

LA GALLERIA "MALBORGHETTO" DELLA LINEA F.S. UDINE-TARVISIO. ESEMPIO DI PRECONSOLIDAMENTO DELL'AMMASSO ROCCIOSO DA CUNICOLO PILOTA

*THE "MALBORGHETTO" TUNNEL IN THE F.S. UDINE-TARVISIO RAILROAD.
AN EXAMPLE OF ROCK MASS CONSOLIDATION FROM THE PILOT BORING*

Renato CASALE, Ferrovie dello Stato, Italia
Alberto GAMBA, CONSORZIO CARNIA (Cogefar-Impresit, Italstrade, CCC, Cisa), Italia
Pietro LUNARDI, Università di Parma, Italia
Enrico Maria PIZZAROTTI, Rocksoil S.p.A., Italia

Si espongono gli aspetti progettuali e le modalità operative di uno tra i primi esempi di intervento di preconsolidamento da cunicolo pilota per la realizzazione di una galleria ferroviaria che attraversa porzioni di ammasso roccioso fortemente spingenti e rigonfianti.

In these late years a new technology of excavation is being confirmed in tunnelling that is the excavation along the entire track of a pilot tunnel by using a full face 4 metres diameter tunnel boring machine. This method brings many advantages in planning and construction: deep geological and geomechanical characterization, confining structures optimization in planning phase, decreasing of unexpected events during the works. Here it is described how the pilot tunnel, in presence of pushing rocks and poor geomechanical properties, allows the consolidation of the surrounding rock mass so to protect the following enlarged excavation.

1. GENERALITÀ

Nell'ambito dell'ammodernamento della linea ferroviaria Udine-Tarvisio è attualmente in corso di realizzazione la galleria Malborghetto a doppio binario di lunghezza pari a circa 8 Km e sezione di diametro interno di 10.40 m.

Lo scavo della galleria è stato preceduto (Nov. '85-Dic. '86) dall'esecuzione di un foro pilota del diametro di 3.90 m in asse tracciato tramite l'utilizzo di una macchina fresatrice ad attacco integrale che ha reso possibile l'individuazione e la caratterizzazione geologica e geomeccanica di alcune tratte (Fig. 1) il cui attraversamento da parte del solo cunicolo è stato causa di notevoli difficoltà e per le quali quindi si poneva la necessità di definire le soluzioni progettuali più idonee alla realizzazione dello scavo di allargamento.

Tali zone sono geologicamente contraddistinte dalla presenza della formazione del "Gruppo del Permo-carbonifero Pontebbano" costituita dall'alternanza di vari litotipi. All'interno del cunicolo essa si è manifestata, in massima parte, secondo una litofacies rappresentata da argilloscisti neri a giacitura subverticale, spesso intensamente ripiegati e scagliettati.

2. COMPORTAMENTO DELL'AMMASSO ROCCIOSO DURANTE ED A SEGUITO DELLO SCAVO DEL CUNICOLO PILOTA

La formazione del "Gruppo del Permo-carbonifero Pontebbano" è stata rinvenuta dal foro pilota in cinque tratte distinte, fra le progressive 2880 m e 4180 m, il cui attraversamento ha pesantemente influenzato i tempi globali di esecuzione (Fig. 1). A parte gli inconvenienti legati alla presenza di gas (progr. 3790 m), l'avanzamento in questo materiale ha infatti comportato il costante superamento di difficoltà dovute all'instabilità sia delle pareti che del fronte di scavo. A tale scopo sono stati eseguiti sistematicamente interventi di contenimento consistenti, per le tratte peggiori, nella posa in opera di un blindaggio circolare chiuso realizzato

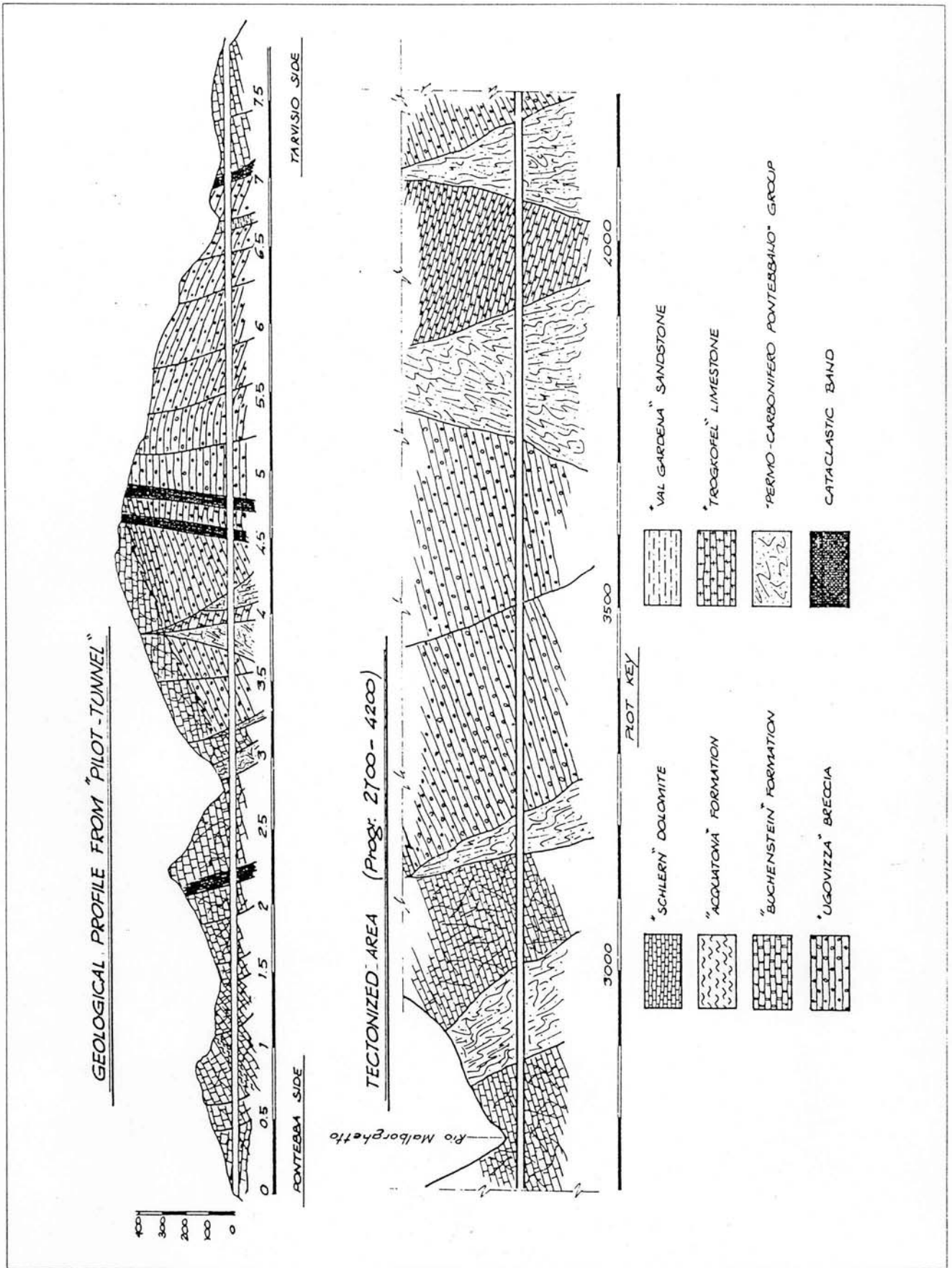


Fig. 1: Profilo geologico.
Geological profile.

con liner-plates in acciaio (Foto 1) e nel sostegno del fronte con calcestruzzo proiettato, e, normalmente, in un rivestimento in calcestruzzo proiettato armato con rete elettrosaldata e rinforzato con bullonature radiali.

