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

SIG
Società Italiana Galleri

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

A. BALOSSI RESTELLI - A. COLOMBO
F. GERVASO - P. LUNARDI

Tecnologie speciali per il sostegno di scavi nelle alluvioni di Milano, in occasione della costruzione della linea 3 della M.M.

ESTRATTO / REPRINT / TIRE A PART

VOLUME I

ATTI - PROCEEDINGS - COMPTES RENDUS

TECNOLOGIE SPECIALI PER IL SOSTEGNO DI SCAVI NELLE ALLUVIONI DI MILANO IN OCCASIONE DELLA COSTRUZIONE DELLA LINEA 3 DELLA METROPOLITANA MILANESE

ACHILLE BALOSSI RESTELLI - Libero professionista

FEDERICO GERVASO - Impresa Lodigiani S.p.A.

ADOLFO COLOMBO - Metropolitana Milanese S.p.A.

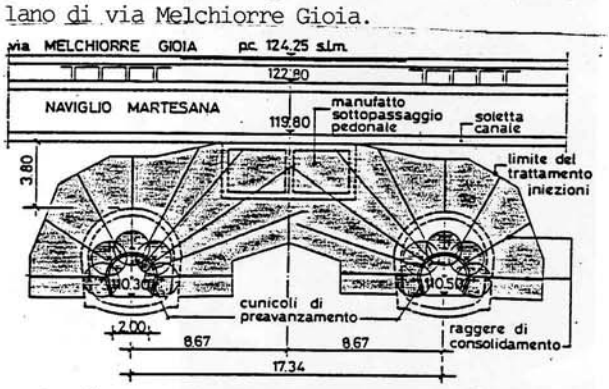
PIETRO LUNARDI - Università di Firenze

1. GENERALITA'

Il metodo di realizzazione degli scavi a "foro cieco" è applicato a Milano, nell'ambito dei lavori di costruzione della M.M., ormai da molti anni.

Ricordiamo che la prima sperimentazione del cunicolo di preavanzamento e raggere d'iniezione è stata eseguita con buon successo nell'anno 1968 nel corso dei lavori del lotto 3S1.

Qui appunto, dopo un tratto sperimentale di 28 m di lunghezza sotto via De Castillia ed un fabbricato ad uso officina, con tale metodologia gli scavi delle due gallerie gemelle della linea 2 hanno potuto essere condotti con buona sicurezza al di sotto del naviglio Martesana proprio in fregio al palazzo del Comune di Milano di via Melchiorre Gioia.



La figura n. 1 mostra lo schema d'intervento allora attuato (sistema a foro cieco).

Questa metodologia è stata successivamente impiegata per numerosi altri tratti della linea 2 ed è tutt'ora utilizzata nel corso dei lavori della nuova linea 3.

Consente di intervenire

- nelle zone fortemente urbanizzate e densamente trafficate, in quanto risulta minimo il disturbo arrecato alla vita della città
- quando si debbano sottopassare fabbricati ed importanti servizi cittadini
- laddove la linea viene impostata a notevole profondità e risulterebbe quindi difficoltoso raggiungerla con operazioni condotte dalla superficie.

Come è noto il sistema a foro cieco è strettamente connesso, possiamo dire fino ad ora totalmente dipendente, dalla particolare facilità con cui si riesce a conferire al terreno alluvionale di Milano un buon grado di coesione mediante iniezione di fluidi consolidanti.

Per questo motivo le iniezioni rappresentano allo stato attuale dell'arte (salvo affinamento di innovazioni tecnologiche basate su macchinari e procedimenti particolari tutt'ora in fase sperimentale nel terreno di Milano) il supporto principale per l'esecuzione delle gallerie in sicurezza, sia nei confronti della stabilità stessa dei "cavi", sia per quanto concerne l'integrità dei fabbricati e dei servizi della città.

