

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

B. Cavagna, G. Ghelfi, P. Lunardi, E. M. Pizzarotti

**GALLERIA DI LINEA DEL COLLEGAMENTO FERROVIARIO PASSANTE DI MILANO.
CONTRIBUTO STATICO A LUNGO TERMINE DEL CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO**

*RAILWAY LINK LINE TUNNEL IN MILAN. LONG-TERM STATIC
CONTRIBUTE OF GROUTED SOIL*

ESTRATTO/REPRINT

ATTI
PROCEEDINGS

VOL. I

**GALLERIA DI LINEA DEL COLLEGAMENTO FERROVIARIO PASSANTE DI MILANO.
CONTRIBUTO STATICO A LUNGO TERMINE DEL CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO**

*RAILWAY LINK LINE TUNNEL IN MILAN. LONG-TERM STATIC
CONTRIBUTE OF GROUTED SOIL*

Bruno CAVAGNA, MM Strutture ed Infrastrutture per il territorio SpA, Milano, Italia
Giuseppe GHELFI, MM Strutture ed Infrastrutture per il territorio SpA, Milano, Italia
Pietro LUNARDI, Università di Parma, Italia
Enrico Maria PIZZAROTTI, Rocksoil SpA, Milano, Italia

Vengono esposti gli aspetti progettuali inerenti al dimensionamento delle strutture di rivestimento della galleria di Linea del Passante Ferroviario di Milano realizzata previo consolidamento del terreno a mezzo di iniezioni e le risultanze delle misurazioni effettuate per il controllo delle ipotesi di progetto.

The tunnel in question, subcircular with a double track, passes under a major road which bears a great deal of traffic, with a variable overburden of 10÷13 m, in a completely built-up area. The tunnel has an internal diameter of 8.80 m (Fig. 1). At the beginning of the work, the pilot tunnel had already been completed for the entire stretch of this section. The possibility of building a shaft almost in the centre of the section allowed works to begin outward from the shaft in both directions simultaneously.

After the construction of the shaft and the tunnel which links it to the pilot, the grouting injections had begun (Figg. 2 e 3). For tunnels of these dimensions, the thickness of the grouted layer normally achieved is 2.5÷3.0 m (Fig. 4).

Following the completion of the injections, it was possible to proceed from the first phase of the excavation to the floor at the centre of the tunnel with the construction of a lining of shot concrete 20 cm thick, with wire mesh and steel ribs.

The length of each excavation section was equal to the distance between 2 steel ribs, that is, 1 m. There was no problem with stability at the excavation face or in the walls, in this phase of excavation or the next, which consists of the completion of the tunnel section from the floor at the tunnel centre to the base of the posts, and the simultaneous prolongation of the pre-lining (Fig. 5). This was done in longitudinal sections of 1 m. The cast lining was completed in two parts: first the invert and then the top section. The thickness of the lining could, at first sight, seem too great. However, the technical norms of MM "Strutture e Infrastrutture del Territorio" S.p.A., the Company which manages construction, demanded that this was carried out for safety reasons:

- not taking into account the improvement of the ground surrounding the cavity;
- considering the weight imposed on the structure by the entire overburden.

For tunnels of this type these limitations demand a lining thickness of 60 cm, reinforced with about 70 Kg of steel per m³ concrete.

Thanks to years of experience on the long-term behaviour of chemical and cement grouting, and contrary to the above-mentioned norms, it was decided, after finite element analysis and carrying out full checks with instruments placed in the lining, to avoid reinforcing the lining for a modest increase in its thickness, as an experiment.

The final lining was, therefore, constructed in simple concrete with a thickness of 70 cm.

In Fig. 7, the trend of the surface settlements of the topographic marks positioned according to the cross-section in Fig. 6 is shown. As you will note, the settlements during pilot tunnel excavation are not negligible compared to those which appear during excavation of the major tunnel. The final settlement value falls approximately within that predicted at the planning stage, with a finite element analysis of the excavation

phases of the tunnel (Fig. 8). In this latter, figures of elasticity modulus of grouted soil were about 2+3 times those of the natural soil.

The correspondence between calculated and actual settlements is an indication of the success of the method, and also of the long-term static benefits of injected ground (fig. 9).

Il tratto di galleria di linea del lotto 1PA, facente parte del Passante Ferroviario di Milano, si sviluppa con un tracciato rettilineo per ~430 m a partire dall'incrocio tra V.le Tunisia e Via Lazzaretto fino all'incrocio tra V.le Tunisia e Corso Buenos Aires. La galleria in esame, subcircolare a doppio binario, sottopassa una strada ad alta intensità di traffico con coperture variabili da 10 a 13 m, in un'area completamente edificata e percorsa da una fitta rete di sottoservizi ubicati per lo più nei primi 5 metri di profondità. Le dimensioni della galleria sono di 8.80 m di diametro interno (Fig. 1).

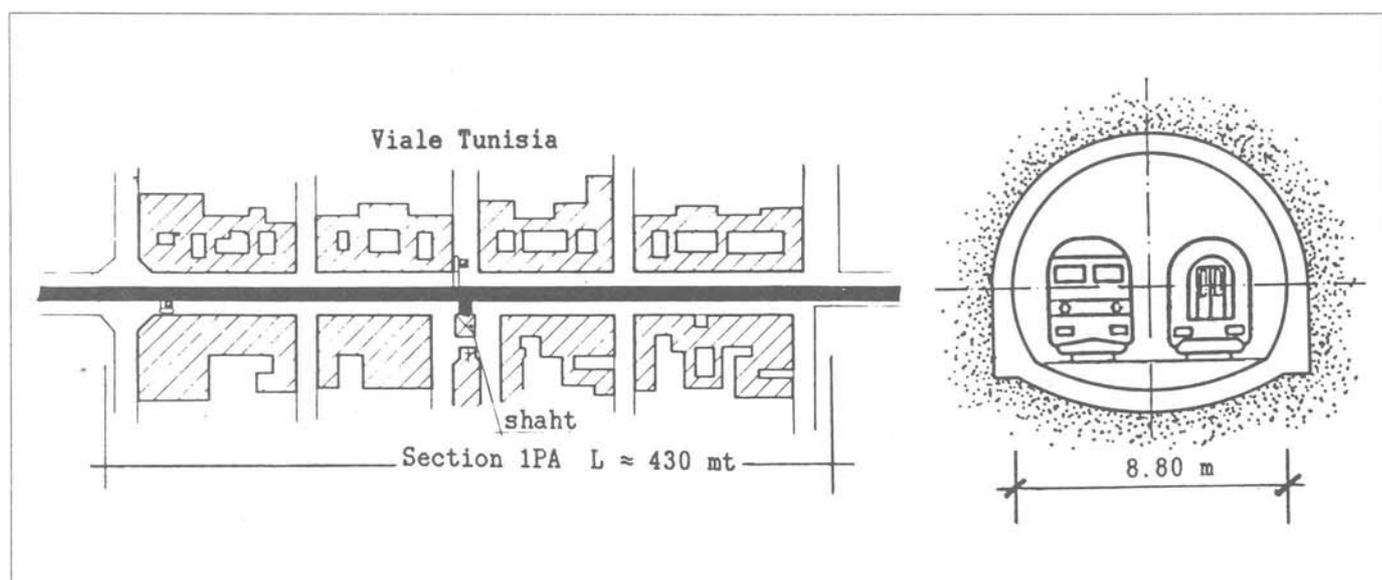


Fig. 1: Planimetria e sezione tipo trasversale della galleria.
Tunnel plan, typical cross section.

Il terreno interessato dallo scavo è costituito da depositi alluvionali la cui composizione granulometrica varia dal campo delle ghiaie sabbiose a quello delle sabbie limose. La sua permeabilità, in funzione della granulometria, raggiunge valori minimi dell'ordine di 10^{-4} cm/s. In ragione delle sue caratteristiche di addensamento, esso viene classificato come terreno incoerente ($c = 0$) con angoli di attrito interno medi di 35° e modulo elastico variabile in funzione della profondità. La falda, sempre presente, è sita ad una quota assoluta di $\sim +100$ m s.l.m. a ~ 20 m dalla superficie.

