

MIGLIORAMENTO DELLE CONDIZIONI DI SERVIZIO E DI SICUREZZA  
DI UNA GALLERIA FERROVIARIA CON RIVESTIMENTO IN MURATURA

A. BALOSI RESTELLI

Studio di ingegneria civile Balossi, Milano

G. BARLA

P. JARRE

Dipartimento di Ingegneria Strutturale - Politecnico di Torino

## 1. INTRODUZIONE

In questa nota viene descritta l'esecuzione di un intervento di consolidamento e rinforzo del rivestimento in mattoni della galleria S. Pedrino, in Varese.

La galleria, lunga 235 m, sulla linea Como - Laveno, gestita dalle Ferrovie Nord Milano, è stata costruita intorno al 1920. Diverse tratte di rivestimento, danneggiato a causa di deformazioni eccessive e diffuse infiltrazioni di acqua, furono in passato oggetto di riparazioni e rifacimenti.

Per migliorare le condizioni statiche del rivestimento e del terreno intorno alla galleria è stato progettato ed eseguito nel 1984 un complesso intervento di consolidamento e rinforzo. Esso è stato realizzato con raggere di micropali, iniettati per costruire un arco di ricompressione che ha contribuito a scaricare il rivestimento dei forti carichi agenti.

Gli interventi di consolidamento hanno inoltre permesso di procedere in sicurezza ad uno scavo del terreno al piede della galleria, resosi necessario per permettere il passaggio delle carrozze a due piani, di recente adottate dalle ferrovie italiane.

La precaria situazione statica iniziale della galleria, e le condizioni operative nelle quali si è svolto l'intervento, hanno imposto particolari metodologie di controllo dello stato tensionale e deformativo del rivestimento. Nelle fasi precedenti, contemporanea e successiva agli interventi è stato installato un sistema di misura che ha consentito lo svolgimento dei lavori in condizioni di sicurezza, oltre all'affinamento della progettazione inizialmente prevista.

La delicatezza della situazione ha richiesto la messa a punto di particolari tecnologie, descritte in dettaglio in quanto segue. La simulazione preventiva di tutte le operazioni progettate ha permesso di calibrare con precisione gli interventi: un modello numerico è stato infatti utilizzato a scopo di verifica e per prevedere a priori il comportamento deformativo del rivestimento della galleria.

## 2. CONDIZIONI DI PROGETTO

La galleria S. Pedrino è situata nei pressi della stazione di Varese delle ferrovie Nord Milano, a Sud della città, in un'area urbanizzata di recente.

La galleria è caratterizzata da modeste coperture, che variano da 5 m nei pressi dei portali (lato Varese e lato Laveno) sino ad un massimo intorno ai 20 m, nella tratta centrale (Figura 1). La sezione, a ferro di cavallo e priva di arco rovescio, è di circa 25 m<sup>2</sup>, a binario unico. Lo spessore del rivestimento è intorno ai 70 cm, interamente in mattoni nella tratta centrale e sul lato Laveno.

Nei pressi del portale lato Varese (Figura 2) il rivestimento fu sottoposto in passato a diversi interventi di ripristino: l'originale struttura è stata sostituita dapprima con blocchi in pietrame, ai piedritti, e quindi anche con lastre in calcestruzzo prefabbricato, in calotta e parzialmente anche ai piedritti.

L'origine di queste riparazioni sono da ricercarsi nelle forti deformazioni dei piedritti che, nel tempo, avevano subito una certa convergenza, con movimenti accentuati al piede.

Nel corso delle indagini preliminari si è appurato che le infiltrazioni di acqua hanno notevolmente impoverito di frazioni fini il terreno intorno alla galleria: permanenti e diffuse incrostazioni calcaree all'intradosso testimoniavano il costante processo di filtrazione e deposito sul paramento.