2. NUOVE TECNOLOGIE SPECIALISTICHE COMPLEMENTARI

Tenuto bene presente il ruolo determinante delle iniezioni di consolidamento, desideriamo in questa nota mettere in risalto una nuova tecnologia applicata nell'ambito di alcuni lavori della linea 3, che riteniamo possa utilmente integrare le iniezioni o addirittura in casi particolari sostituirsi ad esse.

Si tratta del sistema cosiddetto "jet grouting" -iniezioni ad altissima pressione per la costituzione di colonne di terreno consolidato- applicato nel caso particolare in zone densamente urbanizzate.

Diamo qui per scontata la conoscenza di questa tecnologia perchè, malgrado sia entrata nell'uso solamente da tre o quattro anni, le applicazioni sono ormai numerosissime.

Basti pensare a tutti i cantieri dell'autostrada e della nuova ferrovia Udine-Carnia-Tarvisio, alla Centrale Enel di Porto Tolle, alla galleria di Monte Olimpino, alla metropolitana di Singapore ecc.

Desideriamo qui descrivere come, approfittando di alcuni casi particolari della linea 3 della M.M., si sia voluto sperimentare questa tecnica per la soluzione di delicati problemi.

La delicatezza appunto ha imposto una sperimentazione particolare che da una parte ha verificato ed esaltato i pregi della tecnologia, dall'altra parte ha messo in luce alcune sue limitazioni: nel complesso pensiamo che si sia fatto un ulteriore passo avanti nello stato

dell'arte e che questo fatto possa essere impiegato per uno sfruttamento sempre più adeguato di questo sistema.

In particolare nell'ambito cittadino, oltre alla stabilità dei "cavi", è necessario tenere in conto le ripercussioni che l'apertura di questi cavi hanno nei confronti della stabilità delle opere sovrastanti.

3. CANTIERE SPERIMENTALE

All'inizio dei lavori relativi al lotto 2B della linea 3, nell'ottica di un possibile utilizzo del jet-grouting, l'impresa Rodio esecutrice dei lavori specializzati del lotto stesso ha condotto un'ampia serie di sperimentazioni a Varallo Pombia in prossimità della galleria di presa del canale Regina Elena.

Sono stati studiati ed ottimizzati:

- relativamente alla miscela, i rapporti cemento/acqua più opportuni da utilizzare e le pressioni, in funzione della massima resa sia come raggio di diffusione sia come resistenza della colonna consolidata
- gli interassi tra le perforazioni in funzione dei terreni attraversati
- le turbative provocate dalla penetrazione forzata della miscela ad altissima pressione (movimenti verticali ed orizzontali)
- le portate dell'iniezione e la velocità di rotazione e di sollevamento (gradini d'iniezione) dell'utensile speciale utilizzato per l'immissione del fluido nel terreno. Anche questo in funzione del raggio d'azione.

Le foto riportate nelle figure nn. 2 e 3 mostrano alcune delle prove eseguite a Varallo Pombia.

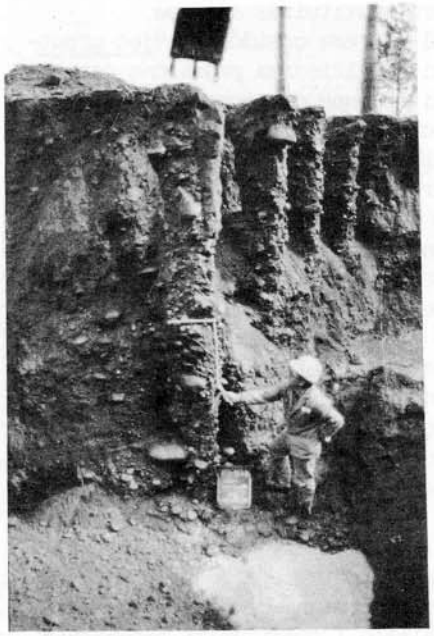


Fig. n. 2

Si è quindi passati all'esecuzione del trattamento di protezione di un tratto di cunicolo

Fig. n. 3

per simulare la piccola galleria di preavanzamento della M.M.

