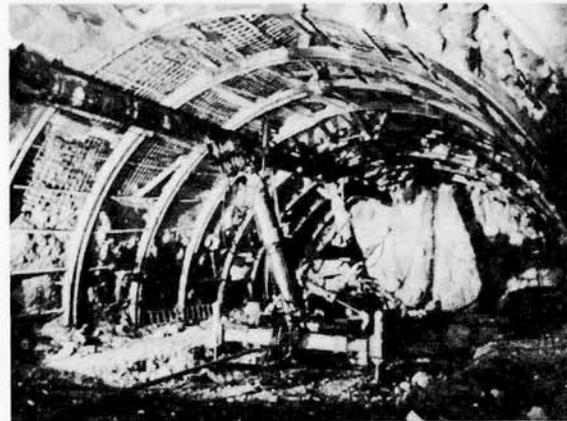


Foto 8 - Galleria Campiolo:
attrezzatura a roto-percussione SR 500.

Sempre sulla linea ferroviaria Udine-Tarvisio è stata fatta un'altra importante applicazione del metodo Rodinjet-1 per l'attacco e l'avanzamento della Galleria S. Leopoldo (di circa 6000 m) nel tratto Pontebba-Tarvisio.

L'imbocco lato Pontebba è avvenuto in materiale detritico, a ridosso dell'esistente autostrada Udine-Tarvisio, sottopassata dalla galleria con circa 15 m di copertura.

Al fine di operare uno sbancamento in prossimità del portale d'imbocco, evitando rilasci del versante che avrebbero condotto all'instabilità dell'adiacente spalla del viadotto autostradale, è stata realizzata una paratia a pianta arcuata (fig. 9), di altezza massima fuori terra di circa 12 m, mediante due ordini di colonne Rodinjet distribuite come illustrato nella stessa figura.

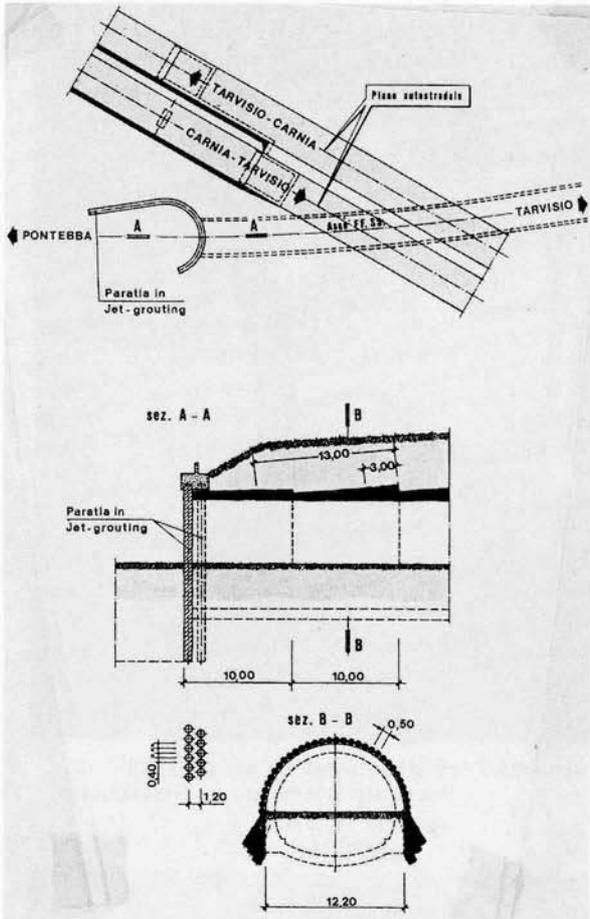


Fig. 9 - Linea FS Pontebba Tarvisio - Galleria S. Leopoldo Imbocco T1.

