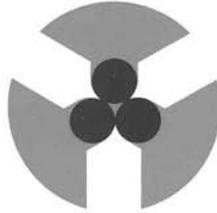


SOCIETÀ ITALIANA GALLERIE



**IL CONSOLIDAMENTO DEL SUOLO E DELLE ROCCE  
NELLE REALIZZAZIONI IN SOTTERRANEO**

***SOIL AND ROCK  
IMPROVEMENT IN UNDERGROUND WORKS***

Milano, 18-20 Marzo 1991

A. Colombo, P. Lunardi, E. M. Pizzarotti, G. D. Tesserin

**PRECONSOLIDAMENTO DEL TERRENO MEDIANTE JET-GROUTING  
NEL SOTTOPASSO DELLA TANGENZIALE EST DI MILANO DA PARTE  
DELLA LINEA 3 DELLA METROPOLITANA**

*JET-GROUTING TREATMENT OF SOIL IN THE CONSTRUCTION OF A TUNNEL  
OF THE THIRD METRO LINE UNDERPASSING A MAJOR TRAFFIC ROUTE*

ESTRATTO/REPRINT

ATTI  
PROCEEDINGS

VOL. II

**PRECONSOLIDAMENTO DEL TERRENO MEDIANTE JET-GROUTING  
NEL SOTTOPASSO DELLA TANGENZIALE EST DI MILANO DA PARTE  
DELLA LINEA 3 DELLA METROPOLITANA**

*JET-GROUTING TREATMENT OF SOIL IN THE CONSTRUCTION OF A TUNNEL  
OF THE THIRD METRO LINE UNDERPASSING A MAJOR TRAFFIC ROUTE*

Adolfo COLOMBO, MM Strutture ed Infrastrutture per il Territorio SpA, Milano, Italia  
Pietro LUNARDI, Università di Parma, Italia  
Enrico Maria PIZZAROTTI, Rocksoil SpA, Milano, Italia  
Gian Domenico TESSERIN, V.A.S.CO. - Vianini Lavori, Astaldi, Safie, C.M.B. Carpi,  
C.C.P.L. Reggio Emilia, Italia

Viene descritta l'applicazione ed i risultati del preconsolidamento a mezzo iniezioni jet-grouting per la realizzazione di una galleria corticale sottopassante una importante arteria di traffico.

A subway under a major traffic artery was planned as part of an underground tunnel (Figg. 1 - 2). Because of the very small overburden it was decided to use the jet-grouting consolidation method, which allows to achieve, through very high pressure (400+500 bar) injections of a mix of water and cement, grouted soil volumes of controlled dimensions. Such technology can be applied with an extremely reduced overburden in as much as the effect of the injections is felt at no more than a distance of two diameter from the axis of the injection. The result is, then, a volume of grouted soil in a column form, surrounded by "clauage", which undergoes a heavy increase of density.

In the case in question, this technology was adopted both for the sub-horizontal injections, to be carried out in advance every 6 m of excavation, with a length of 12 m and therefore with a constant double overlap, and for the subvertical injections at the side of the posts, carried out from the half section after the first phase excavation (Fig. 3).

The bottom of the tunnel was treated, (still acting on the middle of the section) with cement and chemical injections from tubes with valves with the object of water proofing the lower part of the tunnel which was immersed in the water-table. Jet-grouting was also carried out in advance to treat the area under the base of the pre-lining (made up of a layer of shot-concrete reinforced with steel ribs and wire mesh), so that a subfoundation which would not settle could be prepared before the steel ribs were put into operation.

It is interesting to note that the underground section was carried out between two open excavation areas very close to the street embankment. Therefore there was also the problem of beginning the tunnel, by means of subvertical excavation walls. Even in such a case, jet-grouting has proved an advantageous solution to the problem of the initial stages of the excavation, allowing the construction of subvertical walls of a notable thickness, made of grouted soil, without anchors, which were then part-demolished during the tunnel excavation.