Lo scavo, svoltosi con successo e senza problema alcuno, è mostrato nella fotografia n.4.

Fig. n. 4

I risultati tratti da queste indagini, oltre alle esperienze già acquisite in altri cantieri, sono stati utilizzati per la progettazione degli interventi eseguiti al lotto 2B della linea 3 che qui di seguito brevemente andiamo a descrivere.

Per non generare confusione dobbiamo dire che il sistema del jet-grouting messo a punto ed adottato dalla Rodio è stato denominato "Rodinjet".

4. IL POZZO DI ACCESSO "LAMARMORA"

Per la prima volta in area urbana è stata affrontata l'esecuzione di un "cavo" a pozzo, protetto da colonne di jet-grouting, di grandi dimensioni ed in fregio a due fabbricati molto alti.

La figura n. 5 mostra in pianta ed in sezione lo schema dell'intervento.

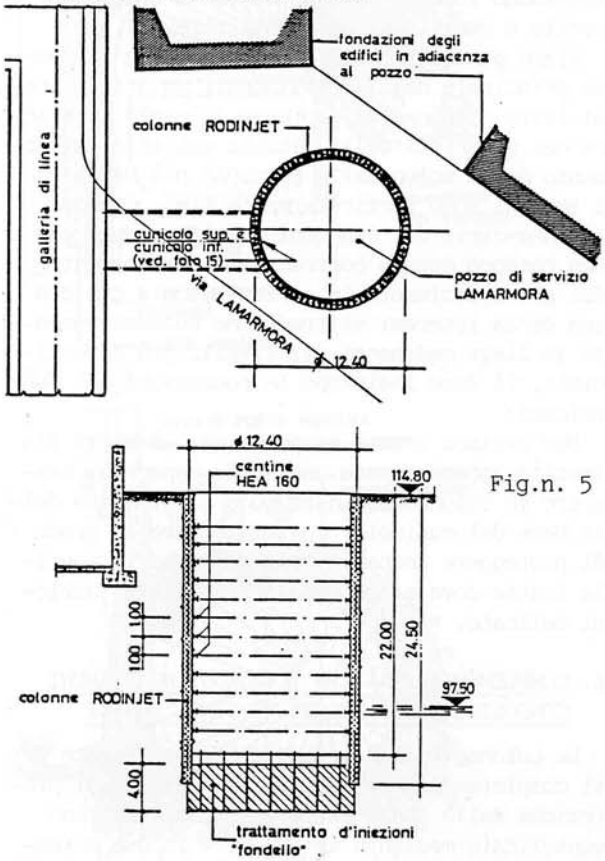


Fig.n. 5

L'interasse delle colonne successive è di 0,50 m e lo spessore del terreno consolidato è stato considerato pari a 0,60 m.

La figura n. 6 mostra un dettaglio della parete del pozzo in fase di scavo.

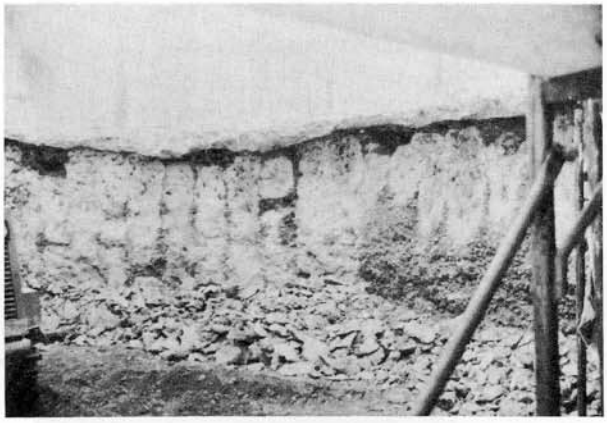


Fig. n. 6

Si può notare come le colonne Rodinjet si siano bene compenetrate offrendo allo scavo che mano mano si approfondiva la protezione di una parete di terreno consolidato praticamente continua, dotata di ottime qualità di resistenza.