La metodologia che è stata adottata, in questo tipo di terreno, per lo scavo a foro cieco della galleria ferroviaria consta schematicamente delle seguenti fasi esecutive (Fig. 2):

- 1) realizzazione di un preforo del diametro esterno di 3.2 m a mezzo di uno scudo meccanizzato a fronte chiuso ed attacco integrale con montaggio di un rivestimento costituito da centine circolari in acciaio e panconcelli di legno dello spessore totale cm 12;
- 2) esecuzione di iniezioni di consolidamento sul contorno della futura cavità a mezzo di tubi valvolati in pvc dall'interno del preforo;
- 3) scavo della galleria in più fasi e tempi con contemporanea posa di un prerivestimento costituito da centine in acciaio e spritz-beton armato con rete elettrosaldata;
- 4) impermeabilizzazione e getto in più fasi del rivestimento interno in calcestruzzo armato.

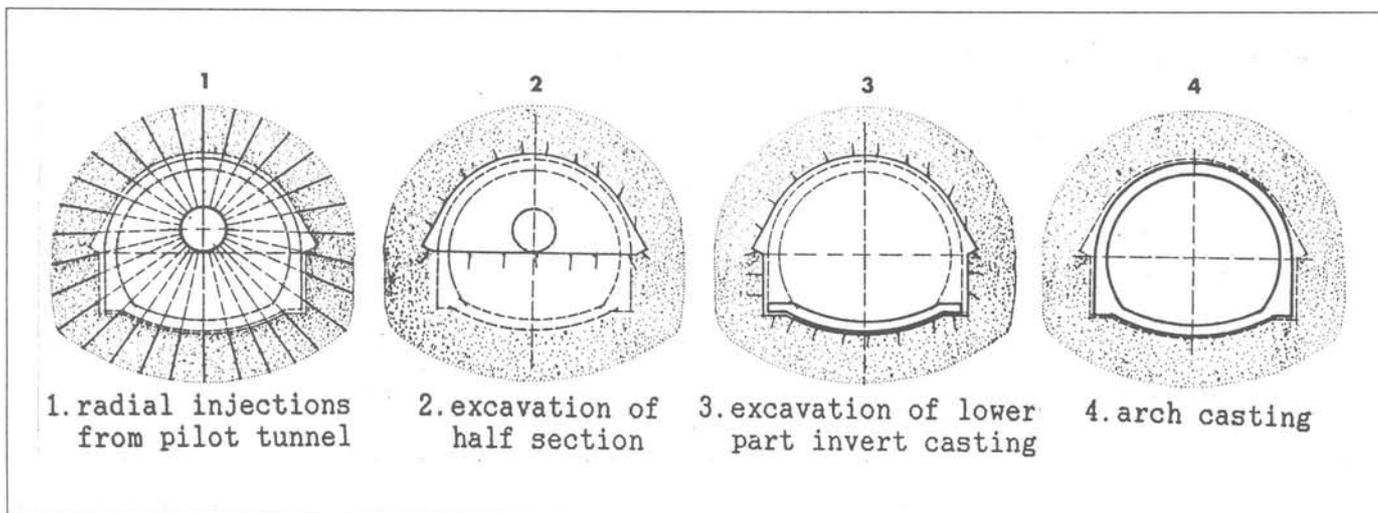


Fig. 2: Fasi progressive dei lavori per la galleria con iniezioni di consolidamento. Progressive stages of work on the tunnel with the use of grout injections.

All'atto della consegna dei lavori era già stato realizzato, lungo tutta la tratta di cui il lotto fa parte, il preforo centrale (Fig. 3). Il progetto prevedeva l'accesso agli scavi in sotterraneo da un pozzo ubicato in posizione pressochè baricentrica. A seguito dello scavo del pozzo e delle gallerie di collegamento al foro pilota si è dato inizio alle iniezioni di consolidamento con spessore del trattamento sul contorno della galleria di 2.5+3.0 m (Fig. 4).

Le miscele di consolidamento utilizzate sono state essenzialmente di due tipi:

- cementizie: miscele ternarie (acqua-cemento-additivo colloidale);

- chimiche: miscele silicatiche.

Le miscele chimiche sono state utilizzate per lo più ad integrazione delle cementizie. In effetti queste ultime mostrano notevoli limiti a permeare e trattare uniformemente i livelli di terreno a permeabilità inferiore a 10^{-3} cm/s. A seguito del completamento delle iniezioni si è proceduto quindi allo scavo di prima fase, fino al piano dei centri della galleria, con posa in opera di un rivestimento in calcestruzzo proiettato di 20 cm di spessore armato con rete elettrosaldata e centine in acciaio (Fig. 5).

La profondità degli sfondi di scavo è stata pari al passo delle centine e cioè di 1 m. Non c'è stato alcun problema di stabilità del fronte né delle pareti dello scavo sia in questa fase sia nella successiva di ribasso avvenuto di testa sempre per sfondi di profondità pari al passo delle centine e con immediata sottomurazione del prerinestimento. Il getto del rivestimento definitivo è avvenuto in due fasi: per primo l'arco rovescio e quindi la calotta.

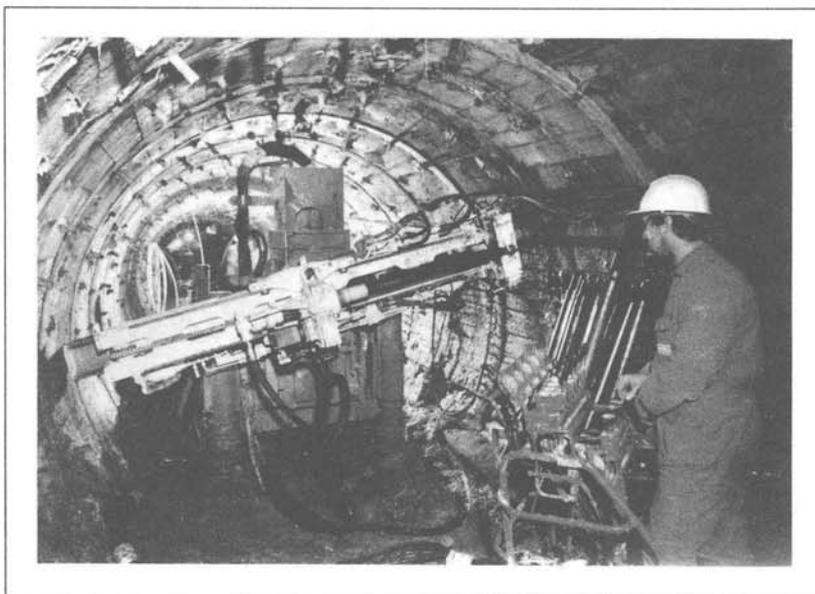
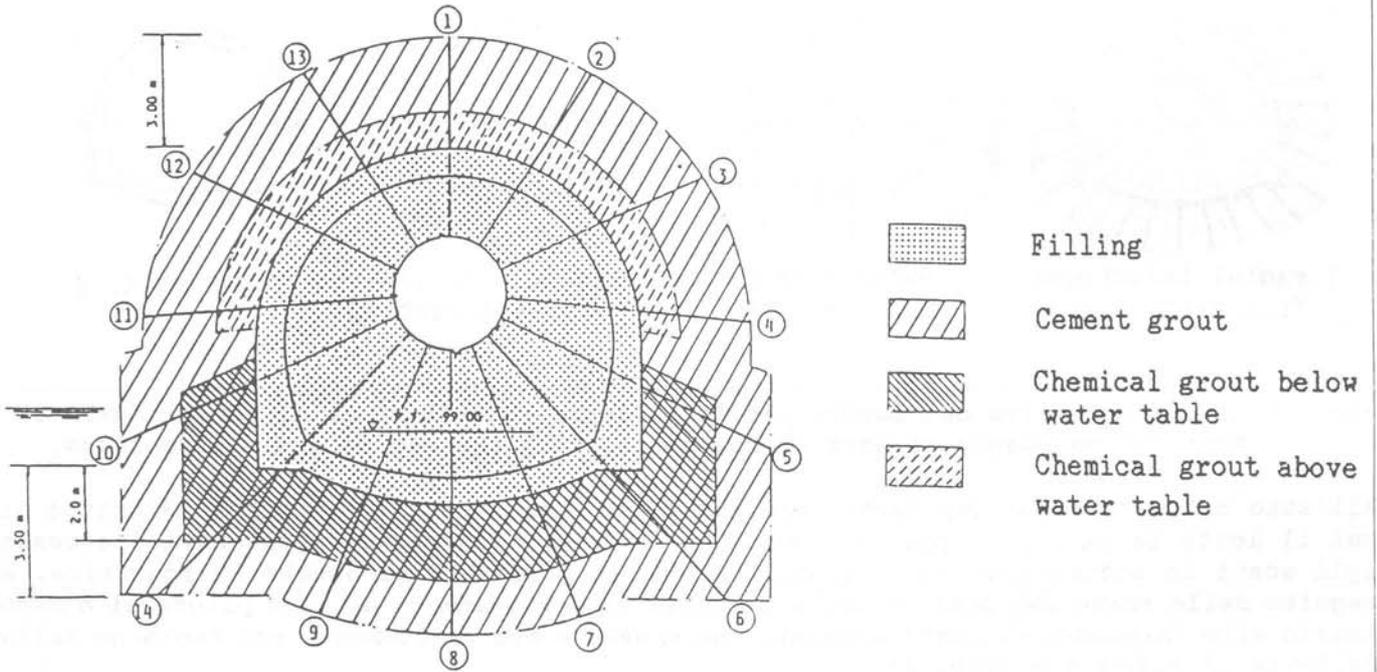