This latter was carried out on two opposite faces, through the alternation of injection in advance of the top section, and excavation of 6 metres. Following the excavation of the first areas which showed a tendency for the face to collapse during the injections in advance, some jet-grouting columns were carried out at the excavation face, resolving the problems of face stability definitively.

Notwithstanding that the upper part of the tunnel was dug through the street embankment and that in general the soil contained large percentages of silt and silty sand, it was possible to finish the work with settlements which have not in the least affected the flow of traffic on the surface.

Soil deformations and settlements have constantly been checked by geotechnical instruments which have provided the representations appearing in the diagram (Fig. 4 - 5).

Nell'ambito della realizzazione del 3° lotto della Linea 3 della Metropolitana Milanese, il tracciato della galleria di linea interferisce in località Rogoredo con quello della Tangenziale Est di Milano.

Al fine di evitare qualsiasi interruzione dell'intenso traffico stradale, è stato previsto di sottopassare il rilevato stradale dell'altezza di 7÷8 m sul quale si snoda la tangenziale realizzando a foro cieco un tratto della galleria di linea della lunghezza di circa 70 m (Fig. 1).

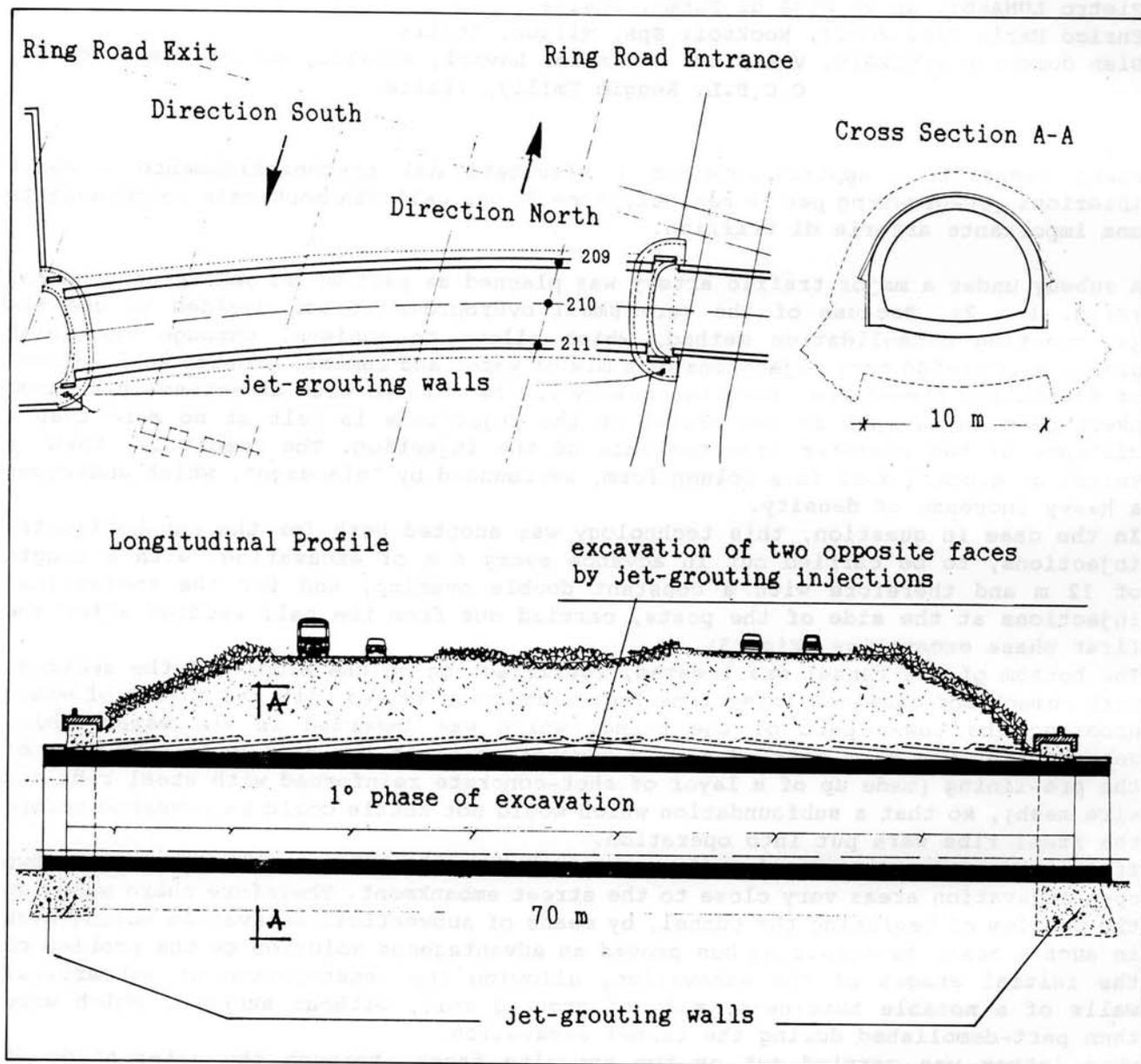


Fig. 1: Planimetria, sezione trasversale e profilo longitudinale della galleria. Tunnel plan, cross section and longitudinal profile.

Il raggiungimento della completa sicurezza nei confronti della stabilità dello scavo durante tutte le fasi esecutive e la limitazione delle deformazioni del