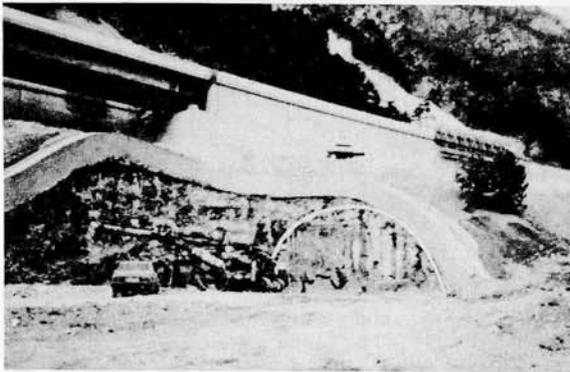


Foto 9 - Galleria S. Leopoldo - Imbocco T1.

Eseguito lo sbancamento di approccio (foto 9) è stata eseguita una prima serie di colonne orizzontali fino a 13 m oltre il fronte di attacco. Le tratte successive sono state realizzate con colonne inclinate del 9% e lunghe 13 m, con-

sentendo 10 m di scavo, fino al contatto con la roccia in posto per uno sviluppo complessivo di circa 90 m (fig. 7-c).

Nei pressi di Villach (Austria) è in corso un intervento su 500 m circa di galleria autostradale (Oswaldiberg) sulla direttrice Salisburgo-Udine. La fig. 7-f mostra lo schema di progetto iniziale, che ha subito in seguito delle modifiche a causa dei diversi tipi di terreno incontrato:

- trattamento con serie di 28 colonne ad interassi di 0,5 m con inclinazione del 9% in presenza di sabbia fine poco limosa
- riduzione a 18 colonne inclinate del 7% ad interasse di 0,6 m in terreno prevalentemente ghiaioso.

Il raccordo fra le linee ferroviarie Paola-Cosenza e Battipaglia-Reggio Calabria, lato S. Lucido, prevede un tratto di galleria a semplice binario di circa 150 m fino al camerone di raccordo con la linea esistente (Galleria Santomarco). L'esigenza di evitare cedimenti in superficie, non improbabili in una massa incoerente sotto falda ed incompatibili con la presenza di strade ed edifici sull'asse del tracciato in zone con debole copertura, è stata soddisfatta stabilizzando le pareti dello scavo nel tratto artificiale ed al contorno del cavo (fig. 10 e foto 10) mediante la tecnica del jet grouting.

Nel tratto artificiale di circa 35 m sono state realizzate due paratie rettilinee parallele mediante colonne Rodinjet armate. Le colonne sono disposte su due file, ad interassi di 50 cm sulla prima (colonne secanti) e di 100 cm lungo la seconda. Le due paratie, sbadacchiate in testa da puntoni in calcestruzzo ad interasse di 6 m, hanno una distanza tale da consentire fra esse il getto del tratto artificiale.

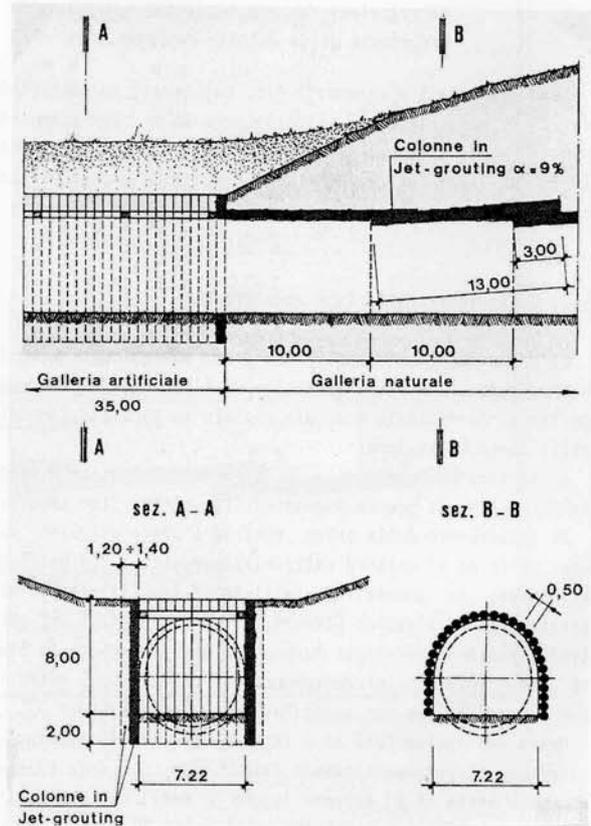


Fig. 10 - Linea FS Paola-Cosenza - Galleria Santomarco.