Le centine circolari (HEA 160 mm) poste in opera ad interasse di 1 m hanno costituito, assieme al rivestimento con rete elettrosaldata e 20 cm di spritz-beton, gli appoggi necessari per la stabilità del cavo.

A questo proposito dobbiamo ricordare che le colonne jet-grouting, pur raggiungendo mediamente nel terreno di Milano caratteristiche di resistenza notevoli (vedere relazione presentata in questo stesso Convegno "Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo") non sono in grado di sopportare effetti flessionali se non di piccola entità ed hanno quindi bisogno di appoggi frequenti.

Gli scavi del pozzo sono proceduti con regolarità (in due fasi successive) fino alla quota di falda e cioè fino ad una profondità di 17 m circa.

Le deformazioni sono state controllate in corrispondenza dei fabbricati adiacenti ed hanno fatto registrare un cedimento massimo pari ad 1,5 mm.

La figura n. 7 mostra il "cavo" del pozzo Lamarmora e sullo sfondo i fabbricati incombenti.

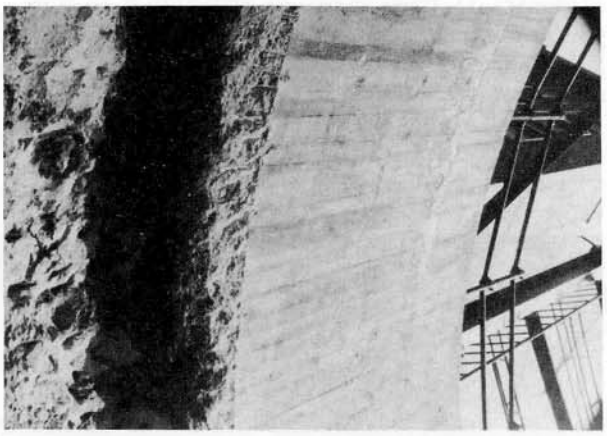


Fig. n. 7

In falda il pozzo ha potuto procedere per altri 5 m (fino alla profondità massima di 22 m) solamente dopo un intervento di iniezioni d'impermeabilizzazione.

Queste sono state necessarie per due motivi:

- l'esecuzione del"fondello impermeabile" di spessore tale da contrastare le sottospinte idrauliche
- l'impregnazione laterale fra le colonne di jet-grouting che sono risultate non perfetta-

mente impermeabili.

Questo fatto era comunque previsto, tenuto conto di quanto già riscontrato nei pozzi eseguiti sull'autostrada Udine-Tarvisio (dove, anche a causa delle notevoli correnti sulbalvee, una doppia fila ha fornito un sufficiente grado di impermeabilizzazione) e del fatto che a profondità di oltre 15-16 m per effetto di leggere deviazioni delle perforazioni possono presentarsi delle fasce verticali di terreno non raggiunte dal getto di miscela.

Le iniezioni condotte sul fondo hanno risolto molto bene il problema e lo scavo ha potuto essere terminato praticamente all'asciutto.

5. CUNICOLO DI PREAVANZAMENTO

Lungo il lotto 2B a partire dai tre pozzi di attacco (Missori-S.Nazaro-Lamarmora) sono stati realizzati 1300 ml di cunicolo protetto da 9 colonne di Rodinjet.

Il vantaggio principale offerto da questa metodologia, nei confronti delle iniezioni tradizionali, è da attribuirsi alla velocità di avanzamento.

L'effetto di intensa pressofiltrazione della miscela cementizia utilizzata provocava un rapido indurimento delle colonne iniettate, tanto che lo scavo poteva essere iniziato senza problemi 8-10 ore dopo l'ultimazione del nono foro.

Il sistema di "bilanciamento" di due fronti (a partire da ciascun pozzo) sui quali si sono alternati il trattamento di Rodinjet e lo scavo, secondo tratte successive di 6 m di lunghezza, ha portato ad una velocità di avanzamento del cunicolo di 3 m/giorno mediamente.