terreno e dei cedimenti superficiali costituiscono senza dubbio i principali temi progettuali affrontati nella realizzazione dell'opera.

L'esiguità delle coperture (8+9 m) unitamente alla natura dei terreni (limo e sabbie limose) ed alla presenza della falda acquifera a pochi metri di profondità da p.c., ha comportato, per la realizzazione degli scavi e per la minimizzazione dei cedimenti superficiali, l'esecuzione di appropriati interventi di consolidamento del terreno e l'adozione di opportune metodologie operative, che consentissero il raggiungimento di adeguate resistenze senza indurre sollevamenti o fuoriuscite di miscela in superficie.

Per questi motivi, si è preferito l'impiego del jet-grouting a quello delle tradizionali iniezioni, anche perchè la realizzazione di queste ultime avrebbe comportato, non potendosi agire dalla superficie senza interrompere il traffico stradale, lo scavo di un preforo da cui realizzare le iniezioni stesse.

La tecnologia del jet-grouting, se correttamente applicata a seguito di un attento studio preliminare della resa del trattamento in funzione dei parametri di iniezione e delle caratteristiche del terreno, permette di ottenere volumi controllati di terreno consolidato, senza provocare rigonfiamenti o rotture in superficie. Gli effetti delle iniezioni ad altissima pressione (400+500 bar) di boiaccia di cemento non sono infatti rilevabili oltre una distanza pari a circa 2 volte il raggio d'azione delle iniezioni, che possono quindi essere utilizzate con successo anche in casi di bassa copertura.

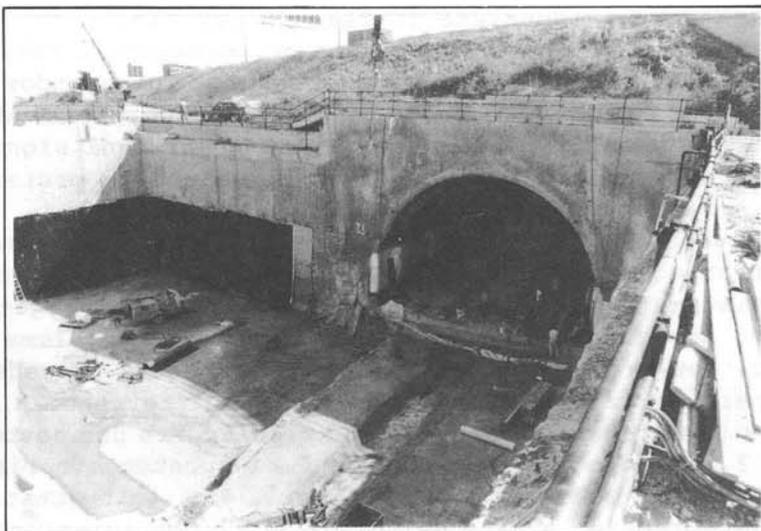


Fig. 2: Imbocco lato Rogoredo.  
Rogoredo side portal.