Non è stato infrequente inoltre il blocco della testa fresante dovuto alla immediata deformazione della cavità subito dopo lo sfondo.

Il superamento di queste zone particolari (in totale 440 m) ha richiesto circa 3 mesi di lavoro durante i quali la produzione giornaliera variava da un minimo di 1 ad un massimo di 6 m/g, in confronto ad una velocità media di avanzamento su tutta la galleria di 30+35 m/g (Fig. 2).



Foto 1: Blindaggio sistematico del foro pilota.
Systematic posing of liner plate in the pilot tunnel.

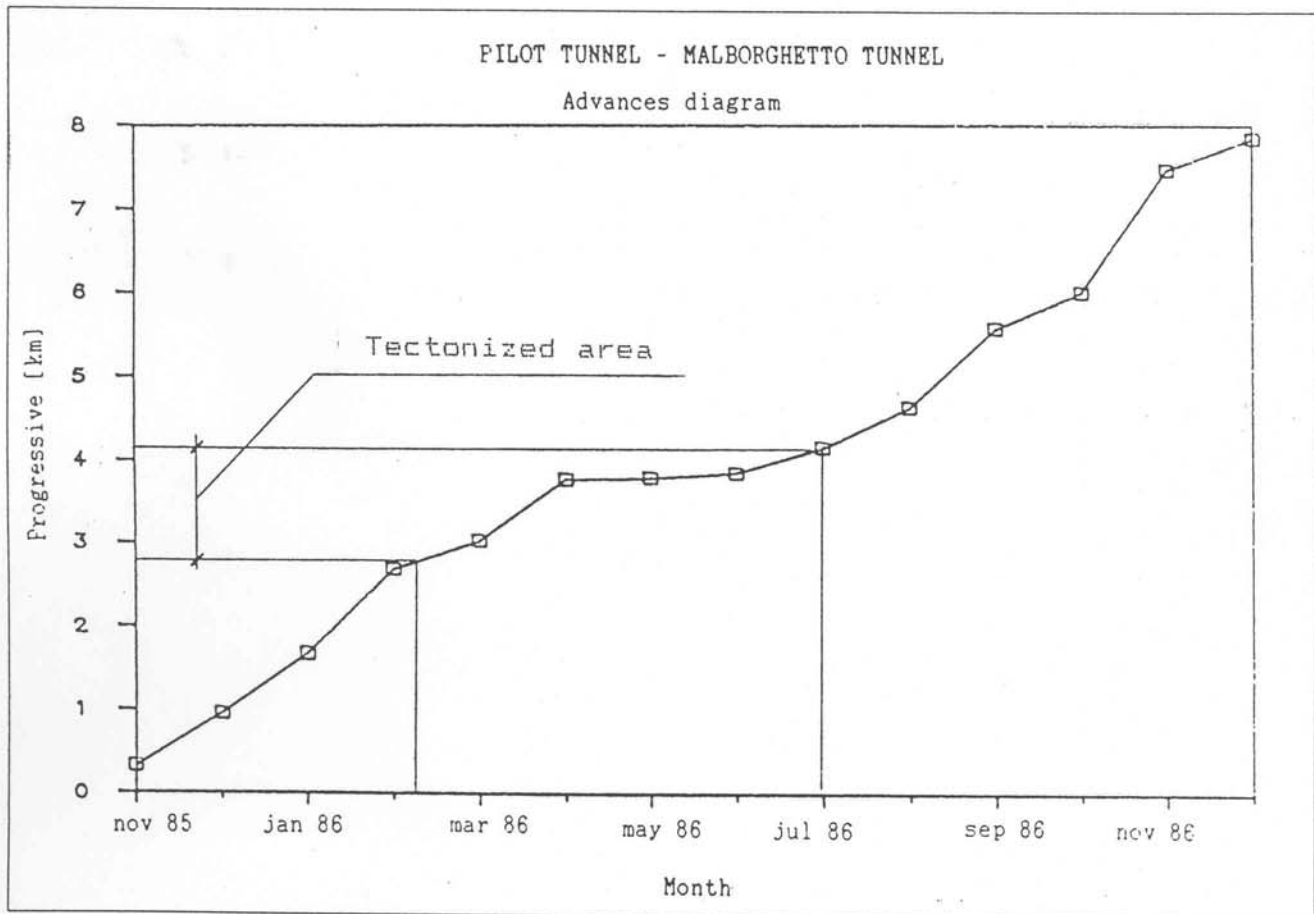


Fig. 2: Tempi di avanzamento del foro pilota.
Pilot-tunnel driving-times.

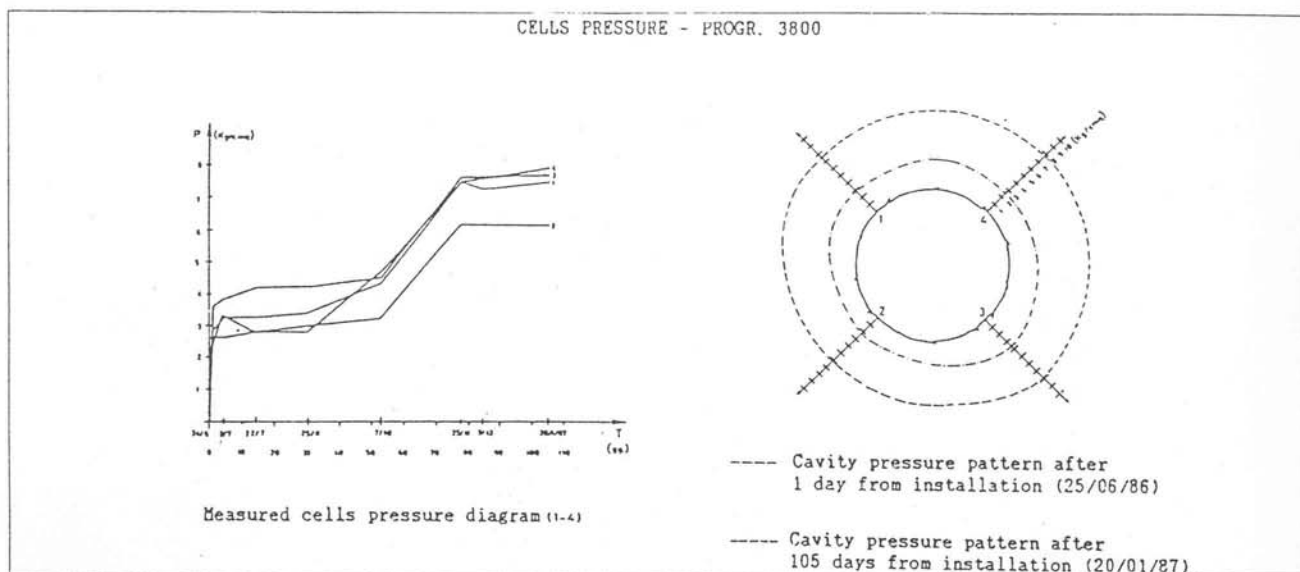


Fig. 3: Celle di pressione.
Pressure cells.

Nonostante i pesanti interventi di stabilizzazione, a seguito dello scavo si sono avuti importanti fenomeni deformativi che hanno comportato la rottura in diverse zone sia del rivestimento in calcestruzzo proiettato sia del blindaggio in acciaio (Foto 2, Fig. 3). In alcuni punti si sono raggiunte convergenze diametrali di 100+150 cm (su un diametro di 3.90 m) che continuavano ad evolvere nel tempo anche a distanza di parecchi mesi dallo scavo.