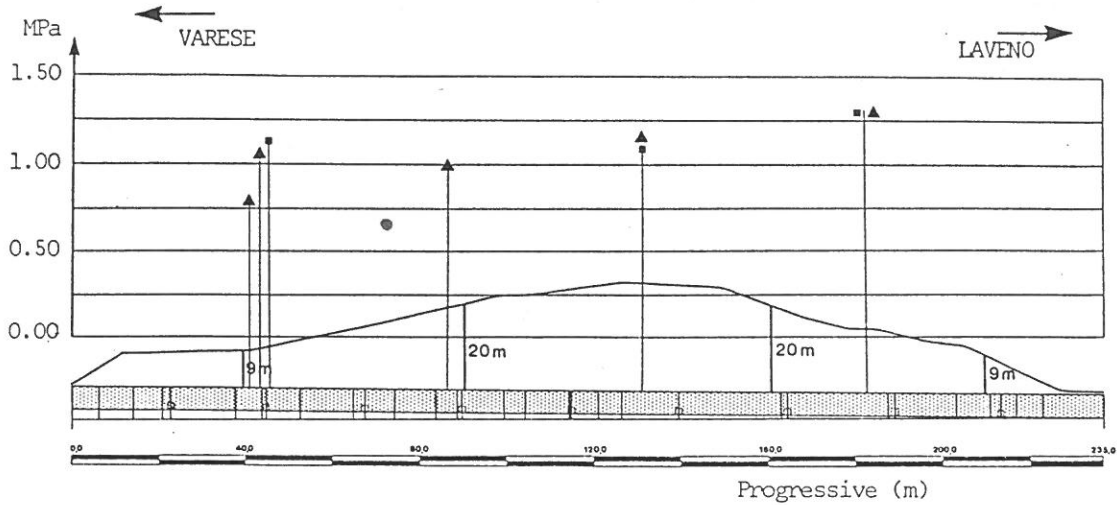
Attraverso il rivestimento in mattoni l'acqua poteva filtrare, trasportando le particelle più fini presenti nel terreno. In assenza di intasamento a tergo del rivestimento, l'acqua scorreva all'estradosso, penetrava tra i mattoni ed in definitiva contribuiva alla decompressione del terreno circostante la galleria.

Diverse prove eseguite con la tecnica del ripristino delle tensioni mediante martinetti piatti (Barla e Rossi, 1983) misero in luce che il rivestimento era molto sollecitato (Figura 1), con valori della tensione circonferenziale sui piedritti prossimi a 1.2 MPa.

Le tensioni misurate con i martinetti piatti risultano pressochè indipendenti dalla copertura. Ciò può indicare che questi sforzi dipendono principalmente da fenomeni di distensione intorno al cavo.

L'esigenza di migliorare le condizioni statiche del rivestimento, anche per poter procedere in sicurezza agli scavi al piede della galleria, ha comportato la messa a punto di un articolato progetto, di consolidamento del terreno e di rinforzo della struttura di sostegno.

In primo luogo sono state eseguite indagini geognostiche, da cui è risultata la natura del terreno, a prevalente componente limoso-sabbiosa. Analisi granulometriche dei campioni



- ▲ Piedritto sinistro (da Varese verso Laveno)
- Piedritto destro (da Varese verso Laveno)

FIGURA 1 - Profilo longitudinale e valori delle tensioni circonferenziali misurate mediante il metodo del ripristino delle tensioni con martinetti piatti.

estratti con sondaggi eseguiti dall'interno e dall'esterno della galleria hanno messo in luce la scarsa iniettabilità dei terreni: il diametro efficace  $\phi_{10}$  è risultato costantemente inferiore a 0.02 mm. Questa situazione è stata confermata da apposite prove di permeabilità, eseguite nell'intorno del cavo, in calotta, alle reni ed al piede.

In seguito all'esame delle condizioni poste dal problema è stato quindi studiato un intervento per:

- Ricomprimere mediante iniezioni il terreno circostante la galleria, riportandolo verso uno stato di tensione simile all'originario.
- Rendere solidale al terreno il rivestimento in mattoni, onde evitare deformazioni e rotture

in fase di scavo o nel lungo termine.

- Determinare un diverso rapporto di distribuzione dei carichi tra terreno e rivestimento, cercando di ricomprimere il primo e scaricare in parte il secondo.

- Regolare il flusso delle acque, senza perturbare lo stato di equilibrio che, nel tempo, si era stabilito intorno alla galleria.

Le condizioni del rivestimento alle varie progressive hanno condizionato la scelta delle tipologie di intervento; nella tratta verso Varese, maggiormente dissestata, si sono previsti gli interventi più massicci, riservando operazioni di minor impegno per la tratta verso Laveno.