Il risultato di tale trattamento è un volume di terreno consolidato in forma colonnare, circondato da una fascia di terreno trattato per claquage, le cui densità e resistenza risultano fortemente incrementate rispetto a quelle del terreno naturale.

Il contributo statico offerto dai consolidamenti nelle varie fasi di scavo è stato valutato con un'analisi non lineare ad elementi finiti con la quale è stato simulato il processo di scavo fino al completamento del rivestimento provvisorio.

La natura del problema in esame è chiaramente non lineare e tridimensionale dal momento che ci si pone l'obiettivo di studiare l'evoluzione dell'assetto tenso-deformativo di materiali spiccatamente non lineari (terreno) anche in prossimità del fronte di scavo.

Per semplicità di modellazione si è però preferito ricorrere ad uno schema bidimensionale, simulando l'effetto tridimensionale in prossimità del fronte mediante una opportuna riduzione delle caratteristiche elastiche e fisiche (peso specifico) del terreno costituente il nucleo da scavare; ciò per tenere in conto il fatto che la "rigidezza" del terreno, prima che questo venga definitivamente asportato, subisce una diminuzione a causa della mancanza di contenimento nella direzione dell'asse della galleria. La presenza dei consolidamenti è stata introdotta nel modello variando le caratteristiche geotecniche del terreno trattato con jet-grouting e con iniezioni chimiche e cementizie ed in particolare incrementandone modulo elastico e coesione.

I risultati di questa analisi hanno consentito di trarre confortanti indicazioni sull'efficacia del consolidamento proposto.

Lo stato di sforzo nel prerivestimento, che non ha superato in alcuna fase i  $30 \text{ kg/cm}^2$ , è stato ritenuto del tutto accettabile in considerazione della resistenza offerta dallo strato di calcestruzzo proiettato armato con centine. È stata inoltre evidenziata la capacità del terreno consolidato di ridistribuire le sollecitazioni indotte dallo scavo della galleria con livelli di sforzo massimi che non superano, se non in punti particolari (base dell'arco in spritz-beton e base dei piedritti) la resistenza limite del consolidamento.

L'avanzamento è avvenuto a sezione parzializzata (prima fase di scavo fino al piano dei centri) su due fronti contrapposti con esecuzione alternata di un trattamento sub-orizzontale con iniezioni jet-grouting sul perimetro dello scavo della lunghezza di 12 m oltre il fronte e dello scavo di porzioni successive di 6 m di galleria con immediata posa del prerivestimento in spritz-beton, centine e rete elettrosaldata (Fig. 3). L'interasse delle colonne di terreno consolidato è stato differenziato lungo lo sviluppo della volta per ottenere resistenze adeguate alle esigenze statiche evidenziate in fase di calcolo.

La geometria dell'intervento ha permesso la realizzazione di una fascia di terreno consolidato di notevole spessore (ottenendosi una doppia corona di colonne jet-grouting sul perimetro dello scavo) fornendo la garanzia della stabilità del fronte, dal momento che al termine di ogni sfondo di 6 m le operazioni successive di avanzamento venivano realizzate con la protezione di un nucleo di altri 6 m di terreno trattato.

A seguito dello scavo dei primi campi che avevano evidenziato una tendenza del fronte a rifluire durante l'esecuzione delle iniezioni in avanzamento, sono state sistematicamente eseguite alcune colonne di jet-grouting direttamente sul fronte di scavo risolvendo definitivamente il problema della stabilità dello stesso.

