

## UNA RIUSCITA APPLICAZIONE DEL CRITERIO DI RINFORZO DELLA ROCCIA IN GALLERIA

### SUCCESSFUL APPLICATION OF ROCK REINFORCEMENT AROUND A TUNNEL

P. Grasso, Geodata S.r.l., Torino, Italia  
G. Russo, Geodata S.r.l., Torino, Italia  
A. Mahtab, Geodata S.r.l., Torino, Italia  
S. Pelizza, Politecnico di Torino, Italia  
C. Zanella, Ente Ferrovie dello Stato, La Spezia, Italia

Il rinforzo della roccia intorno ad una galleria ferroviaria in rocce deboli e complesse e' ormai una pratica consolidata in Italia.

La presente relazione intende descrivere la riuscita applicazione di tale metodo di rinforzo della roccia lungo una tratta di circa 1km, nella galleria Serena, presso La Spezia. Tale intervento si e' reso necessario non appena lo scavo ha preso ad interessare la formazione delle Argille e Calcari, allorche' presero a manifestarsi elevate velocita' di convergenza. Per contrastare tale fenomeno si e' scelto di modificare le caratteristiche intrinseche della roccia mediante l'introduzione di raggiere di barre d'acciaio cementate. Il dimensionamento ottimale dell'intervento e' stato affinato attraverso continue iterazioni tra i monitoraggi sistematicamente eseguiti e la riprogettazione in corso d'opera. I principi del metodo di rinforzo illustrato, possono essere applicati con successo in diverse altre situazioni nello stesso ambito di roccia debole e complessa.

Reinforcement of the rock surrounding a railway tunnel in geologically complex and weak ground is a common practice in Italy. This paper describes the successful application of rock reinforcement methodology used in driving approximately 1km of Serena tunnel near La Spezia close to the Ligurian Sea. The reinforced section of the tunnel lies in the Marl-Shale Unit where the large convergence rates required control measures. The solution to the convergence problem was to modify the properties of the rock by reinforcing it with a pattern of grouted rebars. Optimization of the reinforcement pattern was achieved by iterating between measured convergence and redesign. The principles of the reinforcement methodology used in Serena tunnel are potentially applicable to several other situations in weak rock.

## 1. INTRODUZIONE

La presente nota prende in considerazione la realizzazione della galleria Serena, opera facente parte del Nuovo Itinerario Ferroviario Pontremolese, tra La Spezia e Parma, illustrando in particolare i criteri di rinforzo della roccia adottati per il superamento di condizioni geostrutturali particolarmente delicate e problematiche.

Il nuovo Itinerario Pontremolese costituirà un collegamento fondamentale nel Piano Nazionale dei Trasporti, raccordando alcuni importanti porti dell'alto Tirreno al Nord industriale. A lavori ultimati garantirà lo smaltimento di una circolazione di 140 treni/giorno, con notevole sviluppo in particolare del traffico merci.

La galleria a doppio binario Serena costituisce l'opera in sotterraneo di maggior pregio: ha una lunghezza totale di quasi 7km, con coperture massime di circa 500m.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMECCANICO

La galleria si sviluppa in formazioni geologiche contraddistinte da caratteristiche geomeccaniche scadenti e che, con riferimento alle indicazioni dell'Associazione Geotecnica Italiana (1985), possono definirsi 'strutturalmente complesse', in virtù di una marcata disomogeneità litologica e/o strutturale.

A grandi linee, procedendo da sud a nord, possono distinguersi lungo il tracciato progettuale depositi alluvionali grossolani, complessi flyschiodi tettonizzati (F. di M.Caio, U. di Canetolo, Macigno) e brecce poligeniche a matrice argillosa (Caotico S.S). Si tratta generalmente di formazioni in prevalenza alloctone, che hanno quindi subito complesse vicende di messa in posto e che frequentemente non hanno mantenuto gli originali rapporti stratigrafici. Sotto il profilo litologico si rilevano alternanze di termini marnosi, calcarenitici ed argillitici, mentre nel caso di formazioni a struttura caotica, blocchi anche di notevoli dimensioni, da calcarei ad ofiolitici, risultano inclusi in una matrice argillitica scagliosa e nerastra. Dal punto di vista geomeccanico i terreni in esame rientrano in larga prevalenza nelle classi tecniche IV e V di Bieniawski (1984).