La figura n. 8 mostra il fronte di avanzamento della galleria di linea che mano mano ritrova e mette in luce le 9 colonne di protezione attorno al cunicolo di preavanzamento.

Fig. n. 8

Generalmente sono state poste in opera centine (non chiuse al piede) interassate di 2 m.

Il sistema, possiamo ora dire, ha funzionato sempre regolarmente e con buona sicurezza.

Dobbiamo tuttavia fare rilevare che in corrispondenza delle fondazioni di alcuni edifici si sono riscontrati cedimenti di lieve entità, sempre rientranti nelle limitazioni imposte ma non trascurabili, ossia dell'ordine del millimetro fino ad un massimo di 4 mm in casi limitati.

Abbiamo attentamente studiato il fenomeno raffrontando i tempi delle successive operazioni svolte e quelli dei cedimenti rilevati.

Siamo pervenuti alla conclusione che la causa principale degli assestamenti va attribuita al fatto di non aver protetto la parte inferiore dei piedritti della piccola galleria: al momento dello scavo della porzione più bassa se i terreni sono particolarmente fini tendono ad innescarsi dei fenomeni di rifluimento che non possono essere contrastati completamente dal prerivestimento in spritz-beton e che con una certa isteresi si traducono successivamente in lievi cedimenti dei livelli più superficiali, là dove insistono le fondazioni dei fabbricati.

Per ovviare a tali inconvenienti è stata allestita appositamente una sonda capace di eseguire le colonne Rodinjet poco al di sopra della base del cunicolo, così da essere in grado di proteggere anche la base dei piedritti nelle tratte dove si debbano affrontare situazioni delicate.

6. COMPLEMENTARITA' TRA JET-GROUTING E ARCHI CONSOLIDATI CON INIEZIONI TRADIZIONALI

Le colonne Rodinjet sono state utilizzate per il completamento degli archi di scarico di protezione dello scavo della galleria - terreno consolidato mediante iniezioni - in due situazioni particolari e precisamente

- lungo un buon tratto della stazione Lamarmora laddove la vicinanza della paratia, delimitante i manufatti a cielo aperto della stazione stessa, lasciava poco spazio oltre la linea di scavo del piedritto Sud del grande "cavo"
- lungo il tratto di gallerie allargate da 10 e da 11 m in corrispondenza degli stabili nn. 120 e 122 di corso di Porta Romana, strutture ambedue in condizioni di stabilità piuttosto critica.

Le figure nn. 9 e 10 riportano gli schemi dei trattamenti adottati nel primo e nel secondo caso.

I lavori si sono svolti con regolarità, senza generare eccessivi disturbi malgrado le notevoli dimensioni delle macchine impiegate.

Non si sono registrati movimenti nelle strutture interessate; solamente nel secondo caso le pressioni di iniezione sono state ridotte nella parte alta del trattamento per non rischiare di danneggiare la fognatura.

La figura n. 11 mostra l'attrezzatura al lavoro.