Fig. 3: Iniezioni di consolidamento a mezzo di tubi valvolati in P.V.C. dall'interno del foro pilota.

Grouting injections executed from the pilot tunnel by means of P.V.C. with valves.

Railway Link - Section 1PA



Consolidation execution by Consonda S.p.A.

Fig. 4: Consolidamento e impermeabilizzazione del terreno (interasse raggiere ~0.90 m). Grout and waterproofing of the ground (distance between sections ~0.90 m).

Per il dimensionamento dei rivestimenti della galleria sono state effettuate diverse analisi in considerazione del fatto che le norme tecniche della società MM "Strutture ed Infrastrutture per il territorio" S.p.A. imponevano, a favore di sicurezza, sia di non tenere in alcun conto del consolidamento del terreno sul contorno della cavità, sia di considerare come gravante sulla struttura l'intera copertura di terreno esistente.

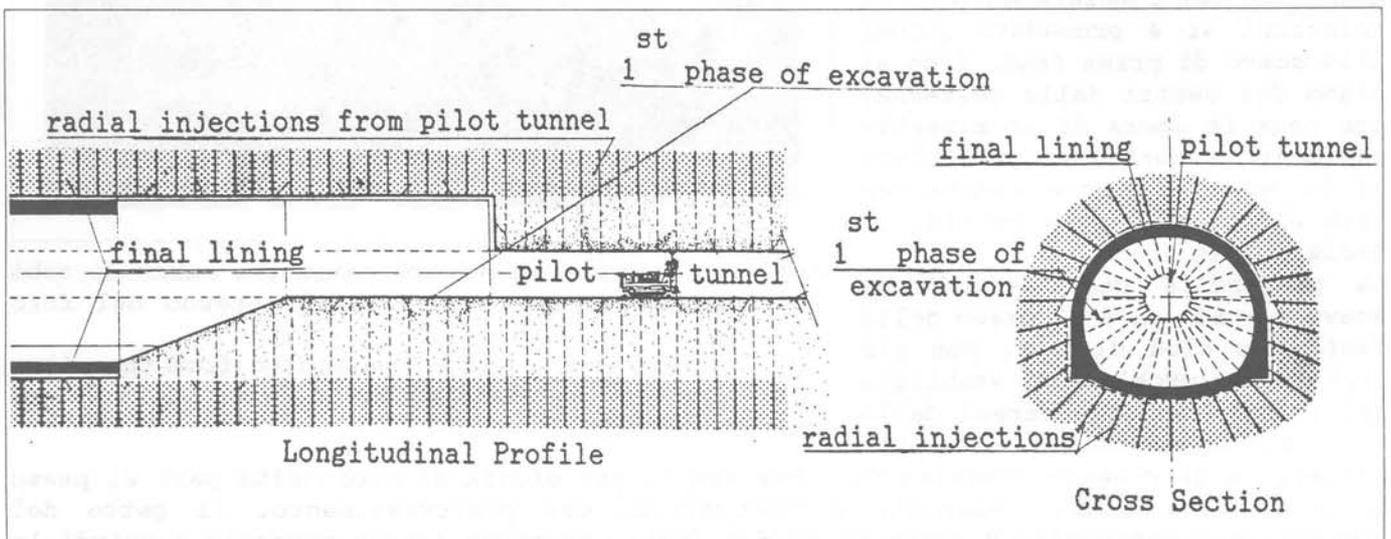


Fig. 5: Profilo longitudinale e sezione trasversale della galleria. Tunnel longitudinal profile and cross section.

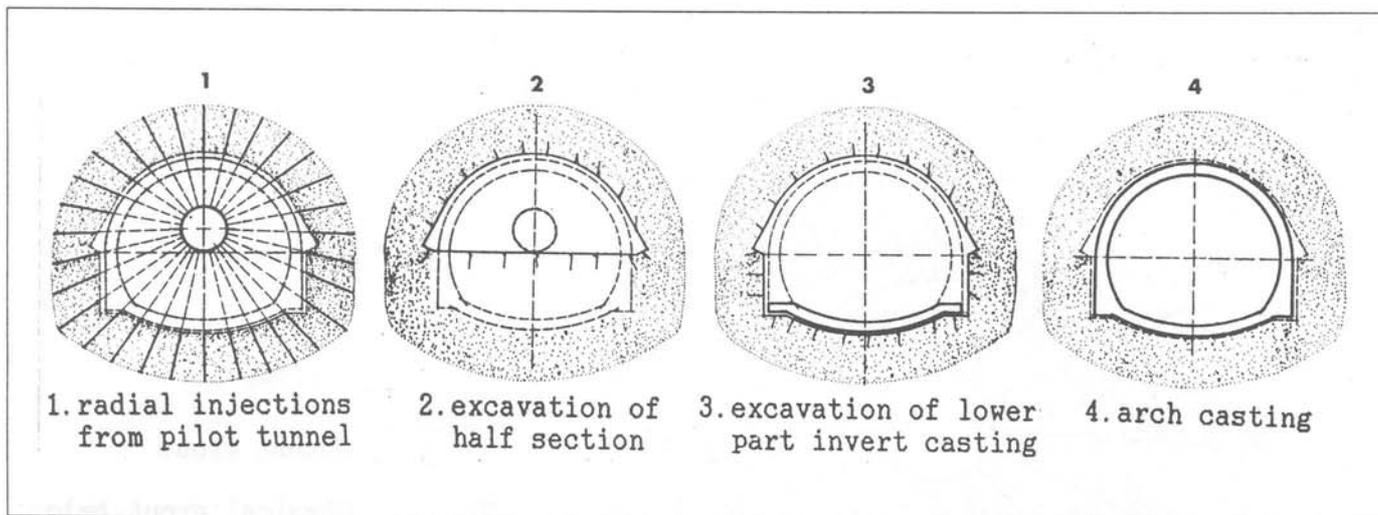


Fig. 2: Fasi progressive dei lavori per la galleria con iniezioni di consolidamento. Progressive stages of work on the tunnel with the use of grout injections.

All'atto della consegna dei lavori era già stato realizzato, lungo tutta la tratta di cui il lotto fa parte, il preforo centrale (Fig. 3). Il progetto prevedeva l'accesso agli scavi in sotterraneo da un pozzo ubicato in posizione pressochè baricentrica. A seguito dello scavo del pozzo e delle gallerie di collegamento al foro pilota si è dato inizio alle iniezioni di consolidamento con spessore del trattamento sul contorno della galleria di 2.5+3.0 m (Fig. 4).