Il jet-grouting è stato inoltre impiegato precedentemente allo scavo dei vari campi per realizzare un consolidamento del terreno in avanzamento al di sotto delle basi del prerivestimento, così da predisporre una sottofondazione in grado di scongiurare il pericolo di punzonamento e di spostamento rigido verso il basso del preanello. La parte inferiore della galleria è stata trattata dalla mezza sezione con iniezioni jet-grouting a lato dei piedritti e con iniezioni chimiche e cementizie al di sotto dell'arco rovescio allo scopo di garantire l'impermeabilizzazione dello scavo successivamente completato al di sotto del livello di falda.

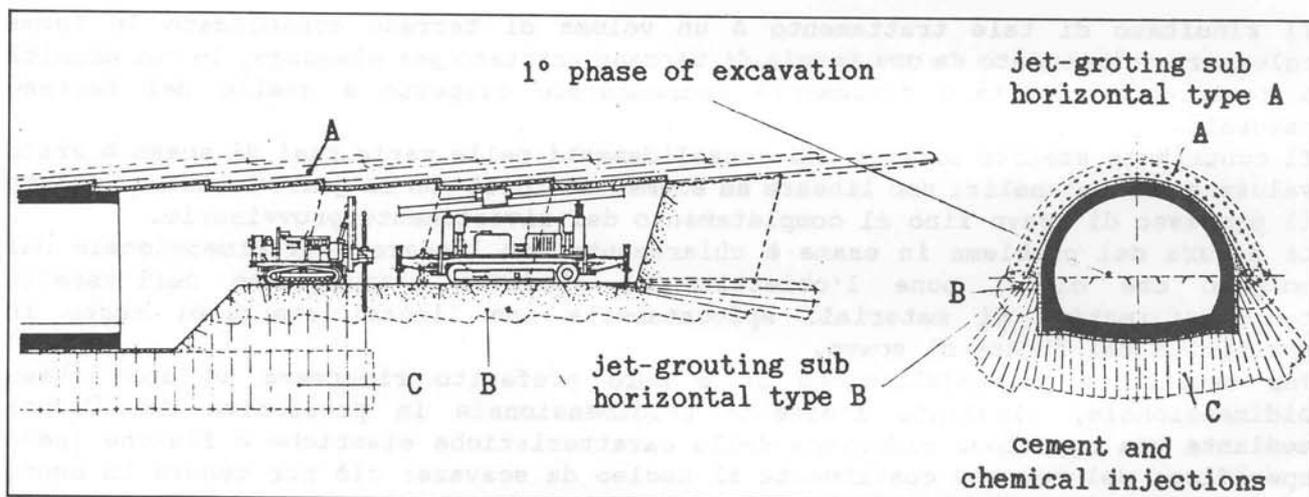


Fig. 3: Avanzamento lavori dalla mezza sezione.  
Working advancement acting on the middle section.

L'attacco delle operazioni di scavo è avvenuto come detto su due fronti contrapposti in due aree adiacenti al rilevato stradale. È stato dunque necessario realizzare adeguate opere di confinamento dei fronti di attacco che dovevano essere profilati in verticale per altezze dell'ordine dei  $10+12 \text{ m}$ . Anche in questo caso il jet-grouting ha fornito una soluzione vantaggiosa al problema consentendo la

costruzione di due paratie d'imbocco di notevole spessore, realizzate con terreno consolidato in grado di adempiere alla necessaria funzione statica di contenimento evitando qualsiasi rilassamento del terreno al piede del rilevato della tangenziale senza l'ausilio di tiranti, che avrebbero interferito con gli scavi.

Durante la costruzione è stata prevista ed attuata una campagna di misure in corso d'opera per il controllo delle deformazioni del terreno, dei cedimenti superficiali e del comportamento della galleria.