La fase esecutiva dell'intervento è stata

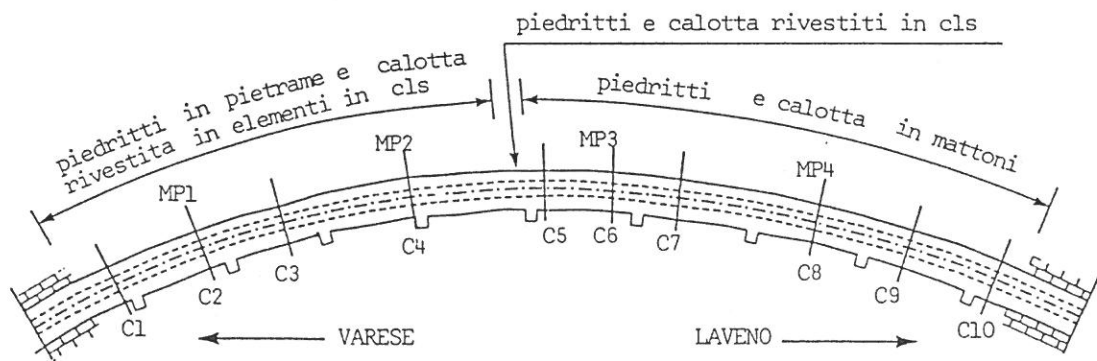


FIGURA 2 - Sviluppo planimetrico ed interventi di ripristino eseguiti in passato. Sono indicate le sezioni C1 - C10 per le misure di convergenza, e le sezioni MP1 - MP4 equipaggiate con martinetti piatti.

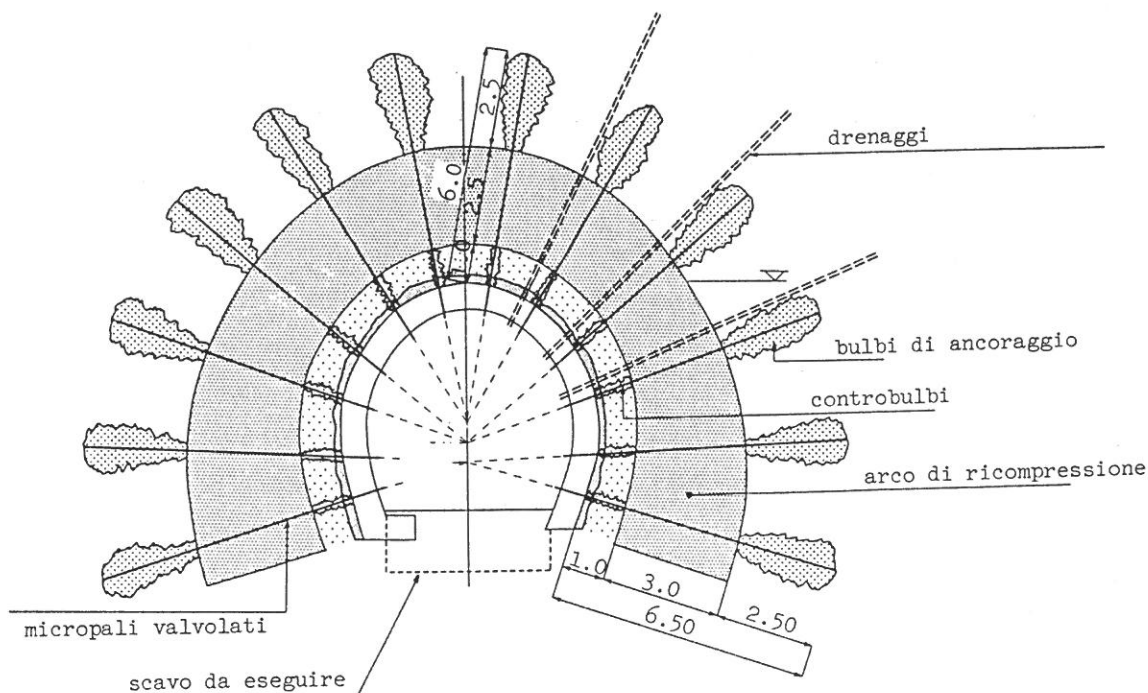


FIGURA 3 - Arco di ricompressione del terreno. Interasse raggere: 2 m. Intervento eseguito per 120 m, tra il portale lato Varese e la sezione C5.

limitata ai tre mesi estivi, durante i quali la linea è stata interrotta con minori disagi per l'utenza. Le indagini preliminari e le operazioni di finitura sono invece state eseguite nelle ore notturne, nei mesi precedenti e successivi la chiusura.

### 3. SCHEMI E TECNOLOGIE DI INTERVENTO

L'intervento è stato articolato, lungo la galleria, prevedendo per i primi 120 m, lato Varese, delle raggere di micropali valvolati (Figura 3); nei restanti 115 m, lato Laveno, sono stati invece utilizzate coppie di micropali per il sostegno e l'ancoraggio del rivestimento al terreno (Figura 4).

Lungo tutta la galleria, si è quindi provveduto alla sottofondazione dei piedritti con murette in c.a. . Eseguiti gli scavi, il getto della platea di armamento e posati i binari, la galleria è stata riaperta al traffico.

L'intervento si è concluso con l'intasamento a tergo del rivestimento e con la regolazione del flusso delle acque a mezzo di drenaggi disposti secondo quanto indicato nella Figura 3.