## 3. CRITERI PROGETTUALI

Per comprendere a fondo gli orientamenti progettuali originari si deve tenere presente che contrattualmente veniva richiesto un rivestimento finale in calcestruzzo interamente portante, mentre le armature di prima fase non erano riconosciute strutturalmente in termini di contrasto definitivo. Per il dimensionamento del sostegno definitivo, nelle condizioni di galleria profonda, si è fatto riferimento al metodo delle linee caratteristiche, seguendo il criterio di contenimento del raggio plastico e di limitazione delle convergenze ammissibili. L'applicazione di tali criteri al

metodo di scavo e sostegno tradizionale, tramite le consuete armature provvisorie, risultava tuttavia improponibile nelle tratte dove ad un elevato stato tensionale geostatico si associava una massa rocciosa dalle pessime caratteristiche geomeccaniche, generando in sostanza le seguenti problematiche:

- formazione di un esteso anello di roccia rilassata al contorno del cavo;
- convergenze teoriche elevatissime ed ipotetica stabilizzazione solo con il getto del rivestimento definitivo;
- necessita' di rivestimenti di notevoli spessori, a sezione circolare e con elevati tassi d'armatura;
- schema di avanzamento dello scavo molto frazionato, con incremento progressivo della plasticizzazione e quindi difficile controllo dell'evoluzione deformativa;
- necessita' di gettare il rivestimento con elevate deformazioni del cavo ancora in corso, con possibilita' di snervamento del calcestruzzo in fase di maturazione;
- moduli di sottofondo della roccia assai modesti, con rischi maggiori di lesioni strutturali del rivestimento a lungo termine.

#### 4. PROBLEMATICHE ESECUTIVE

Le considerazioni svolte hanno avuto un improvviso ed evidente riscontro quando lo scavo, in avanzamento dalla finestra intermedia verso La Spezia, con una copertura di circa 120m, aveva da circa 20m superato un contatto di natura tettonica tra la formazione del Macigno e l'Unita' di Canetolo, qui rappresentata da alternanze marnoso-argillitiche, intensamente laminate. L'abbattimento era eseguito, a sezione parzializzata, con martellone idraulico pesante, realizzando sfondi contenuti a circa un metro, subito seguiti dal posizionamento di centine 2NP160, rete elettrosaldata e circa 20cm di calcestruzzo proiettato. Per quanto si procedesse, quindi, con una certa cautela presero a manifestarsi convergenze elevatissime, con velocita' anche superiori a 3cm/giorno, con esaltazione del fenomeno a ritroso, dove si smorzava l'effetto stabilizzante del fronte.

Il sostegno di prima fase si dimostrava chiaramente insufficiente: le centine iniziarono a deformarsi intensamente, mentre si assisteva a ripetuti splaccaggi del manto di spritz beton (fig.1). La deformazione del cavo denotava un rapido evolversi verso condizioni di instabilita' irreversibile.

#### 5. RIPROGETTAZIONE IN CORSO D'OPERA.

CRITERIO DELLA ROCCIA RIQUALIFICATA.

Il criterio progettuale ritenuto piu' adeguato alla realta' riscontrata si allinea ai metodi tesi a razionalizzare le modalita' costruttive e di sostegno, prevedendo non solo di contenere il naturale decadimento della roccia, ma anche di favorire un deciso miglioramento delle sue caratteristiche

geomeccaniche mediante un adeguato intervento di consolidamento.

Tale intendimento e' stato conseguito rinforzando la massa rocciosa all'estradosso con raggieri di elementi resistenti, di lunghezza confrontabile al raggio plastico ipotizzato (12m), in grado di esercitare sulla roccia un effetto di "coazione" e quindi di mobilitarne una notevole resistenza addizionale (concetto di coesione effettiva  $c^*$ ), secondo la formula

$$c^* = (2c + DS3 \tan a)/2 \quad (1)$$

dove  $a = (45 + \phi/2)$   
 $\phi$  = angolo di attrito  
 $c$  = coesione  
 $DS3$  = pressione di confinamento

Al contorno della galleria si realizza, cioe', una fascia omogenea di roccia di classe tecnica di scavo migliore, in grado di assumersi parte delle sollecitazioni trasmesse dall'ammasso roccioso e di ridistribuire in maniera piu' uniforme i carichi attivi sul rivestimento, fornendo nel contempo un migliore contrasto alla deformazione di quest'ultimo. In altri termini si modifica la curva caratteristica intrinseca della roccia, incrementandone la coesione mobilitabile: ne discendono minori convergenze attese e carichi inferiori sui sostegni definitivi.



Fig. 1 : Una significativa immagine delle lesioni del sostegno di I fase.