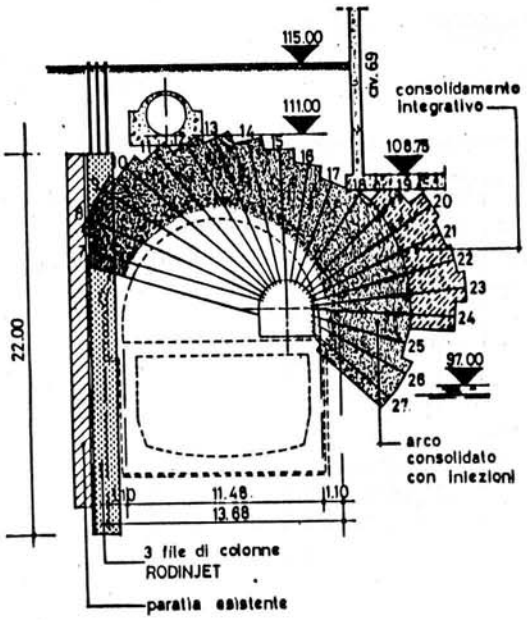


Fig. n. 9

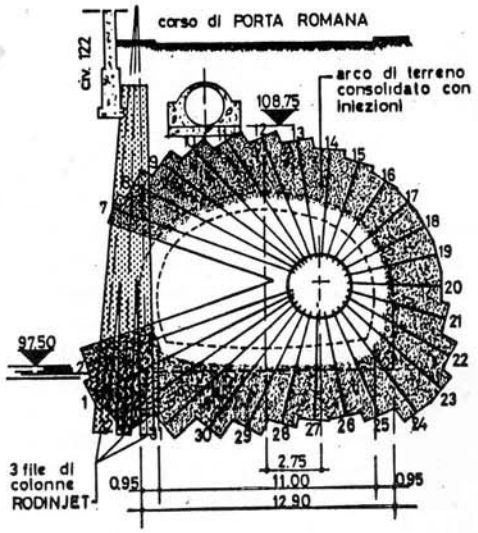


Fig. n. 10

Un punto assai delicato della struttura di terreno resistente è certamente quello dove lo arco consolidato con iniezioni tradizionali si innesta nell'ambito delle colonne Rodinjet: qui infatti il flusso degli sforzi deve migrare da un'ampia porzione di terreno caratterizzata da un modulo elastico relativamente basso ad una porzione molto più ristretta di terreno caratterizzato da un modulo come minimo 5 volte superiore.

Come si può notare i fori di iniezione sono stati fatti penetrare in profondità nel corpo delle colonne Rodinjet e le iniezioni sono state eseguite in modo molto intenso allo scopo di creare un buon incastro e costituire un passaggio graduale degli sforzi dall'una all'altra situazione.

Le gallerie da 10 ed 11 metri sono state realizzate con ottimi risultati.

Lo scavo ha potuto verificare l'omogeneità delle colonne Rodinjet oltre il piedritto Sud delle gallerie.

I cedimenti riscontrati sugli edifici circostanti sono risultati irrilevanti (valore massimo 2 mm), segno evidente del buon funzionamento della struttura di terreno "composita" (iniezioni + colonne di jet-grouting) progettata per il sostentamento degli scavi.

7. PROVE DI LABORATORIO

Nel corso degli scavi delle gallerie di linea si sono incontrate tutte le colonne Rodinjet impiegate per il sostegno dei cunicoli di preavanzamento.

Abbiamo allora approfittato per estrarre un considerevole numero di campioni di terreno interessato dal trattamento jet-grouting: campionature di considerevoli dimensioni che hanno consentito una serie di sperimentazioni assai interessanti sulle caratteristiche di resistenza conseguite con questa tecnica nei terreni di Milano.

Le prove (eseguite dall'Istituto Sperimentale Stradale) sono state eseguite su prismi di sezione 15x15 cm ed altezza 30 cm, equipaggiati con estensimetri su tutte le facce laterali.

.Per la descrizione dettagliata di queste sperimentazioni si rimanda alla relazione presentata a questo stesso congresso intitolata "Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo".

Ci limitiamo qui a riferire i dati medi di resistenza ottenuti.

Su campioni di terreno a prevalenza ghiaiosa, con poca sabbia, il valore della resistenza a rottura a libera espansione ha fatto registrare un valore medio pari a 180 Kg/cm^2 ed un modulo di elasticità di 170.000 Kg/cm^2.

Su campioni di terreno a struttura prevalentemente sabbiosa il valore della rottura a libera espansione è risultato simile a quello precedente, mentre il modulo elastico è decisamente

inferiore, pari mediamente a 60.000 Kg/cm^2.

Facciamo rimarcare che essendo il terreno di Milano generalmente costituito da orizzonti misti ghiaiosi-sabbiosi, sempre molto "chiusi", ossia carichi di frazione fina, e da strati più marcatamente sabbiosi, per il calcolo è prudenziale assumere un valore del modulo attorno ai 50.000 Kg/cm^2.