#### 3.1 Arco di ricompressione

Sul lato Varese sono state eseguite 59 raggere di 12 tubi valvolati ciascuna. Il sistema meccanico così realizzato ha consentito la costruzione di un arco di ricompressione nel terreno circostante la galleria.

Per raddensare e rendere meno permeabile

il terreno intorno alla galleria, si è proceduto all'esecuzione di iniezioni con il metodo della fratturazione idraulica (claquage): provocando, con adeguate pressioni, delle "fratture" molto ravvicinate, si ottiene, in condizioni controllate, una certa ricompressione del terreno trattato ed un sensibile aumento di rigidità, poiché le placche di cemento che si formano si integrano fra loro, costituendo una vera e propria maglia che ingloba un terreno più raddensato.

L'applicazione di queste tecnologie, nel caso della particolare precarietà statica del rivestimento già molto sollecitato, ha comportato una serie di delicati interventi successivi allo scopo di raggiungere il risultato finale senza rischiare di peggiorare le condizioni di stabilità della galleria. Infatti per ottenere l'obiettivo prefissato, è stato necessario confinare rigorosamente la zona in questione, in modo che le miscele non si potessero disperdere senza risultato. E' anche apparso indispensabile iniettare le miscele esattamente in punti ben definiti: per questo i tubi sono stati suddivisi in tratte separate da sacchi otturatori.

Le raggere di micropali a S. Pedrino sono state eseguite suddividendo i tubi in tre tratte:

- La tratta prossima al rivestimento, lunga mediamente 1 m, ha protetto dalla miscela di iniezione in pressione il rivestimento in mattoni, che, essendo già dissestato, rischiava di essere disarticolato da eccessivi incrementi di carico.

- La tratta centrale, di lunghezza intorno



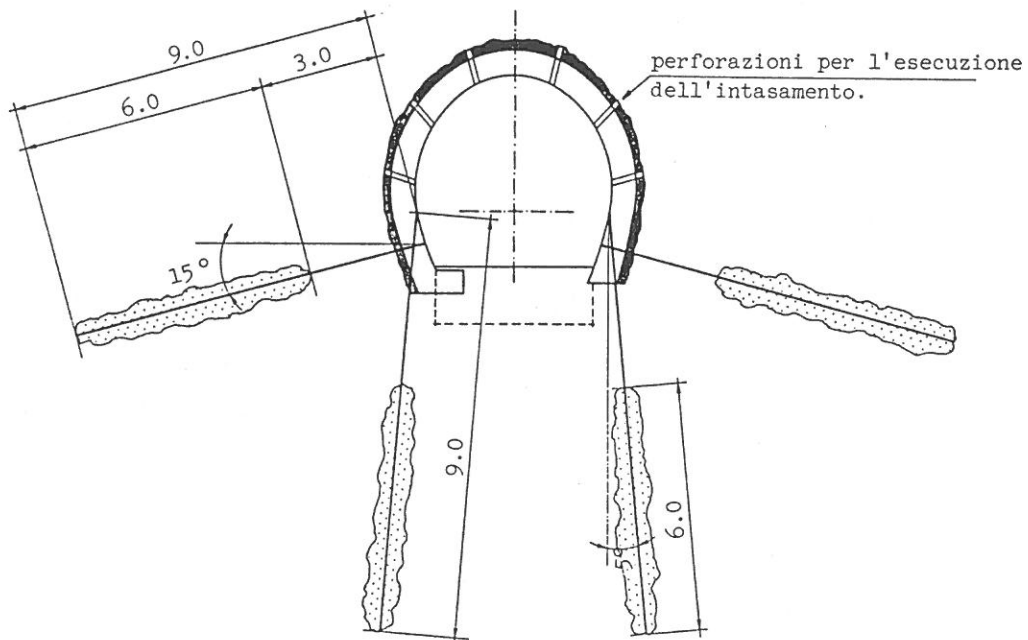


FIGURA 4 - Ancoraggio del rivestimento al terreno. Interasse longitudinale: 1.50 m. Intervento eseguito tra la sezione C5 ed il portale lato Laveno.

ai 3 m, più larga ai piedritti che in calotta, ha avuto la funzione di costituire l'arco di ricompressione vero e proprio.

• La tratta più esterna, di lunghezza media intorno ai 2.5 m, è stata ritenuta idonea, poichè meno allentata, alla costituzione dei bulbi di ancoraggio dei micropali. Questi sono stati leggermente pretesi, ed ancorati al rivestimento con piastre di ripartizione.

Con questa suddivisione dei micropali, attorno all'arco di ricompressione si sono dunque costruite preventivamente due fasce, che sono state nominate "dei controbulbi" e "dei bulbi".