L'Impresa Esecutrice è stata quindi costretta ad effettuare, in più tempi, interventi integrativi di ripristino delle strutture di confinamento nel tentativo di bloccare l'evolversi delle deformazioni che risultavano particolarmente rilevanti nella parte bassa del foro pilota dove l'acqua in deflusso proveniente dalle porzioni della galleria site più a monte, attivava con tutta evidenza un importante fenomeno di rigonfiamento ed alterazione.

Per avere un'idea del comportamento tenso-deformativo della cavità si esaminino i risultati delle misure delle celle pressiometriche installate alla progressiva 3800 m a tergo del blindaggio in acciaio per il rilievo delle pressioni di contatto terreno-rivestimento (Fig.4).

Pur avendo perso la possibilità di rilevare una buona parte dei carichi dovuti alle sovratensioni immediate indotte dallo scavo (tali strumenti sono stati messi in opera ad una distanza di ~40 m dal fronte di scavo) le celle hanno permesso la misura di valori di pressione via via crescenti fino a ~100 gg. dall'installazione quando, in concomitanza con il definitivo collasso del blindaggio, sono state raggiunte pressioni radiali grossomodo uniformi sul contorno dell'ordine delle 60+80 t/m².

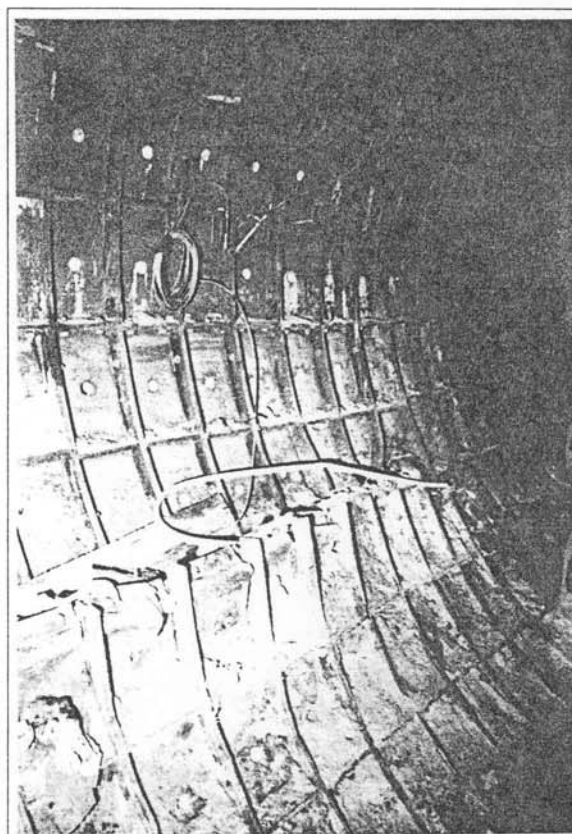


Foto 2: Rotture del blindaggio.
Liner plate failure.

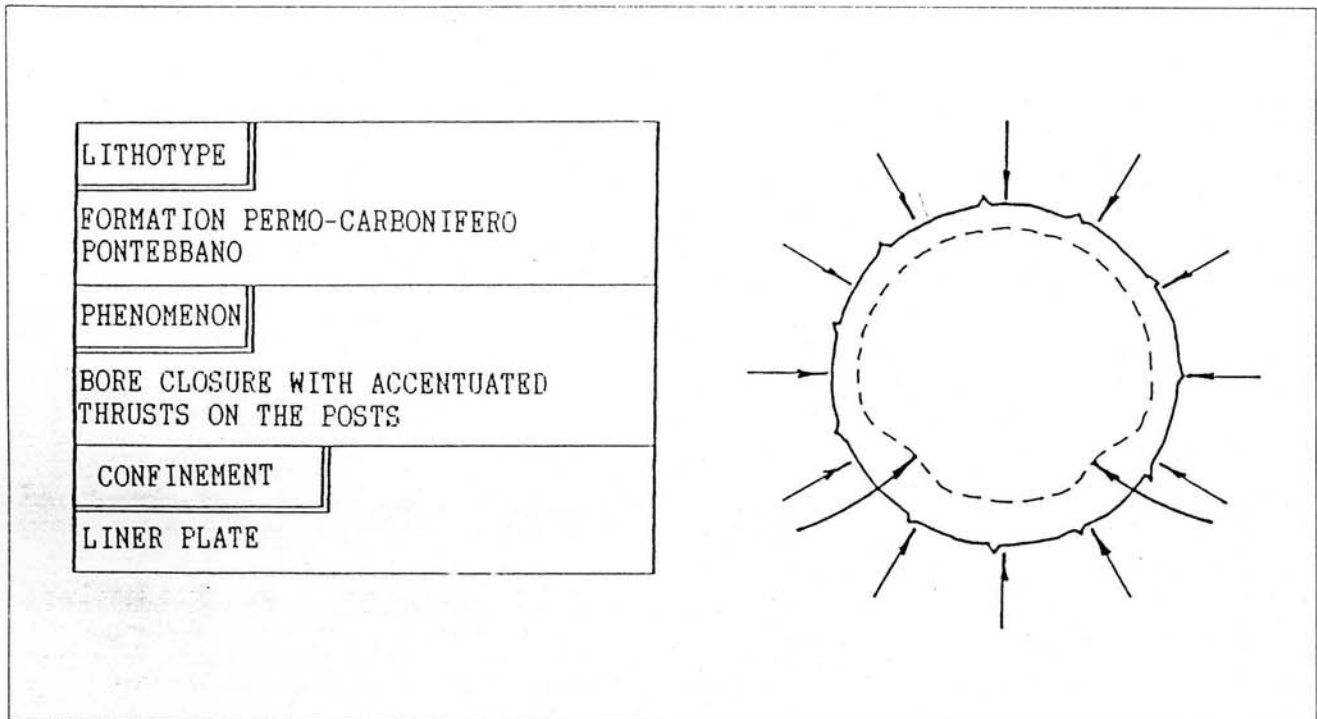


Fig. 4: Instabilità tipo del foro pilota.
Pilot tunnel typical instability.

Lo scavo del foro pilota ha pertanto evidenziato uno spiccato comportamento plastico dell'ammasso roccioso dovuto alla sua intrinseca incapacità di far fronte alla redistribuzione degli sforzi generati dallo scavo. L'evoluzione del fenomeno di rottura progressiva della roccia sul contorno della cavità si è protratta nell'arco di parecchi mesi anche per effetto di alterazione e rigonfiamento che hanno interessato, come anzidetto, soprattutto le porzioni inferiori della cavità.

3. PROBLEMATICHE PROGETTUALI

Come ben noto viene genericamente definito "spingente", il comportamento di un ammasso roccioso, quale quello in oggetto, le cui caratteristiche meccaniche scadenti in rapporto alle tensioni originarie determinano la formazione di una importante fascia di plasticizzazione al contorno della cavità.

La risposta del terreno allo scavo in tal caso comporta:

- rottura più o meno spinta della roccia ancor prima del passaggio del fronte di scavo e quindi instabilità del fronte stesso;
- tempi di autoportanza pressochè nulli anche per sfondi ridotti e quindi collasso delle pareti di scavo con formazione di rilasci e franamenti;
- plasticizzazione della roccia al contorno della cavità cui conseguono:
 - spinte molto forti sui rivestimenti;
 - convergenze difficilmente controllabili e ad evoluzione assai rapida;
 - forte decadimento delle caratteristiche meccaniche del terreno.

Analizziamo ora le implicazioni legate all'utilizzo di una metodologia costruttiva "tradizionale" in questo particolare contesto.

Per "tradizionali" si intendono tutte quelle metodologie che hanno in comune la realizzazione di un rivestimento definitivo in cls, armato o non, a cui viene affidato totalmente il compito di assicurare la stabilità della cavità.