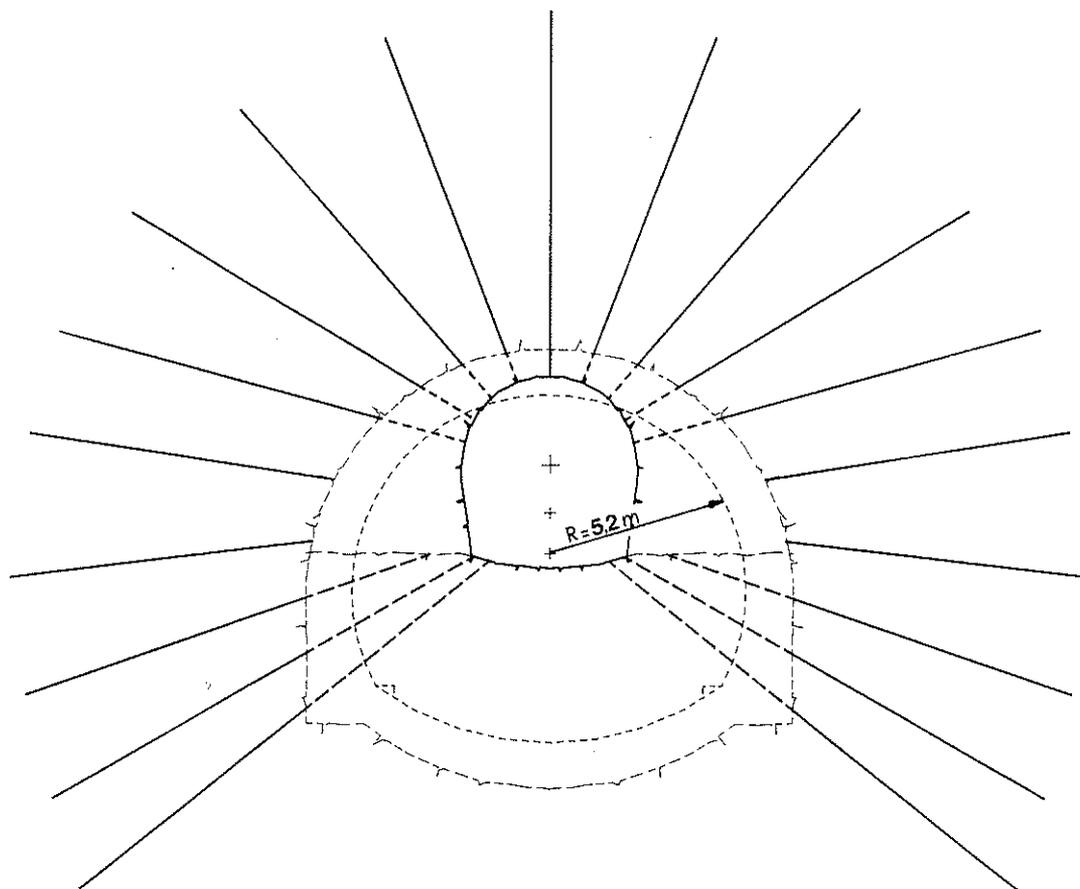


Fig. 2 : Sezione schematica della galleria con intervento di rinforzo dal cunicolo pilota e dalla sezione di allargio.