I valori di pressione necessari e non traumatici sono stati calibrati anche in seguito alla esperienza acquisita con la esecuzione delle prime raggere sul lato Varese; la pressione di regime delle iniezioni è stata infatti mantenuta intorno agli 0.5 MPa, poiché si è constatato che valori superiori potevano provocare seri problemi al rivestimento.

Tuttavia l'iniezione più importante, nell'arco centrale, è stata eseguita quando già il rivestimento era parzialmente "ancorato" tramite i bulbi dei micropali e le piastre di fissaggio.

La sequenza delle operazioni necessarie alla costituzione dell'arco di ricompressione è stata infatti la seguente:

- Perforazione (diametro 100 mm) e posa del micropalo, del tipo B (diametro esterno 60.3 mm, diametro interno 40.3 mm, portata a trazione 280 kN) (Figura 5).

- Espansione del sacco otturatore tra la zona dei bulbi e l'arco.

- Esecuzione della guaina, tra terreno e micropalo, oltre l'arco.

- Iniezioni per la costituzione del bulbo di ancoraggio.

- Posa della piastra di ripartizione e leggero tensionamento (intorno ai 20 kN) del micropalo.

- Completamento della guaina lungo il micropalo, tra il sacco otturatore ed il rivestimento.

- Primo intasamento a tergo del rivestimento, con pressioni molto basse, intorno a 0.2 MPa.

- Iniezioni per la costituzione del controbulbo.

- Esecuzione delle iniezioni di ricompressione dell'arco resistente. Come spiegato in dettaglio altrove (Barla et al, 1986) le prime esperienze hanno consigliato di ricorrere ad almeno due passate successive di iniezioni di ricompressione, con pressioni, come detto, inferiori a 0.5 MPa.

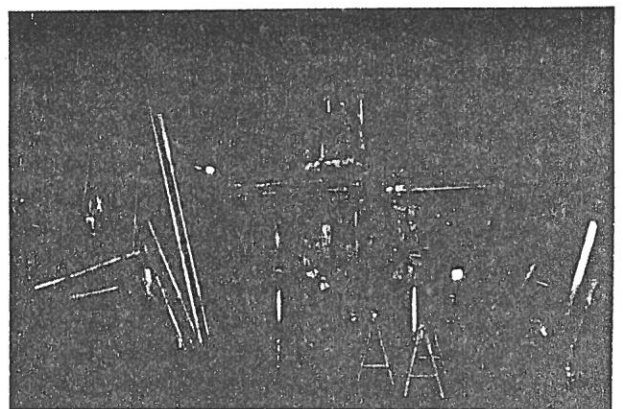


FIGURA 5 - Perforazioni per le raggere di micropali.



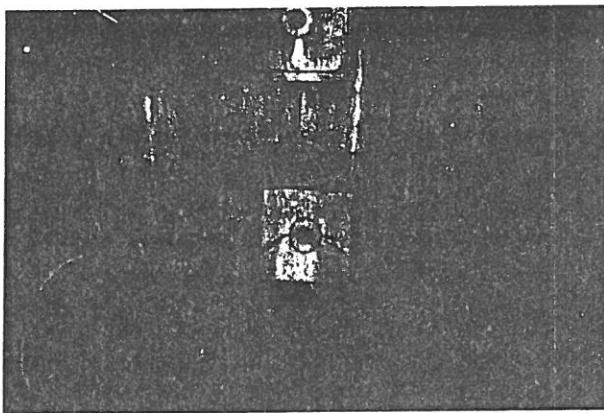


FIGURA 6 - Piastre di fissaggio e tubicini di sfiato.

- Intasamento in testata, tra micropalo e muratura del rivestimento.

- Riempimento dell'interno dei micropali.

La piastra di ripartizione è stata forata per il passaggio di due tubetti in plastica (Figura 6):

- Il primo tubetto è servito allo sfogo dell'aria, ed è stato accecato dopo il riempimento dell'intercapedine tra micropalo e terreno.

- Il secondo tubetto è servito al riempimento dell'interno dei micropali con una pompetta a mano per l'iniezione di miscele molto dense caricate con additivo antiritiro.