Prima che tale rivestimento sia in grado di assolvere i suoi compiti statici la roccia viene sostenuta con strumenti considerati "provvisori" (quali ad es. spritz-beton, chiodi, centine) il cui contributo statico viene trascurato a lungo termine.

Prescindendo dall'approfondire l'ovvia ma non banale considerazione che in un mezzo a comportamento spiccatamente irreversibile quale un ammasso roccioso, nessun intervento può essere considerato "provvisorio", nel caso di applicazione di un rivestimento "tradizionale" in un ammasso spingente notiamo che:

- se il getto del rivestimento viene posticipato, gli interventi di stabilizzazione "provvisori" non sono in grado di far fronte alle spinte e di limitare le convergenze (sono troppo deformabili e troppo poco resistenti) e di conseguenza:
 - si hanno convergenze fortissime (che costringono poi a ribattere lo scavo), rotture e lesioni del prerivestimento o addirittura franamenti;
 - la roccia sul contorno della galleria ha la possibilità di collassare, dislocarsi ed allentarsi; può diventare sede di un importante richiamo idrico la qual cosa ne riduce ancor più le caratteristiche meccaniche e ne comporta il rigonfiamento se sono presenti minerali argillosi; diventa un pessimo sottofondo per il futuro rivestimento (le sollecitazioni in quest'ultimo sono inversamente proporzionali alle caratteristiche di deformabilità della roccia);
- se invece il rivestimento viene gettato a ridosso del fronte, senza lasciare la possibilità alla roccia di sviluppare una parte delle deformazioni, esso viene sollecitato ancor prima della maturazione da spinte intense che ne producono il collasso.

In ogni caso il rivestimento "tradizionale" è soggetto a forti carichi sia "di montagna" sia gravitativi che comportano la messa in opera di spessori assai

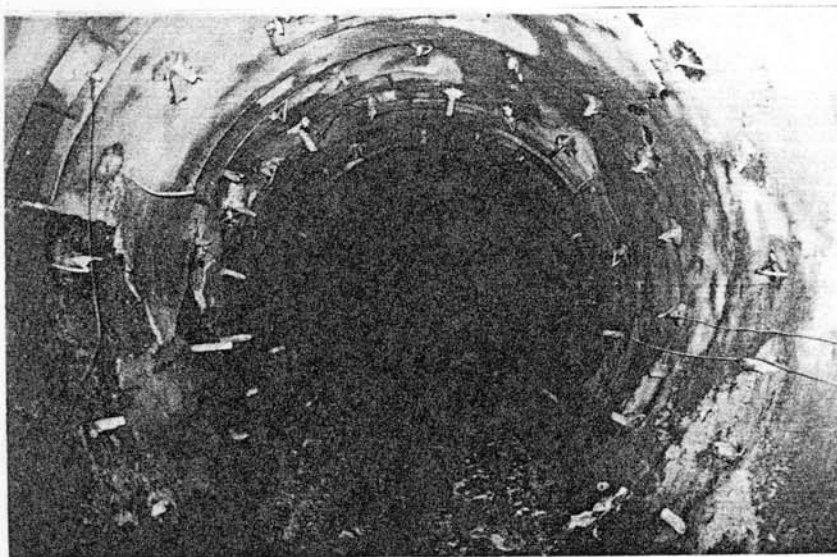


Foto 4: Foro pilota a consolidamento eseguito.
Pilot-tunnel after bolting.

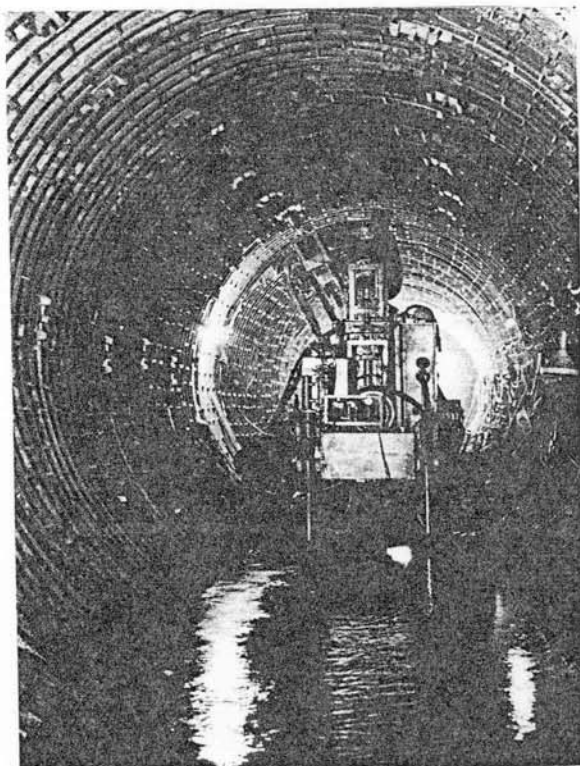


Foto 3: Esecuzione del consolidamento radiale.
Radial bolting execution.

rilevanti di calcestruzzo. Siffatti rivestimenti sono però estremamente rigidi e fragili e quindi si lesionano assai facilmente a causa delle deformazioni del contorno, e a causa delle scadenti caratteristiche del sottofondo.

In definitiva il sistema "tradizionale" di costruzione di gallerie può essere considerato non idoneo e addirittura dannoso per l'integrità e la funzionalità dell'opera in ammassi rocciosi "spingenti".