- La strumentazione installata e le misure effettuate consistono essenzialmente in:
- rilevamenti topografici di capisaldi superficiali ubicati lungo le direttrici parallele all'asse della tangenziale e sub-ortogonali rispetto all'asse della galleria, nonchè in corrispondenza delle travi di coronamento delle paratie d'imbocco;
  - estensimetri multibase verticali (4 e 3 basi) ubicati lungo due direttrici parallele all'asse della tangenziale in numero di 5 per ogni direttrice, con controllo topografico della testa degli strumenti;
  - inclinometri verticali ubicati in numero di 2 per ognuna delle direttrici di cui al p.to b);
  - misura di convergenza delle gallerie con 3 stazioni a tre chiodi ciascuna;

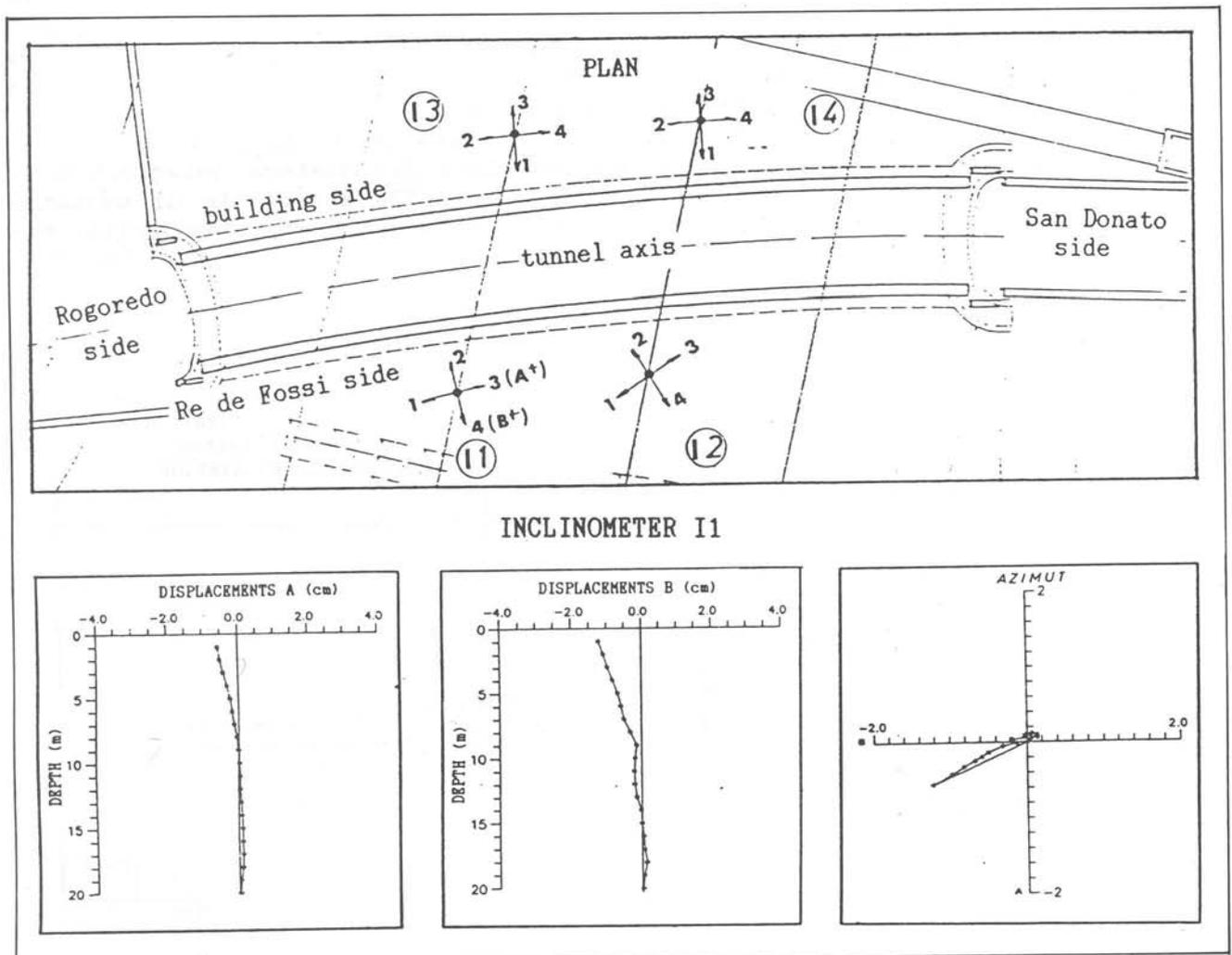


Fig. 4: Diagrammi letture e posizionamento dell'inclinometro I1  
Position and readings inclinometer I1.

e) celle di pressione ubicate tra terreno e prerivestimento della galleria in numero di 3 per ognuna delle 3 sezioni corrispondenti alle stazioni di convergenza di cui al p.to d).

L'analisi dei risultati delle misure è particolarmente interessante in quanto esse sono relative ad un sistema costruttivo innovativo nel campo degli scavi in ambiente urbano milanese, applicato in condizioni che possono con buona ragione essere definite difficili.

Si vuole per prima cosa sottolineare che la strumentazione impiegata non ha rilevato sollevamenti a conferma del fatto che le iniezioni jet-grouting possono essere utilizzate con coperture estremamente ridotte senza provocare disturbi in superficie.