Le miscele cementizie utilizzate nelle diverse operazioni sono state le seguenti:

- Per i bulbi ed i controbulbi dei micropali (40 l/valvola), e per la miscela di guaina oltre il sacco otturatore:

cemento	100 kg
acqua	50 kg
additivi fluidificanti	1 kg

- Per gli imbottimenti, la guaina sottostante il sacco otturatore e l'arco di ricompressione:

cemento	50 kg
acqua	70 kg
bentonite (C <sub>13</sub> - Valdol)	4 kg

Il volume di miscela cementizia iniettato nell'arco è stato controllato con i livelli di pressione raggiunti ai manometri degli

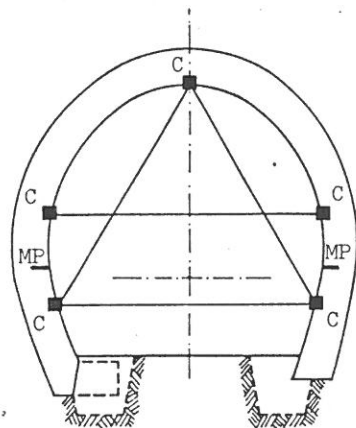


FIGURA 7 - Prova di scavo e di sottomurazione eseguita in condizioni controllate, con misure di convergenza (C) e martinetti piatti (MP).

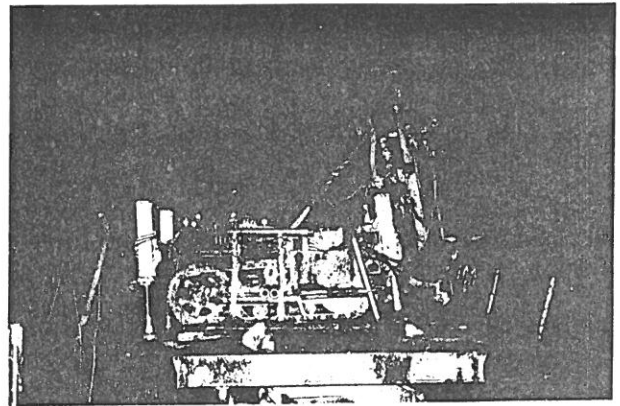


FIGURA 8 - Perforazioni per i micropali subverticali lato Laveno.

iniettori; in sede di progetto è stato previsto un volume di miscela pari al 12 per cento del volume del terreno interessato da ogni micropalo. Al termine dei lavori, è risultato che, mediamente, il limite massimo di pressione imposto ha contenuto questa percentuale entro il 10 per cento.

### 3.2 Micropali di ancoraggio

Nella parte centrale e verso il portale lato Laveno il rivestimento si presentava in condizioni discrete, a parte locali venute d'acqua e sconessioni dei mattoni sul paramento. In questa zona non si è quindi ritenuto di dover ricorrere all'arco di ricompressione.

Dovendosi però procedere allo scavo del piede della galleria, per un'altezza che a fine lavori è risultata prossima al metro, si è reso necessario fornire un sostegno alla base dei piedritti, per non correre il rischio di provocare dei cedimenti delle sezioni interessate.

Per verificare la necessità di contenere i piedritti, è stata eseguita una prova di scavo in assenza di sostegni: per una lunghezza di circa 4 m, quasi un diametro equivalente della sezione, sono stati sottoscavati alternativamente i piedritti destro (lato monte) e sinistro.

Lo scavo, di altezza pari a 1 m, è stato spinto al di sotto della base del piedritto (Figura 7). In precedenza, sulla sezione di prova erano stati installati dei martinetti piatti, uno per paramento, e dei chiodi per le misure di convergenza. I risultati sono stati particolarmente interessanti:

- Lo scavo del piedritto destro ha indotto uno scarico del martinetto da 1.3 MPa a 1.0 MPa, ed un incremento di carico al martinetto del piedritto sinistro da 1.1 a 1.4 MPa.

- Lo scavo del piedritto sinistro ha poi portato il martinetto sinistro da 1.4 a 0.9 MPa, mentre il martinetto destro si è ricaricato, portandosi da 1.0 a 1.1 MPa.

- Le misure di convergenza hanno indicato una rotazione alternata, verso lo scavo, della sezione; complessivamente, inoltre, si è registrata una chiusura di 1 mm alle reni.

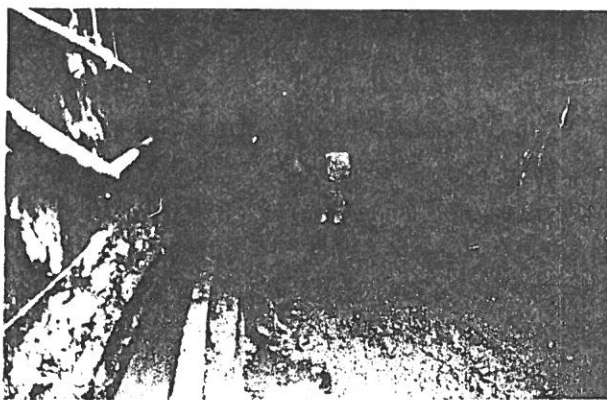


FIGURA 9 - Getto della platea per il nuovo armamento.