Questo è anche giustificato dal fatto che le colonne di jet-grouting possono anche divergere tra loro e quindi contenere delle porzioni di terreno al suo stato naturale: il masso interessato viene considerato nei calcoli consolidato omogeneamente e quindi bisogna attribuirgli valori di resistenza medio-bassi.

8. LA PROTEZIONE DI GALLERIE PIU' AMPIE. IL CALCOLO DEI CEDIMENTI

Sulla scorta dei risultati delle prove sopra riferite, per il momento a puro scopo di studio, è stato eseguito (in collaborazione con la Ce.A.S. s.r.l.) una verifica dei cedimenti con il metodo degli elementi finiti relativamente allo scavo della galleria riportata in figura n. 12, protetta tutt'attorno da una fila di colonne di jet-grouting.

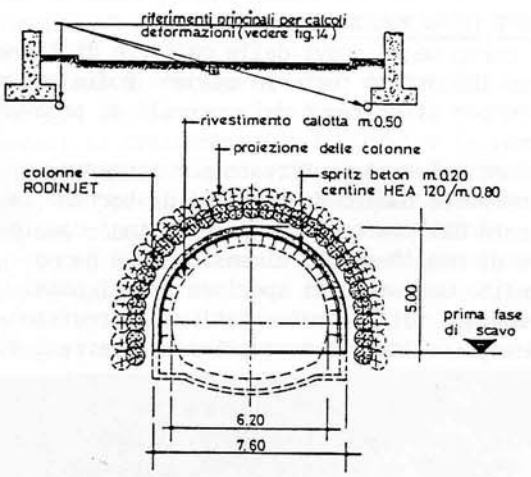


Fig. n. 12

La galleria si suppone venga scavata secondo tratte successive di 6 m di lunghezza; il trattamento protettivo di jet-grouting sarà costituito da coni successivi di colonne iniettate ad alta pressione di lunghezza 9 m ed inclinazioni del 18% verso l'esterno, eseguite a partire dal fronte avanzato di ogni porzione.

Per il terreno naturale si sono assunti i seguenti parametri:

- modulo di elasticità definito nei grafici di figura n. 13
- coefficiente di Poisson 0,33
- angolo di attrito 35°
- coesione nulla
- peso specifico fuori falda 2 t/mc
  in falda 1,2 t/mc (efficace)

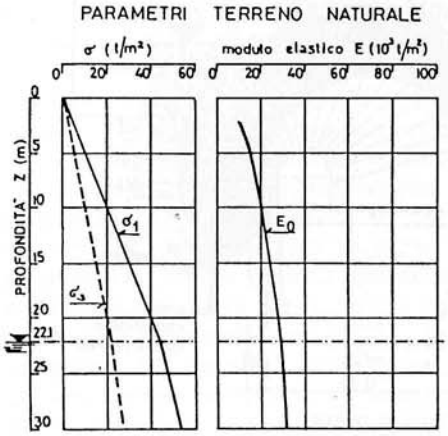


Fig.n. 13

Per il calcestruzzo si è assunto un modulo di elasticità pari a 2.500.000 t/mq, con un coefficiente di Poisson 0.16.

I prerivestimenti costituiti da centine metalliche tipo HEA 120 ogni 80 cm e da calcestruzzo spruzzato (20 cm di spessore), vengono simulati considerando una sezione omogeneizzata avente modulo elastico equivalente pari a t/mq 1.530.000.

Il terreno trattato con la tecnica del jet-grouting è stato considerato, come comportamento, simile ad un calcestruzzo di basse prestazioni.

E' stato quindi assunto per esso un modulo elastico di 500.000 t/mq ed un coefficiente di Poisson pari a 0.16.

La figura n. 14 riporta gli spostamenti nelle varie fasi dei due nodi più significativi, e cioè il centro del piano stradale e lo spigolo della fondazione più vicina allo scavo.