Le miscele di consolidamento utilizzate sono state essenzialmente di due tipi:

- cementizie: miscele ternarie (acqua-cemento-additivo colloidale);

- chimiche: miscele silicatiche.

Le miscele chimiche sono state utilizzate per lo più ad integrazione delle cementizie. In effetti queste ultime mostrano notevoli limiti a permeare e trattare uniformemente i livelli di terreno a permeabilità inferiore a 10^{-3} cm/s. A seguito del completamento delle iniezioni si è proceduto quindi allo scavo di prima fase, fino al piano dei centri della galleria, con posa in opera di un rivestimento in calcestruzzo proiettato di 20 cm di spessore armato con rete elettrosaldata e centine in acciaio (Fig. 5).

La profondità degli sfondi di scavo è stata pari al passo delle centine e cioè di 1 m. Non c'è stato alcun problema di stabilità del fronte né delle pareti dello scavo sia in questa fase sia nella

successiva di ribasso avvenuto di testa sempre per sfondi di profondità pari al passo delle centine e con immediata sottomurazione del prerivestimento. Il getto del rivestimento definitivo è avvenuto in due fasi: per primo l'arco rovescio e quindi la calotta.

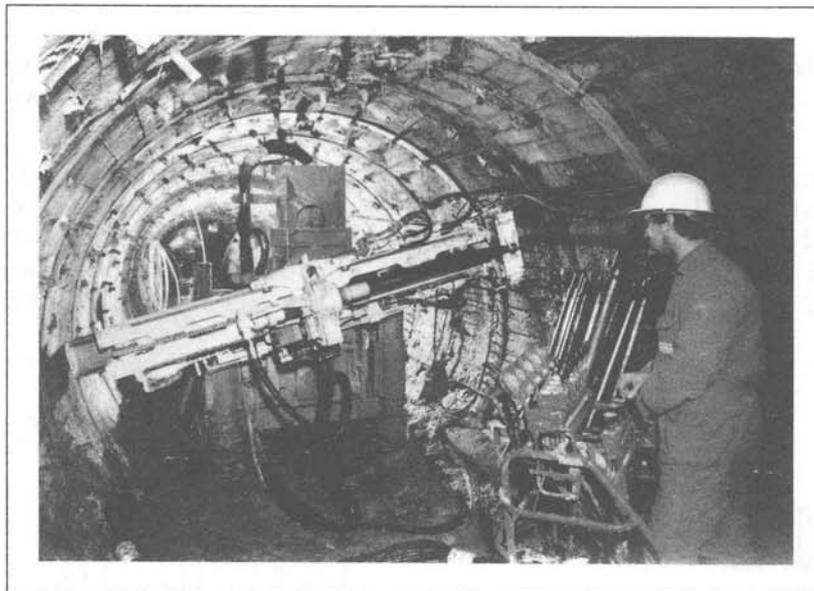
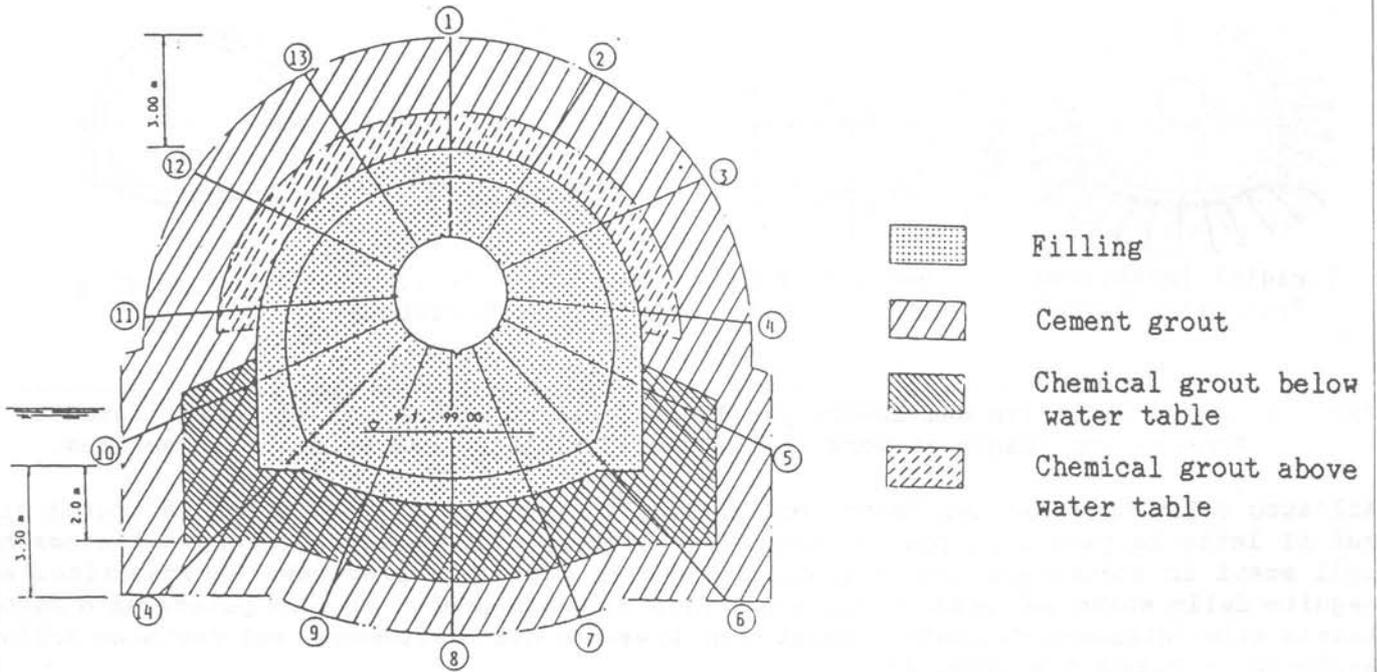


Fig. 3: Iniezioni di consolidamento a mezzo di tubi valvolati in P.V.C. dall'interno del foro pilota.

Grouting injections executed from the pilot tunnel by means of P.V.C. with valves.

Railway Link - Section 1PA



Consolidation execution by Consonda S.p.A.

Fig. 4: Consolidamento e impermeabilizzazione del terreno (interasse raggiere ~0.90 m).
Grout and waterproofing of the ground (distance between sections ~0.90 m).

Per il dimensionamento dei rivestimenti della galleria sono state effettuate diverse analisi in considerazione del fatto che le norme tecniche della società MM "Strutture ed Infrastrutture per il territorio" S.p.A. imponevano, a favore di sicurezza, sia di non tenere in alcun conto del consolidamento del terreno sul contorno della cavità, sia di considerare come gravante sulla struttura l'intera copertura di terreno esistente.