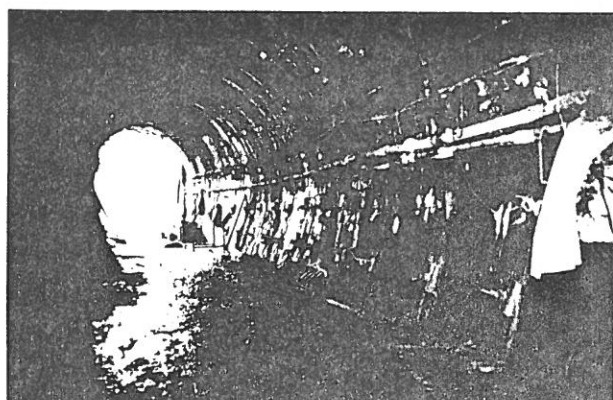


FIGURA 10 - Raggere completate nei pressi del portale lato Varese.

L'influenza degli scavi di sottomurazione sulla situazione statica del rivestimento ha indotto al progetto di un sistema di sostegno e di ancoraggio del rivestimento al terreno.

Per garantire quindi l'esecuzione degli scavi in sicurezza sono state inserite nel rivestimento delle coppie di micropali, subverticali e suborizzontali, come indicato nella Figura 4:

- I micropali verticali, del tipo D (diametro esterno 76.1 mm, diametro interno 47.7 mm, portata a compressione 630 kN) hanno contribuito a riportare i carichi, al di sotto del piano finale, nel terreno.

- I micropali orizzontali, del tipo B, hanno impedito la chiusura ed il dissesto del piede del rivestimento.

### 3.4 Scavi e sottomurazioni (Figura 9)

Per l'intera lunghezza della galleria si è proceduto alla sottomurazione dei piedritti con murette in c.a. di circa 80 cm di altezza e 40 cm di larghezza. Gli scavi sono stati eseguiti a campioni di lunghezza massima pari a 3 m.

L'altezza dello scavo per l'abbassamento del piano del ferro è stata limitata mediante l'adozione di un sistema di armamento semi-rigido, costituito da una platea in c.a. e da blocchetti prefabbricati annegati in resine poliuretatiche.

Terminate le sottomurazioni (Figura 10), si è realizzato a campioni lo scavo del terreno. Sono quindi rapidamente seguiti i getti in calcestruzzo della platea in c.a.

### 3.5 Intasamento e drenaggi

Terminato l'armamento, la galleria è stata riaperta al traffico. Nelle ore notturne è proseguito l'intervento di consolidamento, con le fasi di intasamento sul lato Laveno e con la posa in opera dei drenaggi.

L'intasamento a tergo del rivestimento, realizzato con iniezioni di miscele cementizie attraverso i fori (Figura 4) praticati nei mattoni, è stato particolarmente lungo e difficile: le miscele tendevano a rifluire tra

un corso e l'altro, richiedendo una continua opera di cianfrinatura. Nonostante l'ordinata esecuzione delle iniezioni ed il moltiplicarsi delle passate successive i risultati non sono sempre stati pienamente soddisfacenti.

I fori per i drenaggi, disposti come indicato nella Figura 3, sono stati spinti, nella tratta verso Varese, oltre l'arco di ricompressione, onde captare l'acqua al di là della zona resa più impermeabile dai trattamenti precedenti. Apposite canalette in PVC sono state fissate al paramento di intradosso, per convogliare le acque nella canaletta longitudinale ricavata nella platea di armamento.

## 4. METODO DI CALCOLO

Gli interventi di consolidamento vengono dimensionati, in generale, ricorrendo all'esperienza acquisita con precedenti lavori, ed osservando attentamente i risultati ottenuti nel corso dell'esecuzione.

Per cercare di prevedere il comportamento di insieme della struttura progettata per la galleria S. Pedrino si è voluto tentare un approccio più completo, mediante i metodi della simulazione matematica. I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare la complessa interazione tra rivestimento, arco di ricompressione, micropali e terreno, e sono stati anche molto utili per dimensionare i micropali e valutare a priori il limite di pressione da adottare (Barla e Jarre, 1986).

La simulazione è stata effettuata mediante un modello ad elementi finiti, con il quale sono state riprodotte le diverse fasi di lavoro previste, attraverso una serie di analisi di calcolo consecutive.

### 4.1 Modello ad elementi finiti

Nelle ipotesi di simmetria di sezione e di carichi è stato costituito un modello, ad elementi quadrilateri isoparametrici a quattro nodi, che ha riprodotto la sezione della galleria ed il terreno circostante, fino a piano campagna.