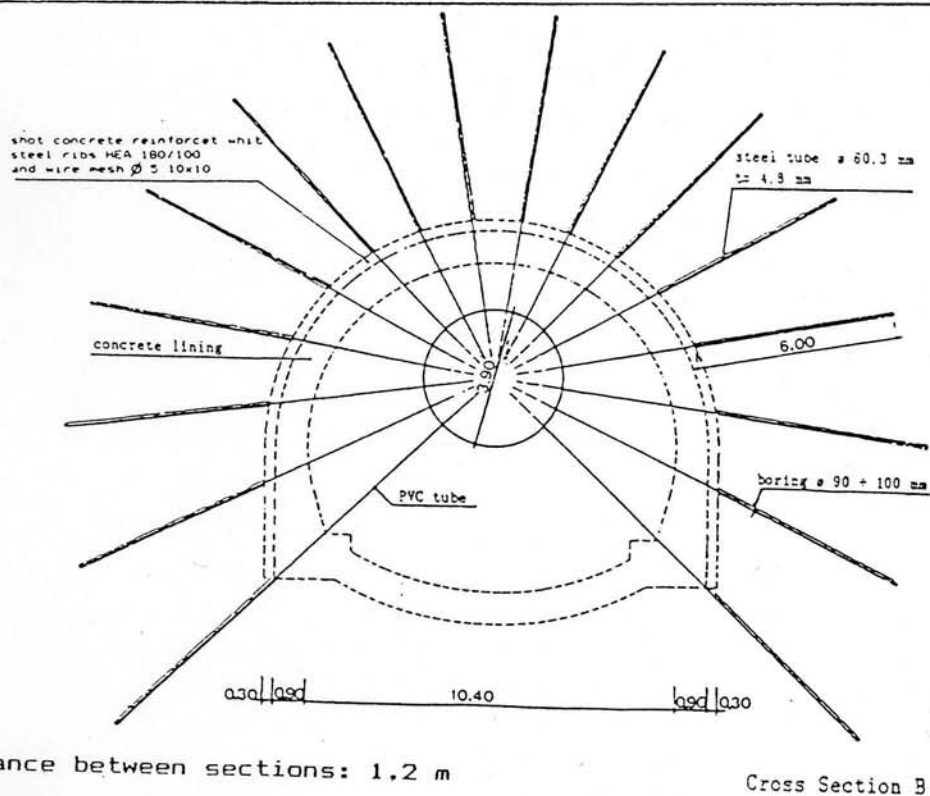
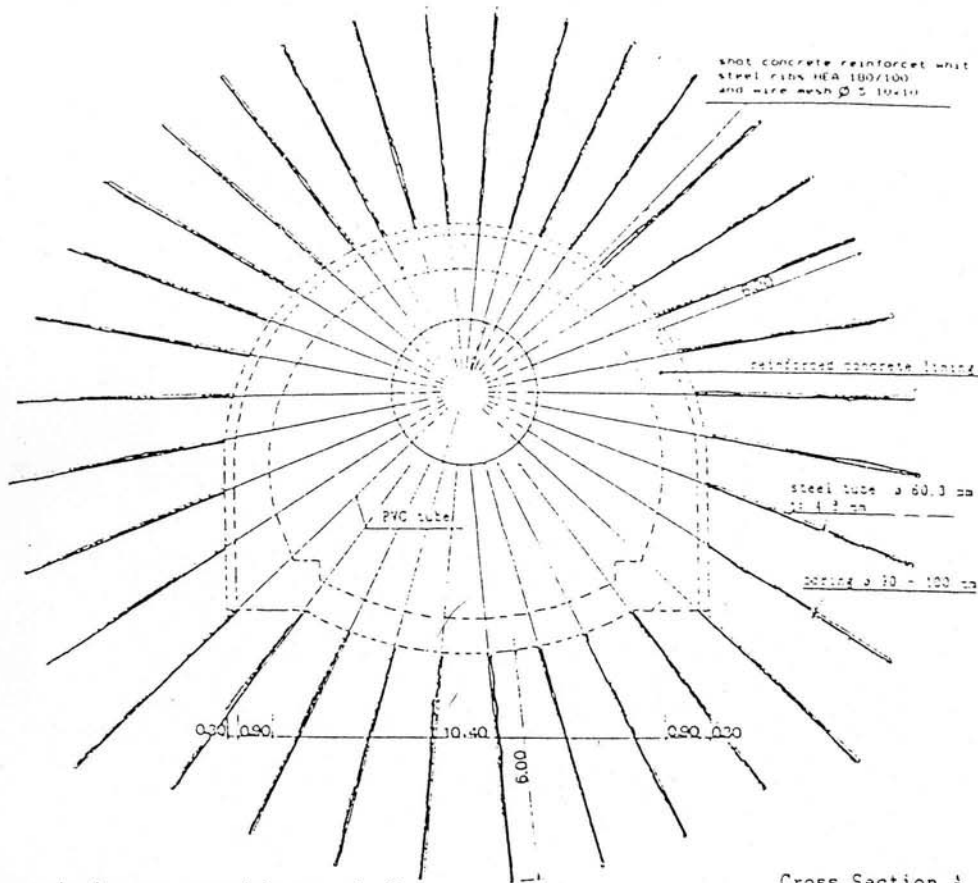


Fig. 5: Sezioni tipo.
Typical cross-sections.

4. SOLUZIONI PROGETTUALI

In ammassi con comportamento "spingente" è imperativo cercare di limitare l'intensità e l'estensione delle plasticizzazioni e del decadimento delle caratteristiche della roccia. Le soluzioni progettuali devono essere indirizzate ad incrementare i parametri geomeccanici dell'ammasso ancor prima della fase di allargo a mezzo di preconsolidamenti del terreno al contorno della futura galleria. Nel caso in oggetto, a seguito di un completo ripristino del rivestimento del foro pilota che ne garantisca la stabilità e della realizzazione di una finestra di accesso laterale alla progressiva 3460 m, il preconsolidamento è stato ottenuto lavorando dall'interno del cunicolo pilota stesso (Foto 3, Foto 4) ed è consistito nell'armare, in maniera differenziata a seconda delle diverse tratte di galleria, un anello di roccia di spessore adeguato mediante tubi in acciaio ad asta cava iniettati con malta cementizia.

L'effetto della bullonatura sull'ammasso roccioso si traduce in:

- un miglioramento diretto delle sue caratteristiche geotecniche dovuto all'aumento della resistenza al taglio e/o al conferimento di una pressione di confinamento;
- un miglioramento indiretto dovuto al contenimento del fenomeno della dilatanza, del decadimento dei parametri di resistenza da condizioni di picco a condizioni residue, dell'aumento della porosità del materiale (che si traduce in maggiore permeabilità e quindi in maggiore contenuto d'acqua con tutte le conseguenze che ciò comporta).

I vari sopralluoghi ed il rilievo di dettaglio effettuato nel cunicolo pilota avevano permesso di individuare all'interno delle tratte in esame diverse zone che avevano dato una risposta differente in termini di comportamento deformativo a seguito dello scavo.

Sono stati quindi previsti due schemi d'intervento (Fig. 5); in entrambi è stata armata una fascia di roccia di 6 m di spessore al contorno della sezione definitiva di scavo mediante bulloni in acciaio ad asta cava del diametro di 60.3 mm, spessore 4.8 mm cementati in foro del diametro di 90÷100 mm.

L'incidenza dei bulloni a metro lineare di galleria varia da 33÷34 per lo schema tipo A (progr. 3720÷3910 e progr. 4060÷4140) a ~13 per lo schema tipo B (progr. 2880÷3020, progr. 3910÷3960 e progr. 4140÷4180).

4.1. METODOLOGIA PROGETTUALE

Il dimensionamento dell'intervento di consolidamento e delle strutture di rivestimento è stato svolto col metodo delle linee caratteristiche (Lombardi G. (1978) - Funzione dei sostegni e rivestimenti quale consolidamento delle opere sotterranee. Atti del seminario sul consolidamento di terreni e rocce in posto nell'ingegneria civile (Stresa - 1978)) che permette di tener conto, anche se in modo approssimato dato il gran numero e l'aleatorietà delle variabili in gioco, dell'interazione terreno-struttura e del contributo statico offerto dalla bullonatura.

In prima istanza si è determinata la linea caratteristica del cunicolo pilota, riportata qualitativamente in Fig. 6, ottenuta variando i parametri geomeccanici di picco e residui dell'ammasso roccioso fino ad ottenere un punto di equilibrio (punto P1) in accordo con le misure della pressione di confinamento (P) offerta dal blindaggio e dalla convergenza (U) del cunicolo effettuate in sito.

La deformazione prodotta dallo scavo del preforo sul contorno del futuro scavo di allargo è valutabile calcolando la convergenza (U_0) in corrispondenza della pressione di confinamento (P) ad una distanza dall'asse del cavo pari al raggio esterno della galleria.

In seconda fase si sono tracciate (Fig. 7):

- la linea caratteristica della cavità allargata utilizzando gli stessi parametri geomeccanici del terreno naturale scaturiti dall'analisi di taratura sul foro pilota;