L'andamento nel tempo dei cedimenti dei capisaldi topografici evidenzia una prima fase di cedimento durante le fasi di scavo della mezza sezione ed una successiva più modesta ripresa dei fenomeni deformativi durante lo scavo di ribasso.

La quota parte di cedimento già avvenuto prima del passaggio del fronte di scavo varia in genere da un quarto alla metà di quello complessivo dovuto allo scavo della calotta, passando dagli strumenti posti lateralmente a quelli in asse galleria. Le deformate inclinometriche evidenziano spostamenti orizzontali massimi in prossimità della superficie diretti sempre verso la galleria e verso gli imbocchi, così come del resto era logico attendersi pensando ad un richiamo di terreno nella direzione del fronte di avanzamento (Fig.4). Benchè le misure inclinometriche non siano numerose, l'esame delle deformazioni orizzontali in profondità, che risultano essere estremamente contenute ed inferiori al millesimo, sembrerebbe suggerire la possibilità di eseguire un dimensionamento del rivestimento considerando spinte a riposo invece che spinte attive come era invece stato assunto in sede progettuale. Per quanto riguarda i cedimenti conseguenti allo scavo, si ritiene che essi siano dovuti in larga misura ad una certa deformabilità del sistema jet-grouting - prerivestimento causata sia dalla non uniformità della superficie di contatto terreno consolidato - spritz-beton, spesso affetta da vuoti ed irregolarità, sia dalla presenza di porzioni di terreno trattato tra colonna e colonna e che forse