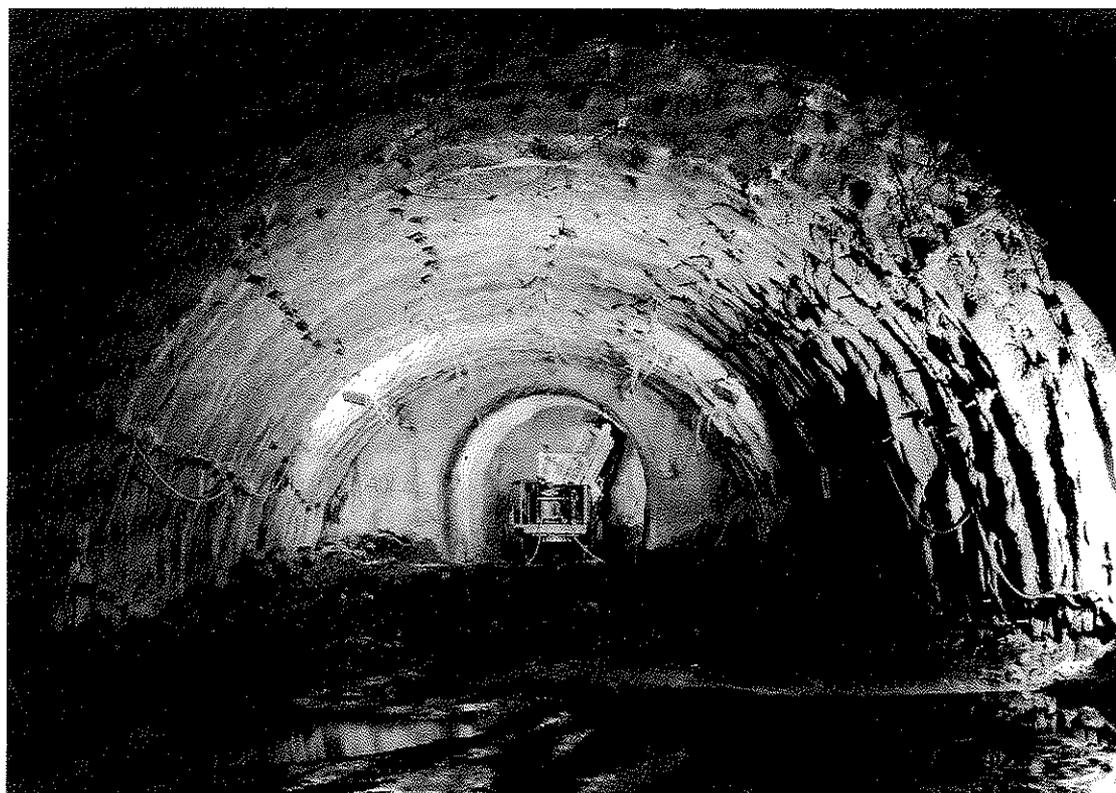


Fig. 3 : Veduta dell'intervento di rinforzo dal cunicolo pilota e della sezione d'allargio.

## 6. DIMENSIONAMENTO DELL'INTERVENTO DI ARMATURA DELLA ROCCIA

Nel caso analizzato le verifiche parametriche condotte hanno dimostrato ottimale conseguire una coesione effettiva  $c^*$  di 35t/m<sup>2</sup>. Applicando la (1), tale intento e' stato ottenuto con raggiere di elementi resistenti da 45t, cementati su tutta la lunghezza, disposti a quinconce con maglia 1m x 1m. L'intervento realizzato ha prontamente appiattito le curve di convergenza e stabilizzato il cavo.

Per la ripresa dell'avanzamento sono stati dimensionati interventi di rinforzo di entita' variabile, da mettere in opera sulla base del comportamento del cavo osservato e previsto con l'elaborazione delle misure di convergenza (vedi paragrafo seguente). In particolare si e' generalmente preferito realizzare la riqualificazione della roccia da cunicolo esplorativo posizionato in zona di calotta (fig.2-3). In tal modo si e' ulteriormente contenuto sia il decadimento dei parametri di resistenza disturbo dello scavo che il sopravanzare al fronte stesso del fenomeno di plasticizzazione. In funzione della diversa evoluzione deformativa osservata in calotta e di piedritti sono state spesso realizzate raggiere costituite da elementi misti, con confrontabile resistenza meccanica e proprieta' elastiche differenziate. Lo schema operativo da cunicolo ha contemplato ad esempio una prima tirantatura, in genere limitata ad un arco di calotta fino a 150°, con elementi a trefolo. Il sostegno di I fase e' costituito da centine tipo TH - recuperabili in fase di allargo - annegate in calcestruzzo proiettato fibrorinforzato con aghi metallici. Se i monitoraggi del cavo lo consentono il rinforzo dei piedritti e' rimandato alla fase di allargo ad una sezione di calotta ribassata. In tale fase si utilizzano generalmente barre d'acciaio Dywidag di diametro 26,5mm (fig.4) o, quando e' problematica l'installazione dell'asta per l'instabilita' del foro, sistemi di ancoraggio speciali, caratterizzati da una testa perforante che ne consente

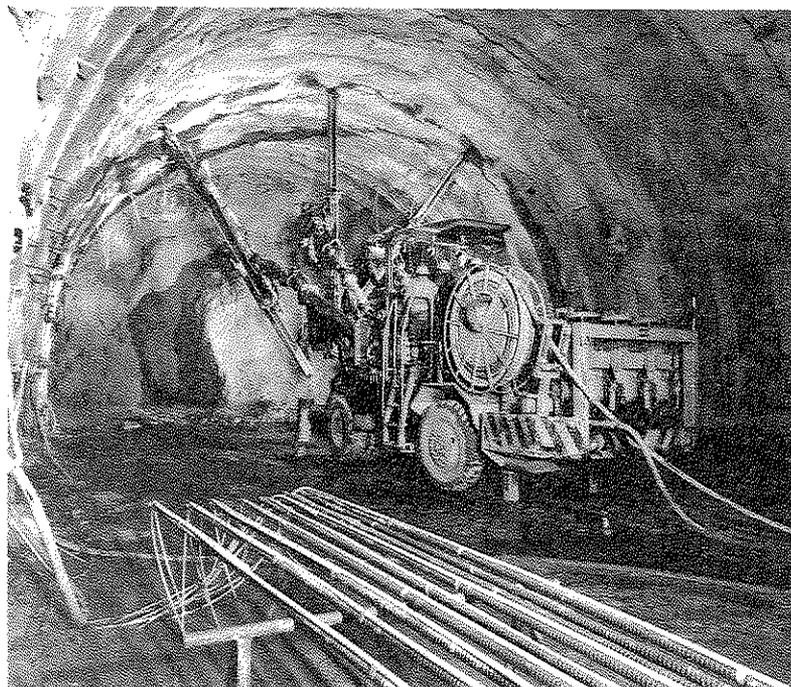


Fig. 4 : Fase operativa per l'installazione degli elementi di rinforzo dal cunicolo esplorativo.

l'immediata messa in opera (ad es. Ibo Anker). I criteri adottati hanno garantito il controllo della deformazione radiale e dell'estensione della fascia plasticizzata, consentendo di norma la realizzazione di rivestimenti definitivi meno pesanti di quanto originariamente previsto.