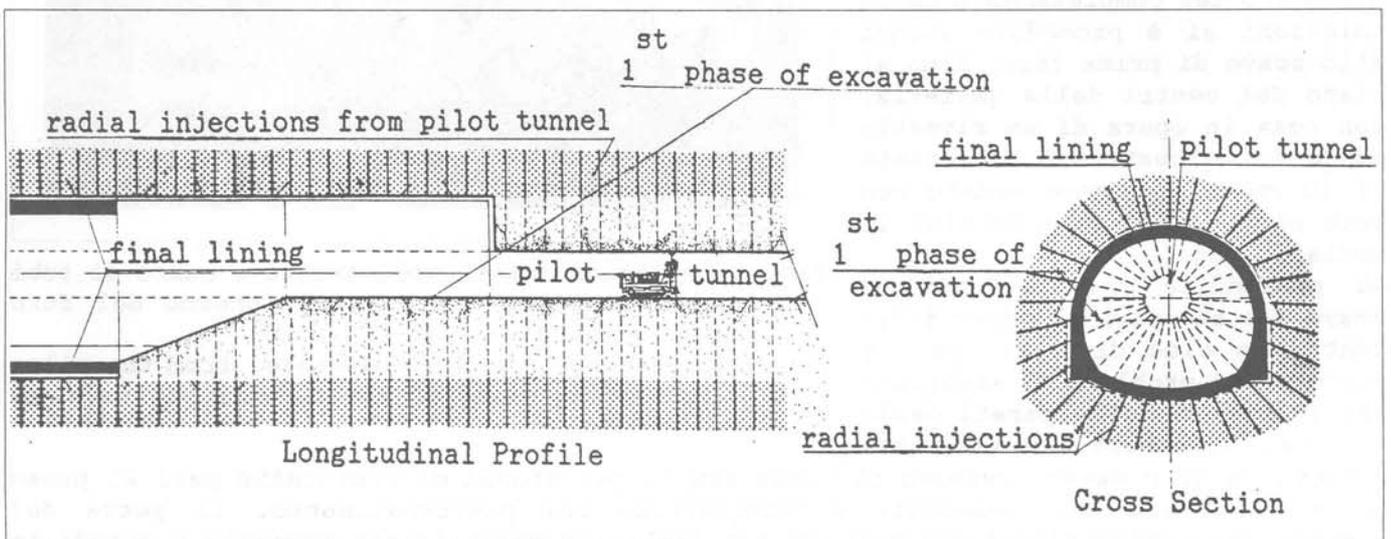


Fig. 5: Profilo longitudinale e sezione trasversale della galleria.
Tunnel longitudinal profile and cross section.

Queste norme, giusto retaggio di un recente passato in cui, sia per mancanza di sufficiente sperimentazione sia per la consuetudine nell'impiego di miscele di consolidamento (chimiche organiche) senz'altro instabili, che non assicuravano nel tempo la costanza delle caratteristiche meccaniche del terreno trattato, comportavano di fatto, per le gallerie di questo tipo, la realizzazione di rivestimenti in calcestruzzo armato di 55+60 cm di spessore con incidenze di armatura dell'ordine di 60+70 Kg/m³. Grazie alle ormai decennali esperienze circa il comportamento a lungo termine delle iniezioni cementizie e chimiche che garantiscono con sicurezza la costanza dei parametri geotecnici da attribuire al terreno trattato, si è deciso di realizzare la galleria con rivestimento non armato a prezzo di un modesto aumento di spessore dello stesso (70 cm), tenendo opportunamente conto del contributo del consolidamento e della sua collaborazione agli effetti statici col rivestimento finale.

È stato quindi effettuato uno studio della sezione di galleria mediante un modello ad elementi finiti, piano nelle deformazioni, comprendente come elementi strutturali il terreno, le parti di terreno preconsolidato, le strutture di rivestimento di prima fase ed i rivestimenti definitivi, e come carichi gli edifici circostanti ed i carichi gravanti sulla superficie libera del modello. Per tener conto del comportamento non lineare dei terreni granulari interessati dallo scavo, si è utilizzato un modello di legame costitutivo di tipo non lineare.

In questo modo si è simulato il preconsolidamento tramite la variazione delle caratteristiche geotecniche del terreno (assumendo il modulo elastico del terreno trattato pari a 3 volte quello del terreno naturale), il processo di scavo tramite l'eliminazione della rigidità e del peso degli elementi che rappresentano il terreno rimosso, e la realizzazione delle parti strutturali tramite l'introduzione di elementi di rigidità opportuna.

Per valutare inoltre lo stato tensionale del rivestimento nell'assetto definitivo, si è considerato un modello di calcolo ad E.F. che rappresentasse la situazione finale a galleria realizzata. Anche in questo caso, l'analisi è stata condotta scegliendo opportunamente le caratteristiche meccaniche dei materiali; in particolare dovendo affidare all'anello di terreno consolidato un contributo statico ben preciso anche a

lungo termine, si sono utilizzati, per quest'ultimo i parametri elastici corrispondenti ad uno stato "degradato", assumendo un valore del modulo elastico pari a 2 volte quello del terreno vergine, al fine di tenere conto di una eventuale riduzione nel tempo delle caratteristiche meccaniche.

Sulla base dei risultati ottenuti con l'analisi ad E.F. si è proceduto all'analisi dello stato tensionale del rivestimento con il metodo degli stati limite. Considerando la combinazione di quattro distinte condizioni di carico riferite ai carichi geostatici e permanenti in assenza e in presenza di falda, al ritiro e alle variazioni termiche, si sono confrontate le tensioni principali con un dominio limite bidimensionale costruito con i valori di progetto della resistenza.

I risultati forniti dai calcoli, in termini di cedimenti superficiali del terreno e di sollecitazioni tensionali del rivestimento, trovano conforto nelle misure ottenute mediante la messa in

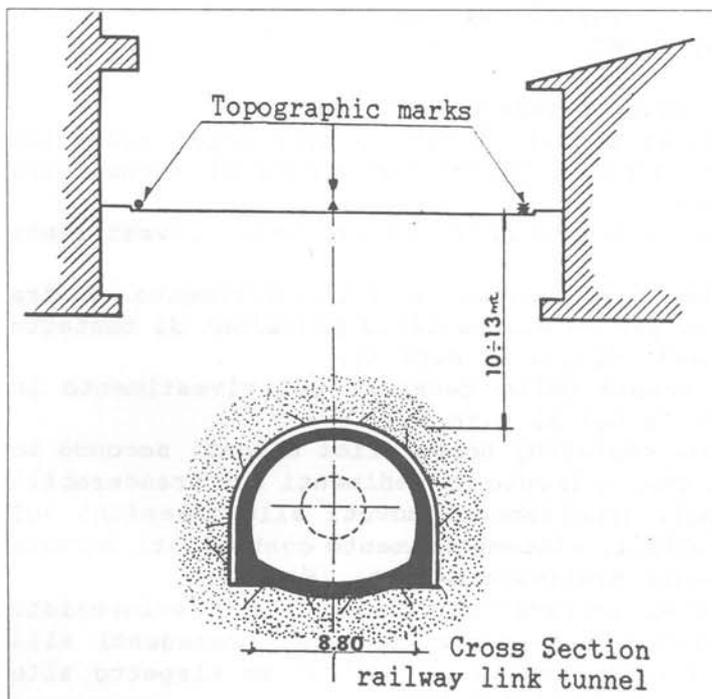


Fig. 6: Sezione trasversale della galleria con posizionamento capisaldi.
Cross section railway link tunnel with topographic marks.

Topographic Measure (road marks)

H - Excavation of pilot tunnel with shield
 L - Perforation from pilot tunnel
 N - Consolidation of two track tunnel
 S - Excavation of upper section
 T - Completion of two track tunnel
 G - Completed tunnel

○-----○ Edge Mark Total Variation = - 1.20 mm
 ▲-----▲ Center Mark Total Variation = - 0.80 mm
 ★-----★ Edge Mark Total Variation = - 0.30 mm

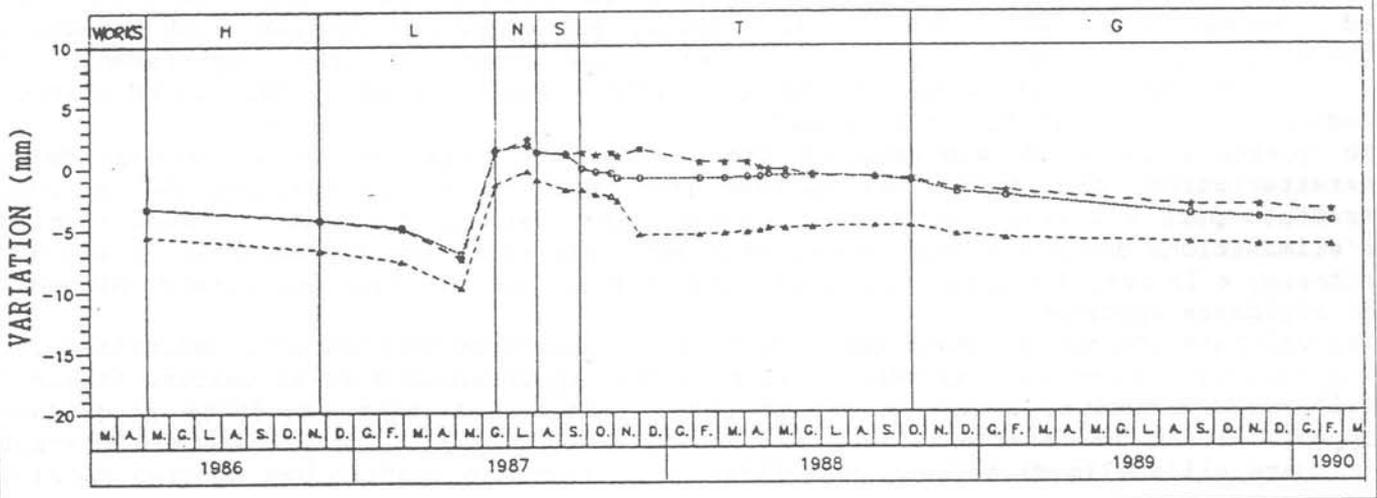


Fig. 7: Diagramma dei capisaldi topografici di superficie.
 Topographic mark measures of the surfaces.