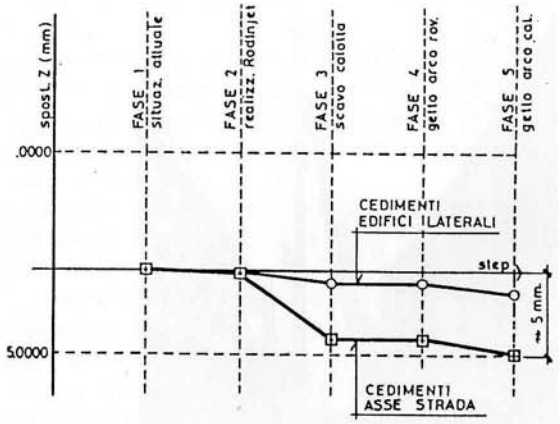


Fig. n. 14

I risultati ottenuti mostrano come l'intervento con una sola fila di colonne Rodinjet sia in grado di sostenere lo scavo ammesso che le

centine vengano messe in opera tempestivamente e lo spritz-beton venga eseguito non appena ultimata ciascuna tratta di lunghezza uguale all'interasse delle centine stesse.

Tuttavia i cedimenti calcolati si portano al limite dell'ammissibile, per cui è necessario interessare con iniezioni il fronte di scavo in modo tale che esso si sostenga in modo praticamente verticale.

In questo modo si viene ad incrementare il fattore di sicurezza globale dell'insieme.

In definitiva riteniamo che il sistema del jet-grouting possa essere in alcuni casi bene impiegato anche per il sostegno di gallerie di più ampia sezione in zone urbane, semprechè vengano adottate alcune misure precauzionali per garantire la sicurezza delle opere sovrastanti.

Nei casi più delicati intravediamo le due possibilità seguenti:

- l'una più rigorosa comporterebbe l'esecuzione di una doppia fila di colonne
- l'altra più blanda potrebbe prevedere la realizzazione di una corona esterna di iniezioni tradizionali di consolidamento per aumentare lo spessore dell'arco di scarico oltre il jet-grouting.

9. CONCLUSIONI

Abbiamo descritto in questa memoria alcuni interventi eseguiti nel sottosuolo di Milano in situazioni particolarmente delicate ed abbiamo visto come la tecnica del jet-grouting sia in grado di integrare opportunamente sistemi di consolidamento più tradizionali come le iniezioni.

La figura n. 15 mostra appunto la validità dell'abbinamento delle due tecnologie: la fotografia espone la situazione del terreno consolidato ed impermeabilizzato nella parte più profonda del pozzo Lamarmora a 22 m di profondità circa, in corrispondenza dell'imbocco del cunicolo di collegamento inferiore (in fase di scavo) con la galleria di linea.

Vedere la posizione in pianta sulla figura n. 5.

Si può notare come il trattamento generale eseguito mediante iniezioni formi una parete continua ed uniforme, integrandosi ottimamente con le colonne verticali di jet-grouting visibili sul lato destro della foto stessa.

Abbiamo inoltre prospettato la possibilità che questa tecnologia possa essere utilmente impiegata per il sostegno di gallerie e "cavi" di più ampie dimensioni, anche in presenza di fondazioni di opere urbane importanti, salvaguardandone l'integrità.

Pensiamo valga la pena di continuare ad affinare il problema in modo da migliorare sempre di più lo stato di questa tecnologia che potrebbe apportare vantaggi di tempi e di costi nella realizzazione delle linee metropolitane.

Fig. n. 15
Pozzo Lamarmora a 22 m di profondità. Il trattamento di consolidamento ed impermeabilizzazione con le iniezioni si integra bene con le colonne Rodinjet visibili sul lato destro della fotografia (strisce verticali chiare in prossimità delle teste dei tiranti)

Riferimento bibliografico:
LUNARDI P. - PERELLI CIPPO A. - TORNAGHI R. "Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo" - Convegno di Firenze - Giugno 1986