## 7. CONTROLLO DEFORMATIVO DEL CAVO

Fondamentale importanza per la corretta applicazione del metodo proposto e' stato assegnato alle misure del comportamento del cavo. L'evoluzione deformativa e' stata costantemente seguita attraverso sistematiche misure estensimetriche, di convergenza e dello stato tensionale. Con particolari elaborazioni delle misure di convergenza si e' definita con continuita' la necessita' o meno dell'intervento di riqualifica ed affinato il corretto dimensionamento. I dati raccolti sono stati infatti visualizzati e proiettati nel tempo, sviluppando i criteri proposti da Panet, Sulem e Guenot (1987). Si e' considerato significativo riportare nello stesso grafico (fig.5):

- la curva delle convergenze attese (prima dell'intervento di riqualifica);
- la proiezione delle convergenze dopo l'intervento di rinforzo e un avanzamento medio di 30m;
- la proiezione delle convergenze sulla base delle misure aggiornate;
- l'andamento nel tempo della distanza "stazione di misura/frontera di scavo".

Con tale criterio e' stato possibile in circostanze particolari come di carichi agenti non solamente di tipo geostatico, integrare tempestivamente lo schema di rinforzo non appena evidenziate proiezioni tendenzialmente instabili.

L'esperienza maturata ha confermato un'ottimale rispondenza tra ipotesi progettuale e comportamento del cavo osservato, evidenziando in sintesi:

- convergenze contenute nei valori attesi;
- maggiore uniformita' di comportamento della roccia;
- velocita' ultime di convergenza trascurabili e ottimali condizioni per il getto del rivestimento finale.

I risultati conseguiti sono stati raccolti in istogrammi, correlando le deformazioni del cavo (misurate e/o proiettate) con grandezze significative (fig.6-7-8). Si e' osservata una chiara dipendenza del comportamento del cavo da alcuni di tali fattori, con proporzionale esaltazione deformativa, ad esempio, quando riscontrata una complessita' geotecnica di tipo B2 (dovuta percio' ad una maggiore concentrazione di sforzi di taglio) anziche' di tipo B1 (francamente sedimentaria), o rilevata una maggiore presenza di litologie incompetenti.