opera di una apposita strumentazione, costituita essenzialmente da:

- rete di capisaldi topografici superficiali ubicati lungo le direttrici parallele all'asse della galleria (centro e bordo strada) in corrispondenza di determinate sezioni trasversali della galleria stessa;
- misure di convergenza della galleria effettuate dopo la realizzazione del rivestimento provvisorio;
- celle di pressione radiali installate tra terreno e prerivestimento e tra prerivestimento e rivestimento definitivo per la misura delle pressioni di contatto in corrispondenza delle sezioni trasversali di cui al p.to a);
- celle di pressione tangenziali per la misura delle tensioni nel rivestimento in corrispondenza delle sezioni trasversali di cui al p.to a).

Dai diagrammi dei cedimenti superficiali dei capisaldi topografici ubicati secondo lo schema riportato in Fig. 6, si nota infatti che, a fronte di cedimenti non trascurabili prodotti dallo scavo del foro pilota e degli innalzamenti dovuti alle iniezioni sul contorno della galleria, i cedimenti superficiali, sistematicamente controllati durante l'esecuzione dei lavori, sono risultati sempre piuttosto modesti (Fig. 7).

I rilevamenti effettuati nel centro e ai bordi della strada hanno infatti evidenziato spostamenti dell'ordine di ~ -2.00 mm rispetto alla quota del p.c. precedenti alle iniezioni di consolidamento (spostamenti assoluti s_a) e di ~ -7.00 mm rispetto alle quote del p.c. a seguito del trattamento (spostamenti relativi s_r).

Mediante una elaborazione su base statistica delle misure effettuate sia durante l'esecuzione della galleria sia a distanza di due anni, a lavori ultimati, si è constatato che, in entrambi i casi, i cedimenti del terreno sono risultati con buona approssimazione

Queste norme, giusto retaggio di un recente passato in cui, sia per mancanza di sufficiente sperimentazione sia per la consuetudine nell'impiego di miscele di consolidamento (chimiche organiche) senz'altro instabili, che non assicuravano nel tempo la costanza delle caratteristiche meccaniche del terreno trattato, comportavano di fatto, per le gallerie di questo tipo, la realizzazione di rivestimenti in calcestruzzo armato di 55+60 cm di spessore con incidenze di armatura dell'ordine di $60+70 \text{ Kg/m}^3$. Grazie alle ormai decennali esperienze circa il comportamento a lungo termine delle iniezioni cementizie e chimiche che garantiscono con sicurezza la costanza dei parametri geotecnici da attribuire al terreno trattato, si è deciso di realizzare la galleria con rivestimento non armato a prezzo di un modesto aumento di spessore dello stesso (70 cm), tenendo opportunamente conto del contributo del consolidamento e della sua collaborazione agli effetti statici col rivestimento finale.

È stato quindi effettuato uno studio della sezione di galleria mediante un modello ad elementi finiti, piano nelle deformazioni, comprendente come elementi strutturali il terreno, le parti di terreno preconsolidato, le strutture di rivestimento di prima fase ed i rivestimenti definitivi, e come carichi gli edifici circostanti ed i carichi gravanti sulla superficie libera del modello. Per tener conto del comportamento non lineare dei terreni granulari interessati dallo scavo, si è utilizzato un modello di legame costitutivo di tipo non lineare.

In questo modo si è simulato il preconsolidamento tramite la variazione delle caratteristiche geotecniche del terreno (assumendo il modulo elastico del terreno trattato pari a 3 volte quello del terreno naturale), il processo di scavo tramite l'eliminazione della rigidità e del peso degli elementi che rappresentano il terreno rimosso, e la realizzazione delle parti strutturali tramite l'introduzione di elementi di rigidità opportuna.

Per valutare inoltre lo stato tensionale del rivestimento nell'assetto definitivo, si è considerato un modello di calcolo ad E.F. che rappresentasse la situazione finale a galleria realizzata. Anche in questo caso, l'analisi è stata condotta scegliendo opportunamente le caratteristiche meccaniche dei materiali; in particolare dovendo affidare all'anello di terreno consolidato un contributo statico ben preciso anche a

lungo termine, si sono utilizzati, per quest'ultimo i parametri elastici corrispondenti ad uno stato "degradato", assumendo un valore del modulo elastico pari a 2 volte quello del terreno vergine, al fine di tenere conto di una eventuale riduzione nel tempo delle caratteristiche meccaniche.

Sulla base dei risultati ottenuti con l'analisi ad E.F. si è proceduto all'analisi dello stato tensionale del rivestimento con il metodo degli stati limite. Considerando la combinazione di quattro distinte condizioni di carico riferite ai carichi geostatici e permanenti in assenza e in presenza di falda, al ritiro e alle variazioni termiche, si sono confrontate le tensioni principali con un dominio limite bidimensionale costruito con i valori di progetto della resistenza.

I risultati forniti dai calcoli, in termini di cedimenti superficiali del terreno e di sollecitazioni tensionali del rivestimento, trovano conforto nelle misure ottenute mediante la messa in

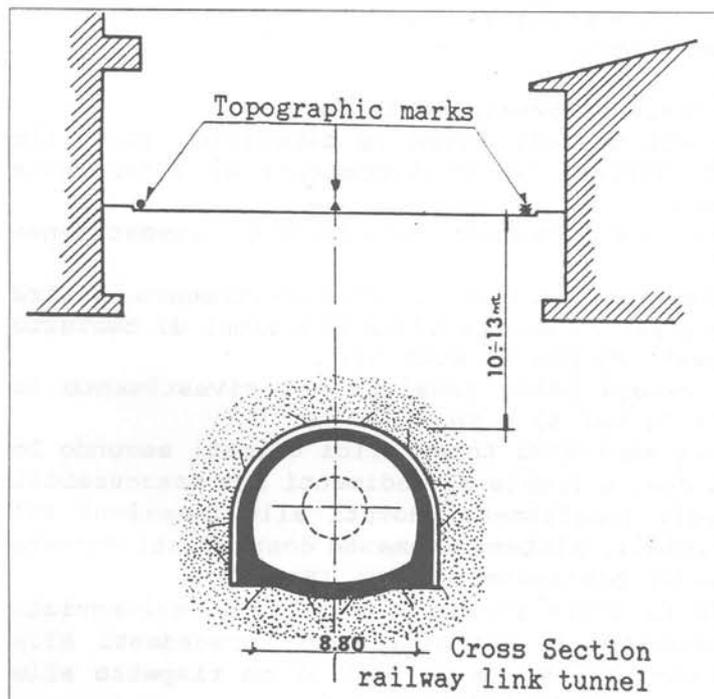


Fig. 6: Sezione trasversale della galleria con posizionamento capisaldi. Cross section railway link tunnel with topographic marks.