Foto 10 - Galleria Santomarco - Galleria artificiale.

Per l'attacco e lo scavo della galleria a foro cieco si è operato in fasi distinte:

- chiusura frontale, con colonne subverticali, delle paratie della galleria artificiale (foto 11)
- trattamento, dalla calotta ai piedritti per 13 m oltre il fronte, con serie di 38 colonne orizzontali armate ad interasse di 50 cm (secanti)
- avanzamento a piena sezione per circa 10 m con posizionamento immediato di centine e protezione di spritz-beton; quindi esecuzione, a partire dal nuovo fronte, di un successivo tratto di 13 m mediante colonne inclinate del 12% ad interasse di 50 cm (fig. 7-d).

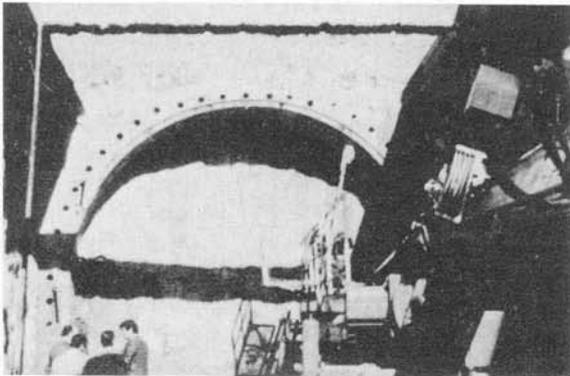


Foto 11 - Galleria Santomarco - Vista del fronte d'attacco.

Dopo circa 200 m di scavo, raggiunta la formazione in posto, l'avanzamento è proseguito con metodi tradizionali.

Il progetto dell'Autostrada Messina-Palermo prevede, nel lotto 33 bis, l'attacco della galleria S. Elia, a doppio fornice.

L'imbocco lato Messina ha interessato per circa 40 m un deposito detritico costituito da elementi litoidi immersi caoticamente in matrice limosa, sottopassando con circa 1,5 m di copertura la strada provinciale Cefalù-Gibilmanna.

L'applicazione del jet grouting ha consentito di procedere alle operazioni d'imbocco senza deviare la strada provinciale, senza interrompere il traffico ed arrecando il minimo disturbo al versante.

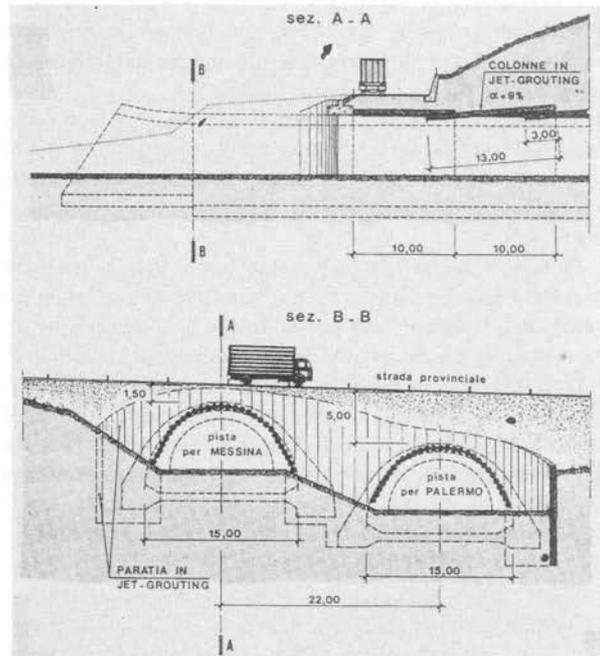


Fig. 11 - Autostrada Messina-Palermo - Galleria S. Elia.

Come si vede nelle foto 12-13 e nella fig. 11 al fronte d'attacco dei due fornici si è eseguita una paratia di colonne Rodinjet secanti con lunghezza max. di 15 m; al perimetro di scavo delle due canne si è realizzata una fascia di terreno preconsolidato impedendo il minimo cedimento del corpo stradale.



Foto 12 - Galleria S. Elia - Imbocco lato Messina.