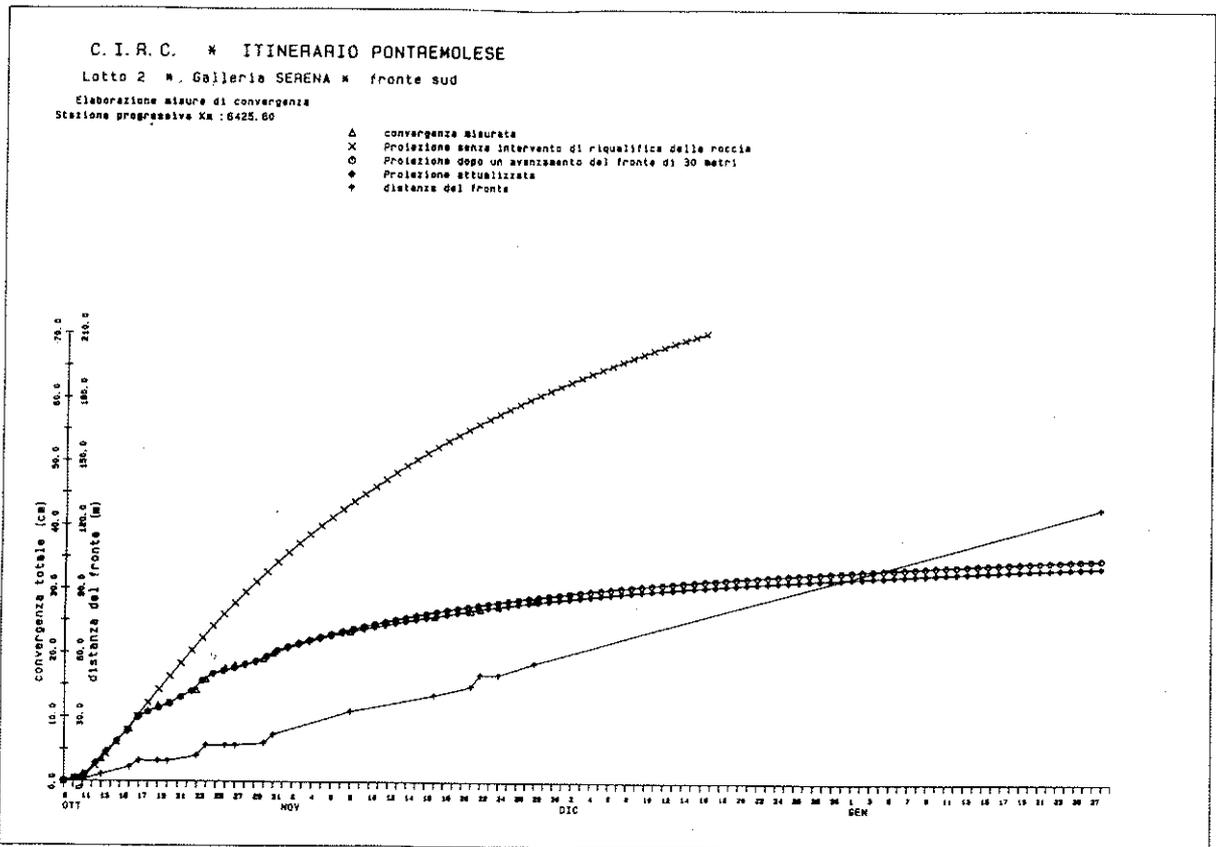


Fig. 5 : Elaborazione delle misure di convergenza. Si osservi l'appiattimento della curva ottenuto con l'intervento di rinforzo.

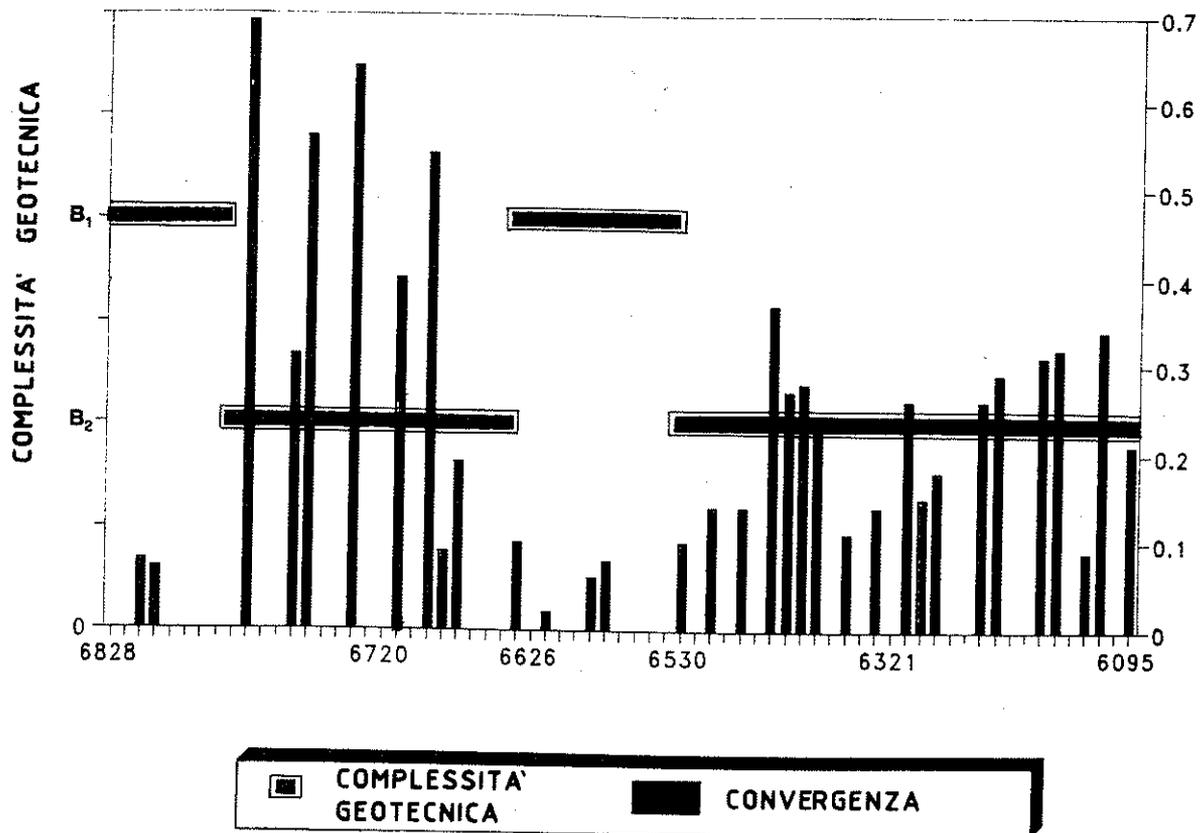


Fig. 6 : Correlazione tra la convergenza e il tipo di complessita' geotecnica.