Topographic Measure (road marks)

H - Excavation of pilot tunnel with shield
 L - Perforation from pilot tunnel
 N - Consolidation of two track tunnel
 S - Excavation of upper section
 T - Completion of two track tunnel
 G - Completed tunnel

○-----○ Edge Mark Total Variation = - 1.20 mm
 ▲-----▲ Center Mark Total Variation = - 0.80 mm
 ★-----★ Edge Mark Total Variation = - 0.30 mm

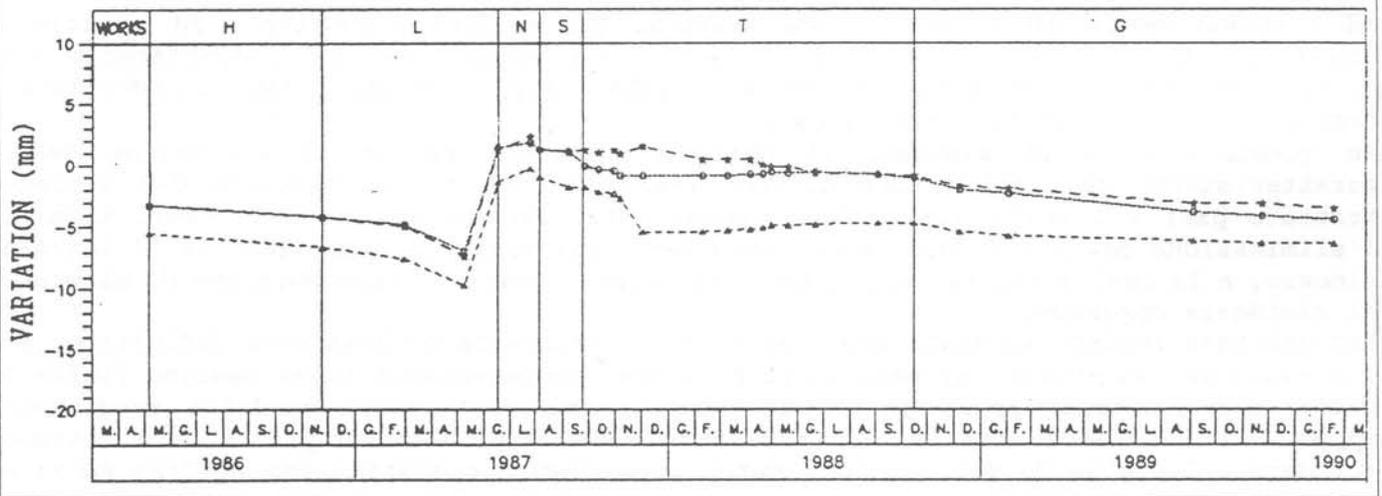


Fig. 7: Diagramma dei capisaldi topografici di superficie.
 Topographic mark measures of the surfaces.

opera di una apposita strumentazione, costituita essenzialmente da:

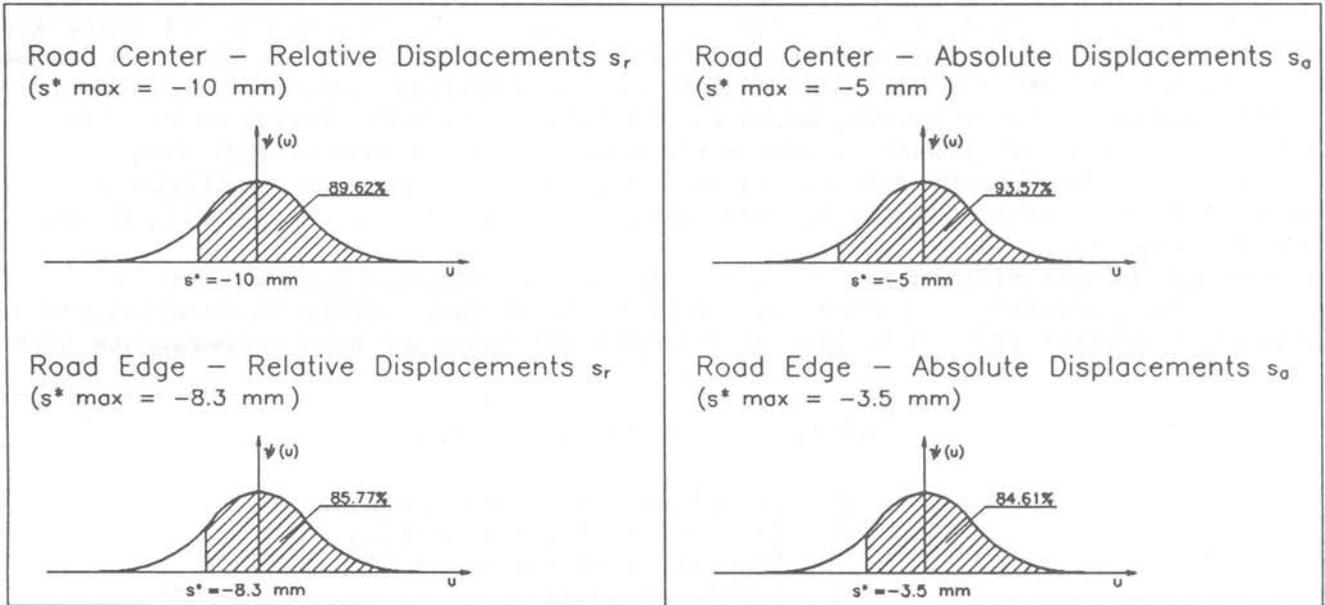
- rete di capisaldi topografici superficiali ubicati lungo le direttrici parallele all'asse della galleria (centro e bordo strada) in corrispondenza di determinate sezioni trasversali della galleria stessa;
- misure di convergenza della galleria effettuate dopo la realizzazione del rivestimento provvisorio;
- celle di pressione radiali installate tra terreno e prerivestimento e tra prerivestimento e rivestimento definitivo per la misura delle pressioni di contatto in corrispondenza delle sezioni trasversali di cui al p.to a);
- celle di pressione tangenziali per la misura delle tensioni nel rivestimento in corrispondenza delle sezioni trasversali di cui al p.to a).

Dai diagrammi dei cedimenti superficiali dei capisaldi topografici ubicati secondo lo schema riportato in Fig. 6, si nota infatti che, a fronte di cedimenti non trascurabili prodotti dallo scavo del foro pilota e degli innalzamenti dovuti alle iniezioni sul contorno della galleria, i cedimenti superficiali, sistematicamente controllati durante l'esecuzione dei lavori, sono risultati sempre piuttosto modesti (Fig. 7).

I rilevamenti effettuati nel centro e ai bordi della strada hanno infatti evidenziato spostamenti dell'ordine di ~ -2.00 mm rispetto alla quota del p.c. precedenti alle iniezioni di consolidamento (spostamenti assoluti s_a) e di ~ -7.00 mm rispetto alle quote del p.c. a seguito del trattamento (spostamenti relativi s_r).

Mediante una elaborazione su base statistica delle misure effettuate sia durante l'esecuzione della galleria sia a distanza di due anni, a lavori ultimati, si è constatato che, in entrambi i casi, i cedimenti del terreno sono risultati con buona approssimazione