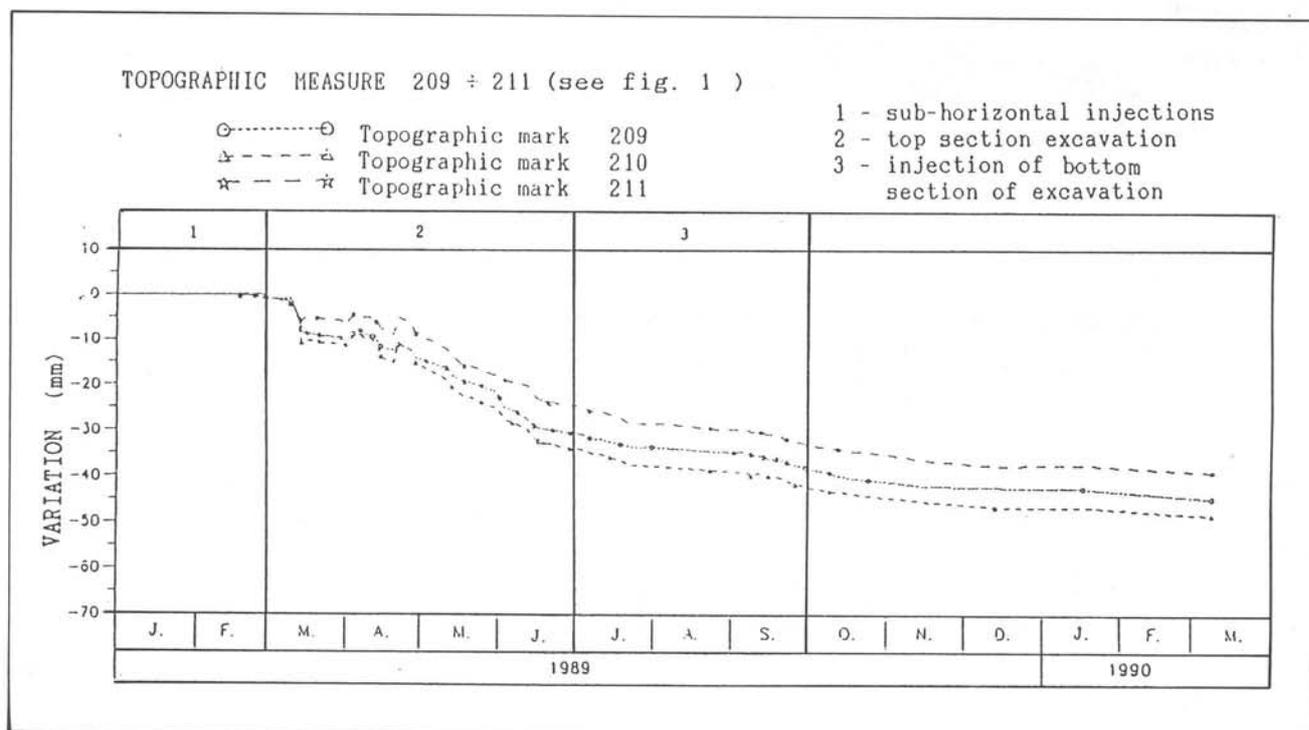


Fig. 5: Variazioni battute topografiche dei capisaldi 209 ÷ 211 (vd. Fig. 1).  
Topographic measures of marks 209 ÷ 211 (see Fig. 1).

sarebbe possibile eliminare, fermi restando gli interassi applicati nel presente lavoro, solo a prezzo di un aumento dei tempi di trattamento.

Il cedimento superficiale finale massimo in asse galleria di 4÷5 cm è da ritenersi del tutto accettabile viste le coperture, le condizioni morfologiche del rilievo da attraversare, le caratteristiche geotecniche dei terreni (prevalentemente sabbie limose per quanto riguarda il terreno in situ e materiale piuttosto grossolano per la porzione superiore della galleria scavata attraverso il rilevato stradale), la presenza di falda acquifera al di sotto del piano dei centri della galleria, nonché le vibrazioni provocate dal transito di mezzi pesanti; benchè il cedimento assoluto non sia trascurabile, lo spostamento relativo fra i vari punti di misura è assai modesto (dell'ordine max. di 1 cm) e comporta distorsioni massime di 1/700.

E' pertanto giustificato il fatto che il manto stradale, malgrado i cedimenti rilevati dagli strumenti, sia rimasto integro e privo di lesioni e non si siano riscontrati problemi nel normale svolgimento del traffico superficiale (Fig.5).

Lavoro:	Linea 3 Metropolitana Milanese - Lotto 3
Direzione della costruzione e della progettazione:	MM Strutture ed Infrastrutture del Territorio, S.p.A.
Impresa costruttrice:	Consorzio V.A.S.C.O.
Impresa specializzata:	Icos S.p.A.
Progettazione esecutiva:	Rocksoil S.p.A.