# GALLERIA SERENA

-  FORMAZIONE DEL MACIGNO
-  UNITA' DI CANETOLO
-  CONTATTO TETTONICO

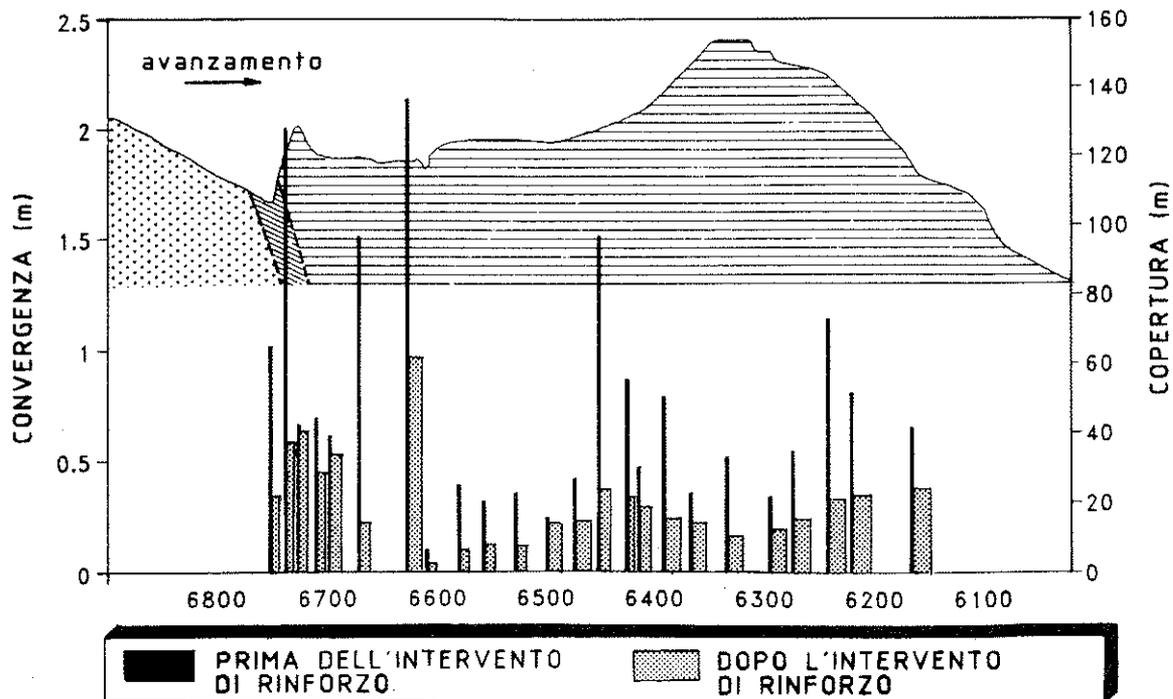


Fig. 7 : Correlazione tra la convergenza attesa prima e dopo l'intervento di rinforzo della roccia, con sovrapposto il profilo geologico.