a) SETTLEMENTS UNTIL 2/88



b) SETTLEMENTS UNTIL 2/90

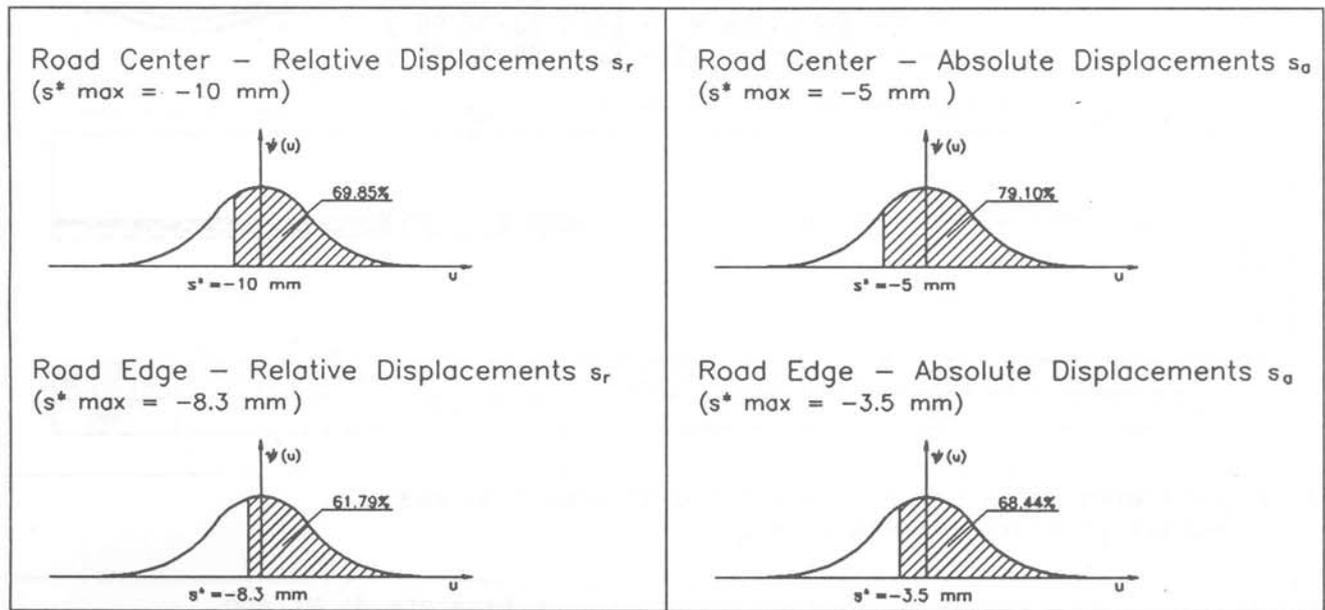


Fig. 8: Interpretazione statistica dei cedimenti relativi (s_r) e assoluti (s_a) misurati fino al 2/88 (a) e fino al 2/90 (b): calcolo della probabilità che si verifichi l'evento $s < s^*$

Il confronto delle probabilità calcolate sulla base di cedimenti misurati fino al 2/88 (a) e fino al 2/90 (b) evidenzia un contenuto incremento dei cedimenti dovuto al lento sviluppo nel tempo del fenomeno di fluage del terreno consolidato.

Statistical interpretation of relative and absolute settlements measured until 2/88 (a) and until 2/90 (b): probability that the event $s < s^*$ comes true.

The comparison between probabilities calculated on the measured settlements until 2/88 (a) and until 2/90 (b) shows a small increasing of settlements due to slow long-term development of fluage in the consolidated ground.

contenuti nei limiti definiti dal Capitolato Tecnico (s^*_{max} assoluto = -5 mm) e al di sotto dei valori calcolati mediante F.E.M. (s^*_{max} relativo = -10 mm) (Fig. 8).

È necessario sottolineare che mentre le misure che eccedono i valori calcolati possono essere spesso imputate a fenomeni locali, gli incrementi di cedimento, del resto assai contenuti, rilevati nel corso degli anni possono essere attribuiti ad un normale fenomeno di fluage del terreno consolidato, che con ogni probabilità continuerà nel tempo.

L'efficienza del consolidamento, anche a lungo termine è stata inoltre confermata dalle misure delle celle di pressione che evidenziano, anche a distanza di tempo, che le strutture di rivestimento non collaborano ancora col terreno consolidato e che la stabilità della cavità continua tuttora ad essere garantita dal solo anello di terreno trattato (Fig. 9).

Pertanto le ipotesi effettuate sul valore del modulo elastico del terreno consolidato ($E_c=3E_n$) sono corrette e il previsto parziale decadimento delle caratteristiche del terreno consolidato (fino a $E_c=2E_n$) si sviluppa nel tempo in modo estremamente lento.

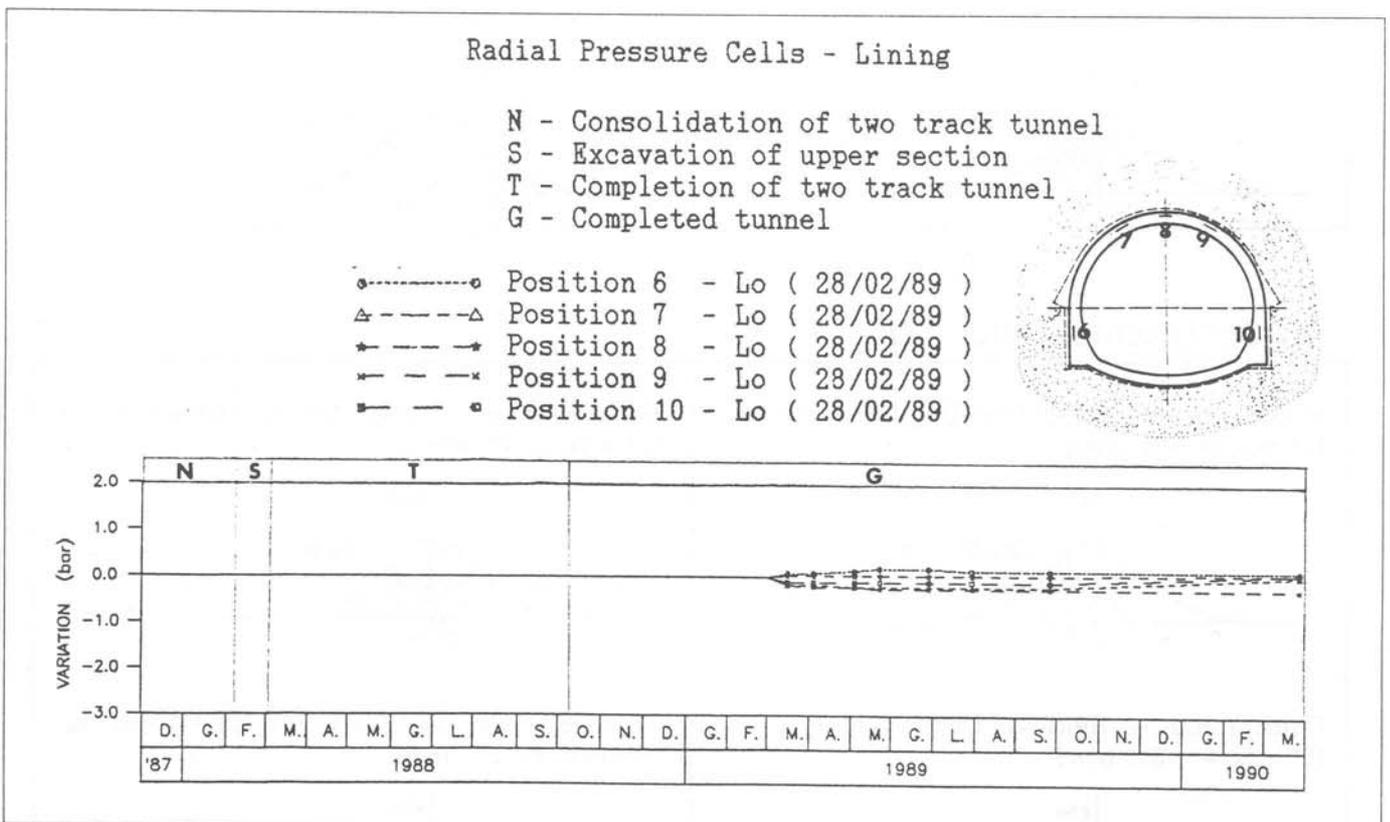


Fig. 9: Diagramma delle misure delle celle di pressione radiali.
Radial pressure cells measures.

Lavoro:	Collegamento Ferroviario Passante di Milano Lotto 1PA
Concessionaria per la progettazione e costruzione:	MM Strutture ed Infrastrutture del Territorio, S.p.A.
Impresa costruttrice:	Consorzio PAS.FER. (Italimpresit S.p.A., Asfalti Sintex S.p.A., Progetti e Costruzioni S.p.A.)
Impresa specializzata:	Consonda S.p.A.
Progettazione esecutiva:	Rocksoil S.p.A.