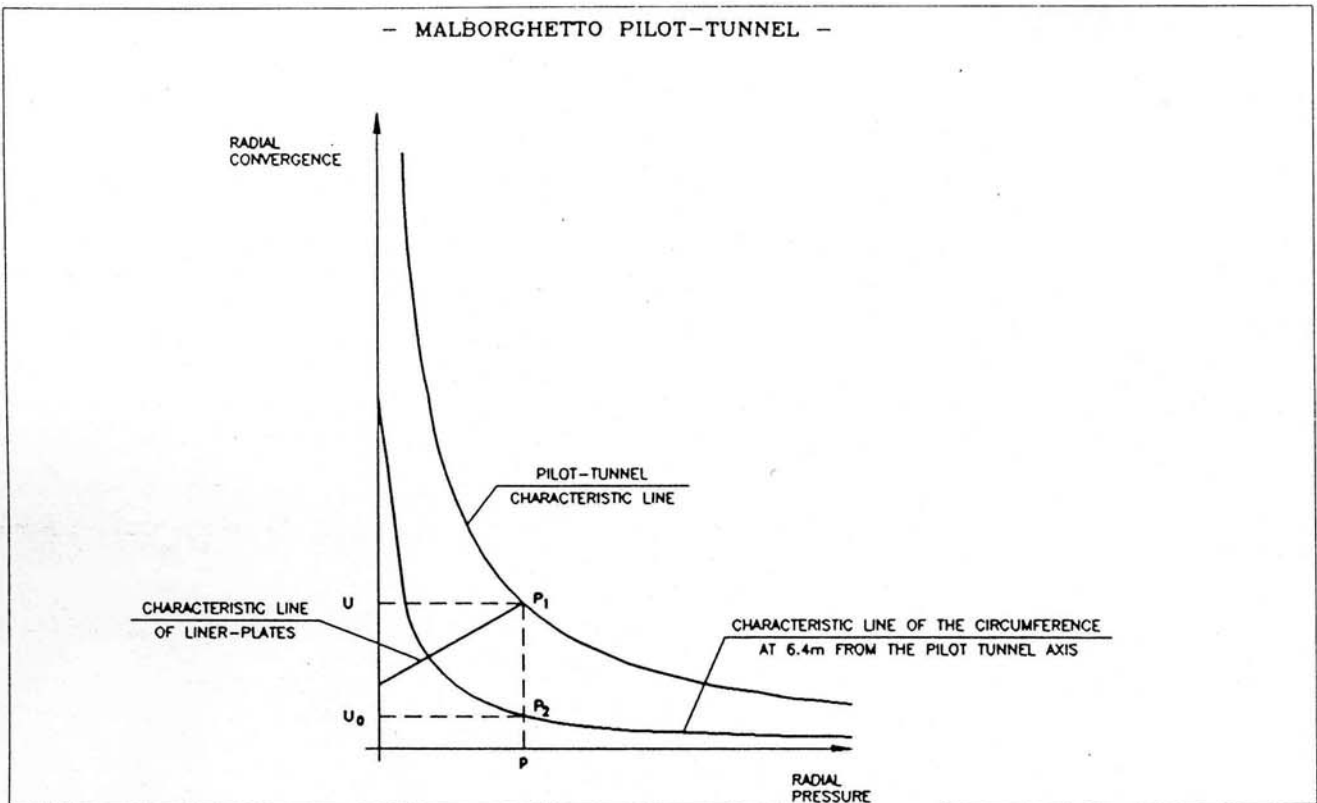


Fig. 6: Linea caratteristica del foro pilota.
Pilot-tunnel characteristic line.

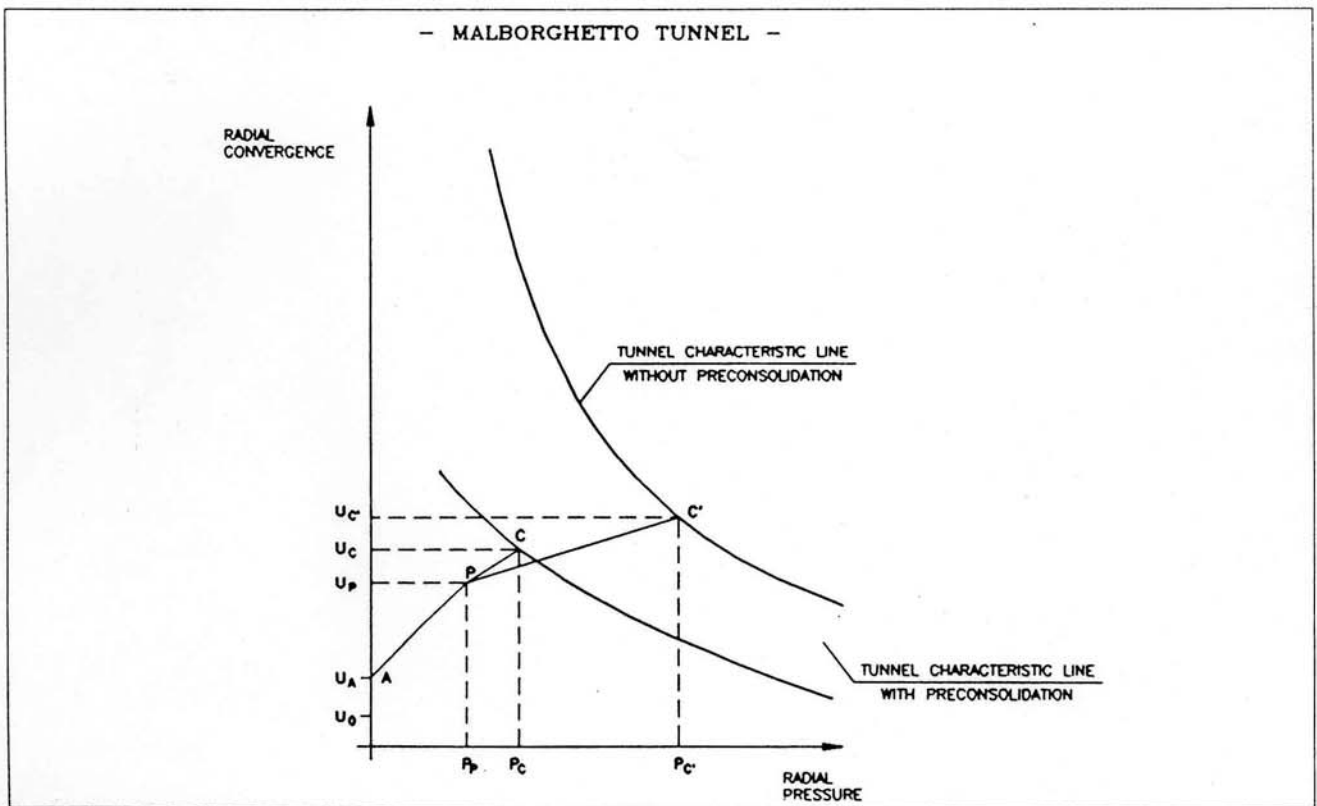


Fig. 7: Linee caratteristiche della cavità allargata.
Full section characteristic lines.

- la linea caratteristica della cavità allargata utilizzando per la zona plasticizzata sul contorno della cavità parametri geomeccanici migliorati, tenendo conto del consolidamento.
- le linee caratteristiche delle strutture di contenimento della cavità distinguendo:
 - preanello di rivestimento (centine e calcestruzzo proiettato);
 - rivestimento in calcestruzzo.

Gli effetti dei consolidamenti sono stati introdotti in termini di aumento di coesione c^* . Questo incremento è legato alla pressione di confinamento offerta dalla bullonatura (σ_3) dalla relazione:

$$c^* = \frac{\sigma_3}{2} \tan(45 + \phi/2)$$

come è agevole dimostrare dalla considerazione dei cerchi di Mohr riportati in fig. 8.

Il cerchio (1) rappresenta un elemento sul contorno della cavità in condizioni di rottura per mancanza di confinamento ($\sigma_3=0$). Nel cerchio (2) l'applicazione della σ_3 comporta la riduzione del raggio del cerchio di Mohr e quindi un allontanamento dalle condizioni di rottura. Con la σ_3 applicata l'elemento può sopportare un σ_1 maggiore e pari a σ_{1f} (cerchio (3)). Ciò equivale a considerare una $\sigma_3=0$ ma una coesione incrementata fino a c^* (cerchio (4)).