Foto 13 - Galleria S. Elia - Imbocco lato Messina visto dalla strada provinciale Cefalù-Gibilmanna.

L'avanzamento in galleria è avvenuto a sezione parzializzata per tronchi di 10 m con trattamento in calotta spinto 13 m oltre il fronte mediante colonne suborizzontali ad interassi da 45 a 50 cm (fig. 7-e).

Sulla Linea Ferroviaria Milano-Chiasso-Basilea è in corso la realizzazione della Galleria Monte Olimpino 2, a doppio binario e lunga 7 km circa. La galleria, nel suo sviluppo, attraversa terreni alluvionali, arenarie, marne e conglomerati.

La foto 14 mostra il trattamento della calotta mediante Rodinjet suborizzontale in un tronco di 750 m circa a cavallo dell'imbocco intermedio (pozzo di Grandate) ove il terreno è costituito da sabbie fini debolmente limose.

Il trattamento, secondo lo schema della fig. 7-b, è realizzato con colonne di 60-70 cm di diametro ad interasse iniziale di 45 cm. Le colonne Rodinjet, come mostra la foto 15, presentano un diametro quasi costante ed una struttura omogenea; la resistenza alla compressione semplice, misurata su campioni carotati, è superiore a 150 kg/cm².

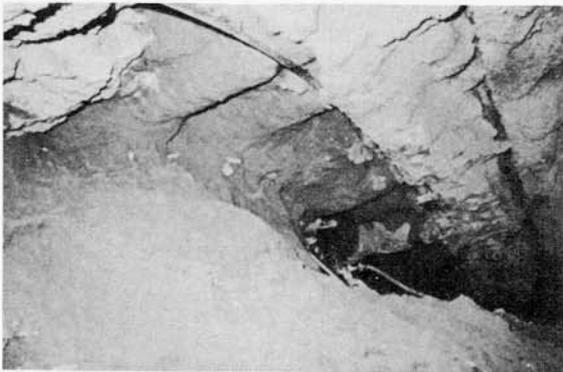


Foto 14 - Linea FS Milano-Chiasso: trattamento in calotta della Galleria Monte Olimpino.



Foto 15 - Galleria Monte Olimpino : particolare colonne Rodinjet.

BIBLIOGRAFIA

- ASCHIERI F., JAMIOLKOWSKI M., TORNAGHI R. (1983) - "Case history of a cut-off wall executed by jet grouting", Proc. VIII ECSMFE, Helsinki.
- BALOSI RESTELLI A., COLOMBO A., GERVASO F., LUNARDI P. (1986) - "Tecnologie speciali per il preconsolidamento di scavi nelle alluvioni di Milano in occasione della costruzione della linea 3 della Metropolitana", Congresso Int. "Grandi Opere Sotterranee", Firenze, 8-11 giugno.
- CEPPI G., DE PAOLI B., LOTTI A. (1986) - "La galleria ferroviaria Monte Olimpino 2. Scavo con tecnologie speciali" Congresso Int. "Grandi opere sotterranee", Firenze 8-11 giugno.
- LUNARDI P. (1982) - "Nouvelle méthode de construction des écrans d'étanchéité dans les barrages en remblai" XIV ICOLD, Rio de Janeiro.
- LUNARDI P. (1984) - "Consolidation des sols par la technique du jet grouting" Conférence I.T.B.T.P., Paris 19 mai 1984.
- LUNARDI P., LOUIS C. (1984) - "Consolidation des sols par la technique du jet grouting. Etat des connaissances et des expériences" Colloque Int. Renforcement des Sols et des Roches, Paris 9-11 oct.
- PERELLI CIPPO A., TORNAGHI R. (1984) - "Soil improvement by jet grouting" Rapid Transportation, Singapore, Jan.
- TORNAGHI R., PERELLI CIPPO A. (1985) - "Soil improvement by jet grouting for the solution of tunnelling problems", Proc. 4th International Symposium TUNNELLING '85, Brighton.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano per la collaborazione prestata il Dr. Ing. Alessandro Focaracci della Soc. Rocksoil di Milano e l'Ing. Andrea Perelli Cippo della Soc. Rodio.