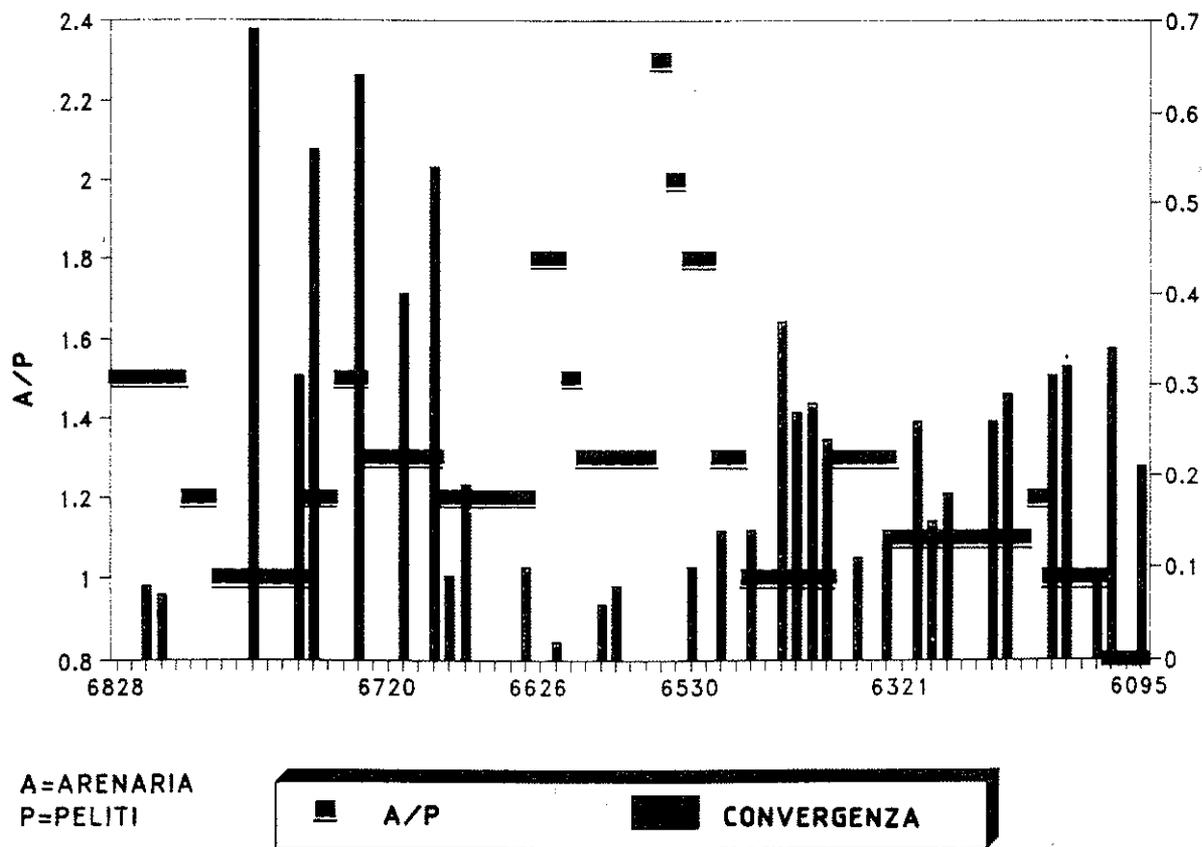


Fig. 8 : Correlazione tra la convergenza e il rapporto tra litologie arenacee e pelitiche incompetenti.

## 8. CONCLUSIONI

Con il metodo della roccia rinforzata si e' potuto controllare l'evoluzione deformativa del cavo in un problematico contesto di elevati carichi agenti e pessime caratteristiche geomeccaniche della massa rocciosa. Attraverso sistematici monitoraggi e proiezioni delle misure di convergenza e' stato possibile affinare il dimensionamento ottimale dell'intervento di rinforzo - eventualmente realizzato da cunicolo esplorativo - garantendo sul sostegno definitivo condizioni di carico meno gravose, con trascurabili deformazioni in corso durante il getto. Si e' osservata, infine, una stretta rispondenza tra comportamento del cavo ed alcuni fattori geostrutturali, quali il tipo di complessita' geotecnica e il rapporto tra litologie arenacee e pelitiche incompetenti.

## 9. BIBLIOGRAFIA

Bieniawski, Z.T. (1984). Rock mechanics design in mining and tunneling. A.A. Balkema.

Bischoff, J.A., and Smart, J.D. (1975). A method of computing a rock reinforcement system which is structurally equivalent to an internal support system. In Proceedings of Sixteenth Symposium on Rock Mechanics, Univ. of Minnesota, pp. 179-184.

Dixon, J.D., Mahtab, M.A., and Smelser, T.W. (1985). Procedures for determining support of excavations in highly yielding ground. U.S. Bureau of Mines RI 8990, pp. 18.

Guilloux, A. (1986). Le techniques recente de construction des tunnels description et comportement compare aux techniques traditionnelles. Conference di Meccanica e Ingegneria delle rocce, Torino, Italy. G. Barla (ed.). Paper n. 15.

Grasso, P., Mahtab, A., and Pelizza S. (1989). Reinforcing a rock zone for stabilizing a Tunnel in Complex Formations. "Proceedings Int. Congress on Progress and Innovation in Tunnelling", Toronto, Canada, pp. 663-670.

Grasso, P., Mahtab, A., Pelizza S., and Russo, G. (1990). On the diverse geotechnical and tunnel construction problems in the La Spezia-Parma link in Italy. "Proceedings of the Int. Congress 'Tunnel and underground works today and future'", Chengdu, China, Vol. 1, pp.41-48.

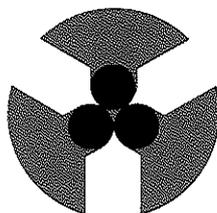
Jaeger, J.C., and Cook, N.G.W. (1979). Fundamentals of rock mechanics. 3rd ed., Methuen and Co, London.

Lang, T.A., and Bischoff, J.A. (1984). Stability of reinforced structures. ISRM Symposium on design and performance of underground excavations, E.T. Brown and J.A. Hudson (eds.), British Geotech.Society, London, 11-18.

Lombardi, G. (1973). Dimensioning of tunnel lining with regards to constructional procedures. Tunnels and Tunneling, Vol5,340-351.

Sulem, J., Panet, M., and Guenot, A. (1987). Closure analysis in deep tunnels. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 24, n. 3, pp. 145-154.

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

P. Grasso, G. Russo, A. Mahtab, S. Pelizza, C. Zanello

**UNA RIUSCITA APPLICAZIONE DEL CRITERIO DI RINFORZO  
DELLA ROCCIA IN GALLERIA**

*SUCCESSFUL APPLICATION OF ROCK REINFORCEMENT AROUND A TUNNEL*

ESTRATTO/REPRINT

ATTI  
PROCEEDINGS

VOL. I