La pressione di confinamento σ_3 indotta dal consolidamento è:

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{e \cdot t}$$

con A_s = area bullone
 σ_s = tensione del bullone
 e, t = lati della maglia secondo cui sono disposti i bulloni

Ancora prima che la roccia si deformi è tuttavia efficace un altro contributo al taglio del consolidamento dovuto all'effetto "bietta" dei bulloni sulle superfici di scivolamento. Questo contributo di taglio puro (mentre quello visto precedentemente può essere definito di taglio-trazione) può essere espresso per ogni singolo bullone come:

$$T_d = d^2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_s \cdot \sigma_h}{6 \cdot \alpha}}$$

ove: d = diametro del bullone
 σ_s = tensione di snervamento del materiale costituente il bullone
 σ_h = tensione media di contatto roccia-bullone
 α = costante dipendente dal tipo di roccia e dal tipo di cementazione

In termini di aumento di coesione si può scrivere:

$$c_d = \frac{n \cdot T_d}{s}$$

con n = numero di bulloni intersecanti la superficie di rottura
 s = sviluppo della superficie di rottura

Complessivamente quindi si può scrivere:

$$\Delta c = c^* + c_d$$

La lunghezza dei bulloni è stata dimensionata per tentativi successivi in modo che corrispondesse allo spessore della zona plastica.

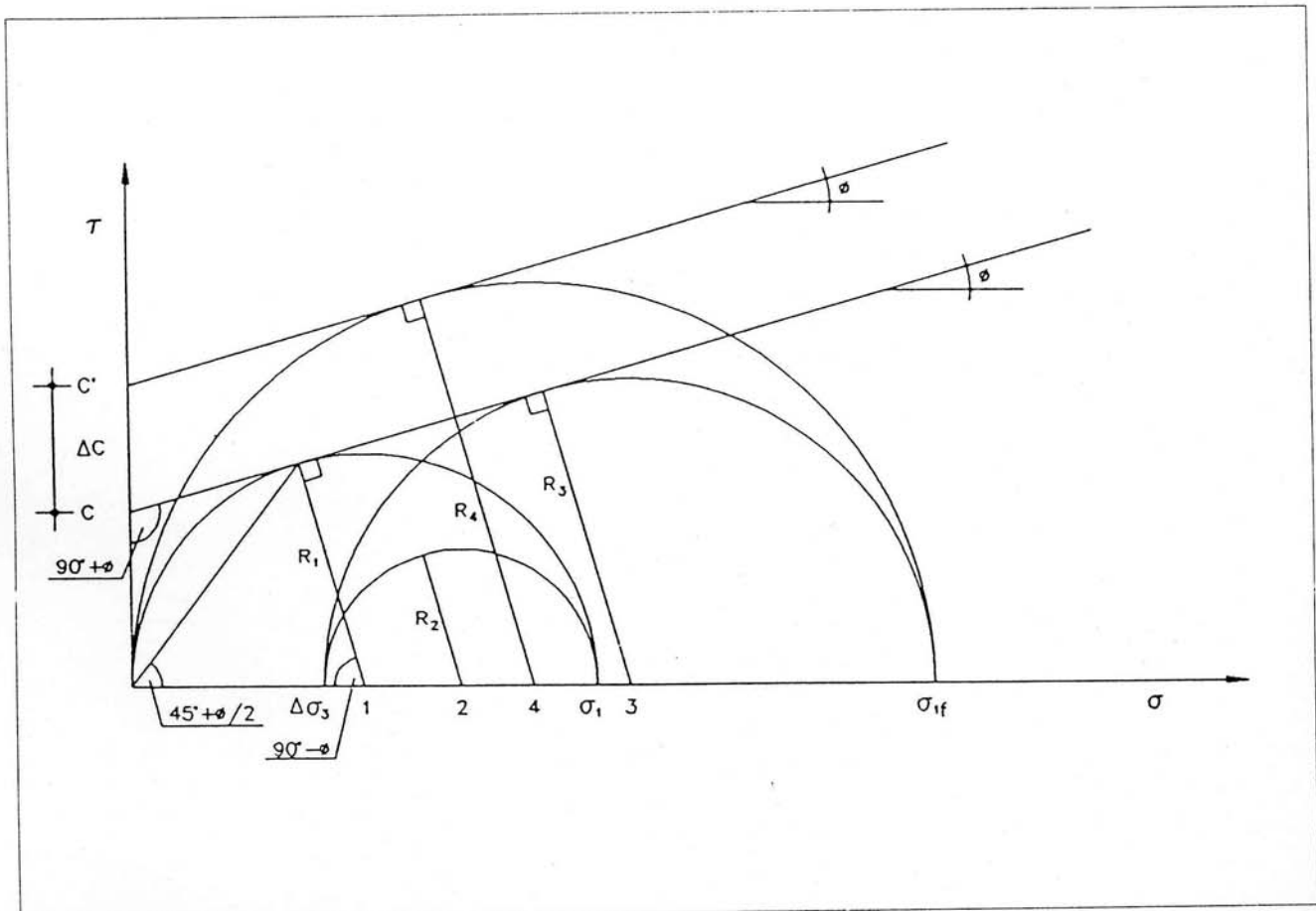


Fig. 8: Valutazione dell'incremento artificiale di coesione.
Evaluation of artificial cohesion improvement.

Nell'ipotesi di assial-simmetria, insita nel metodo di calcolo, e del mantenimento delle tensioni sotto il limite elastico nelle strutture il rapporto tra pressione di confinamento offerta dal rivestimento e convergenza è costante e quindi il comportamento delle strutture di rivestimento è rappresentabile da una retta la cui pendenza decresce al crescere della rigidità della struttura stessa. Con riferimento alla fig. 7 si ha:

- U_A = convergenza della cavità prima che il preanello inizi a fornire il suo contributo statico più convergenza u_0 già subita dal profilo di scavo causata dal passaggio del preforo;
- P_p = pressione di confinamento limite del solo preanello;
- P_c, P'_c = pressioni di confinamento limite del rivestimento complessivo.

Dal confronto delle situazioni di equilibrio rappresentata dai punti C e C' di intersezione delle linee caratteristiche della cavità con quelle dei rivestimenti si possono trarre le seguenti considerazioni:

- nel caso di assenza di consolidamento l'equilibrio viene ottenuto con rivestimenti di spessore maggiore, dovendo questi essere in grado di far fronte a pressione di confinamento più elevate ($P'_c > P_c$);
- sempre nel caso di assenza di consolidamento il rivestimento di seconda fase deve incassare una quota parte consistente delle deformazioni totali per evitare la rottura del rivestimento di prima fase e per consentire il raggiungimento dell'equilibrio. In termini di tempo ciò implica un getto anticipato del rivestimento in condizioni di velocità di deformazione non ancora stabilizzata e quindi con gravi rischi per l'integrità della struttura.

Risulta evidente poi che la realizzazione del preconsolidamento è di fondamentale importanza per garantire la stabilità delle cavità nelle zone del fronte: a prescindere dalle considerazioni di carattere numerico effettuate in sede di

redazione del progetto, basti pensare al fatto che, dove l'avanzamento del foro pilota aveva messo in evidenza problemi di stabilità del fronte di scavo, la realizzazione dell'allargo è potuta avvenire a piena sezione senza dar luogo ad alcun franamento o collasso nelle zone del fronte (Foto 5).

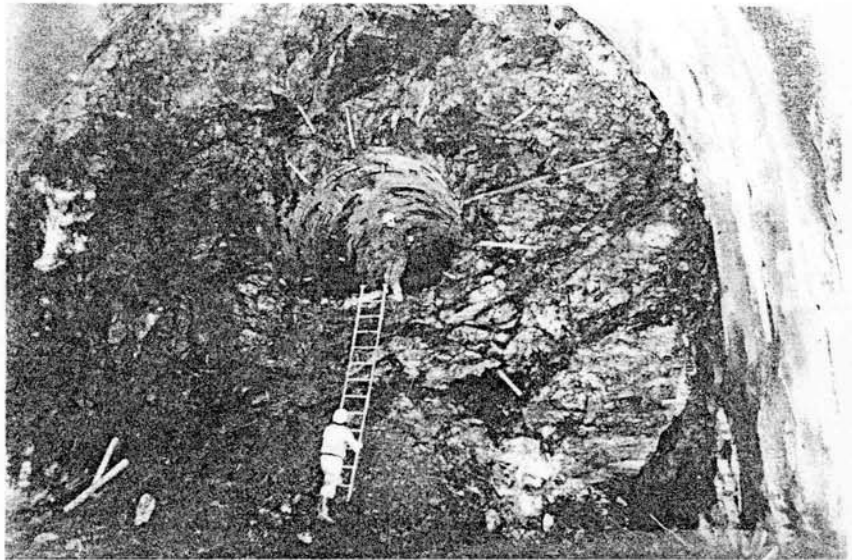


Foto 5: Scavo di allargo a piena sezione.
Full section enlarging excavation.

Le elaborazioni progettuali hanno quindi evidenziato il fatto che la realizzazione dello scavo della galleria nelle tratte in oggetto con metodologie "tradizionali" non poteva offrire sufficienti garanzie di riuscita e che, al contrario, l'esecuzione del preconsolidamento al contorno comportava numerosi vantaggi dal punto di vista statico e

programmatico senza contare quelli economici legati all'eliminazione di possibili instabilità e franamenti, di incontrollate deformazioni della cavità e di lesioni nei rivestimenti.

Questi ultimi sono stati dimensionati oltre che sulla base delle spinte ricavate dall'analisi con le linee caratteristiche, anche per far fronte ai carichi gravitativi dovuti alla formazione della fascia di roccia rilasciata sul contorno della cavità. Anche l'entità di questi carichi è favorevolmente influenzata dalla presenza del consolidamento in quanto quest'ultimo comporta una riduzione dell'estensione delle zone di ammasso plasticizzato.

5. ANDAMENTO DEI LAVORI E VERIFICHE IN CORSO D'OPERA

L'intervento di preconsolidamento radiale del cunicolo pilota ha permesso di eseguire lo scavo di allargo della galleria, tutt'ora in corso, a piena sezione (Foto 5), raggiungendo l'equilibrio della cavità nel breve termine con la sola messa in opera di un rivestimento di prima fase costituito da spritz-beton armato con rete elettrosaldata e centine in acciaio.

L'opera verrà completata con il getto del rivestimento di seconda fase in calcestruzzo armato avente spessore di 90 cm.

Durante lo scavo viene costantemente controllato il comportamento deformativo della galleria, con misure di convergenza effettuate su stazioni installate ogni 10+15 m di avanzamento.

In Fig. 9 è riportato l'andamento tipico delle convergenze misurate (progr. 3778 m). A supporto dell'efficacia dell'intervento di consolidamento si può osservare come dopo una fase di assestamento iniziale le convergenze tendano asintoticamente ad un valore finito a conferma del raggiungimento, nel breve termine, di una condizione di equilibrio.

A seguito dello scavo a piena sezione e della messa in opera del rivestimento di prima fase, le successive lavorazioni (nell'ordine: getto delle murette, scavo e getto dell'arco rovescio, getto del rivestimento di calotta) vengono completate in tempi dipendenti dalla risposta deformativa della galleria. In particolare il getto dell'arco rovescio verrebbe realizzato in prossimità del fronte di scavo qualora venissero registrati comportamenti anomali, cosa che a tutt'oggi non si è verificata.

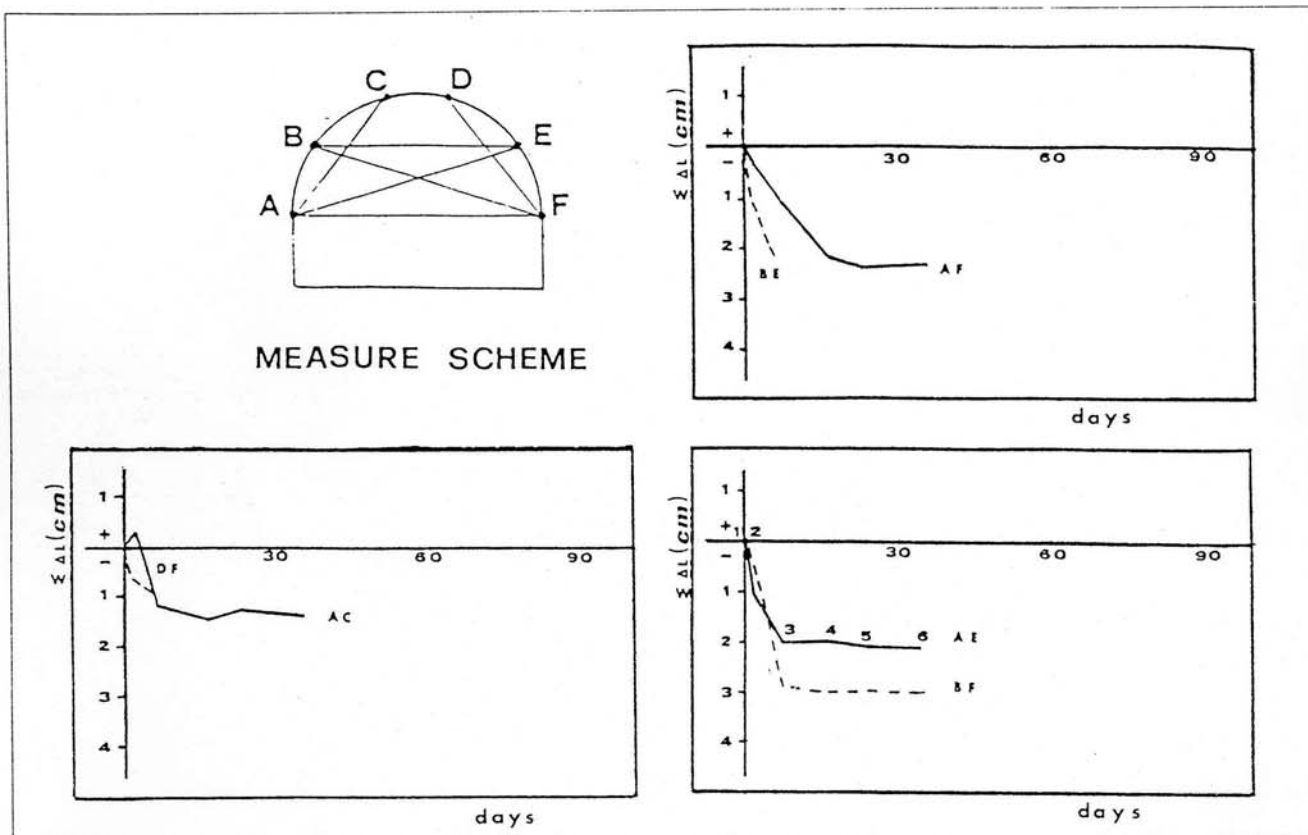


Fig. 9: Misure di convergenza.
Convergence bolt measures.

Gli autori ringraziano per la collaborazione offerta nell'esecuzione del lavoro i Dott. Geoll. Massimo Campana (Rocksoil S.p.A.), Carlo Comin (Ferrovie dello Stato) e Veris Greppi (Consorzio Carnia).

Lavoro:	Linea F.S. Udine-Confine Austriaco Galleria Malborghetto
Committente:	Ferrovie dello Stato
Impresa costruttrice:	Consorzio CARNIA
Impresa specializzata:	Italsonda S.p.A.
Progettazione esecutiva:	Rocksoil S.p.A.