Da un modello di base (Figura 11) con opportune correzioni sono state definite quattro

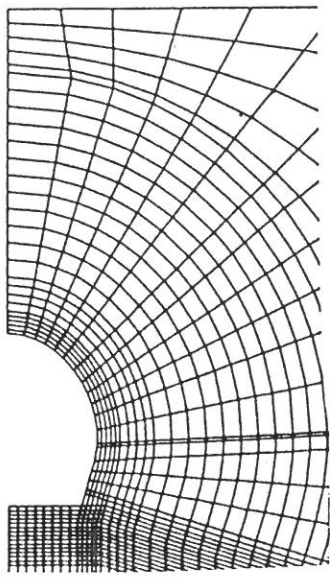
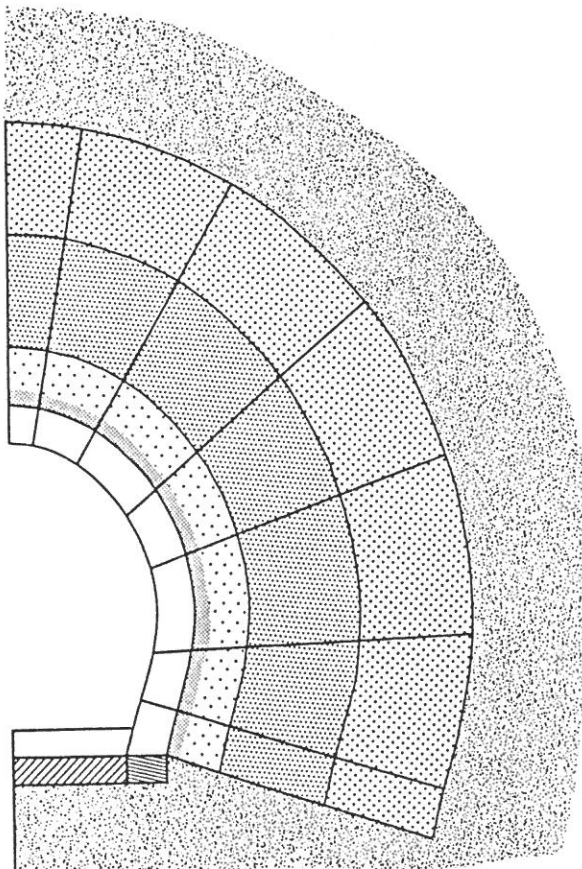


FIGURA 11 - Particolare del modello ad elementi finiti messo a punto per dimensionare e verificare a priori l'intervento.

situazioni geometriche differenti, relative a coperture di 9 e 20 m, per i diversi interventi previsti sul lato Varese e sul lato Laveno.

Il modello è stato costruito in modo da poter agevolmente rappresentare diverse aree, i cui elementi assumono proprietà particolari nel corso delle analisi di calcolo (Figura 12).



Nell'ipotesi di deformazione piana sono state svolte, per le quattro situazioni esaminate, tre analisi di calcolo:

- Riproduzione della situazione iniziale.
- Simulazione del consolidamento (lato Varese).
- Simulazione dello scavo al piede.

A partire dallo stato di tensione originario, assunto come geostatico (con  $K_0 = 0.35$ ) sono stati simulati lo scavo della galleria e la posa del rivestimento in mattoni. Lo scavo è stato riprodotto mediante un sistema di forze che riduce le tensioni radiali all'intradosso del rivestimento. Applicando diverse aliquote delle forze sul paramento esterno del rivestimento, è stata riprodotta la situazione di sforzo rilevata mediante martinetti piatti.

Per ottenere i valori misurati con i martinetti è stato necessario applicare il 100 per cento delle forze di scavo alle sezioni con copertura di 9 m; per le sezioni a copertura di 20 m, la situazione iniziale è stata riprodotta con il solo 60 per cento delle forze di scavo.

Le diverse percentuali rispecchiano quanto osservato con le prove, circa l'indipendenza tra sforzi misurati e copertura: nelle tratte a minor copertura gravava l'intero carico litostatico, mentre nella parte centrale il terreno era in parte in grado di autosostenersi.

Nella Figura 13 sono indicati i valori della tensione principale massima, calcolata secondo quanto sopra, per il rivestimento delle sezioni con copertura di 9 e 20 m.









	Terreno naturale	$E_d$ 150 MPa $\nu$ 0.30 (-)
	Rivestimento	$E_d$ 3000 MPa $\nu$ 0.28 (-)
	Scavo del terreno al piede	
	Controbulbi	
	Arco di ricompressione	
	Bulbi di ancoraggio	
	Intasamento	
	Zona di disturbo dovuto allo scavo	

FIGURA 12 - Aree del modello ad elementi finiti aventi proprietà di deformabilità ( $E_d$ : modulo di Young,  $\nu$ : rapporto di Poisson) caratteristiche.



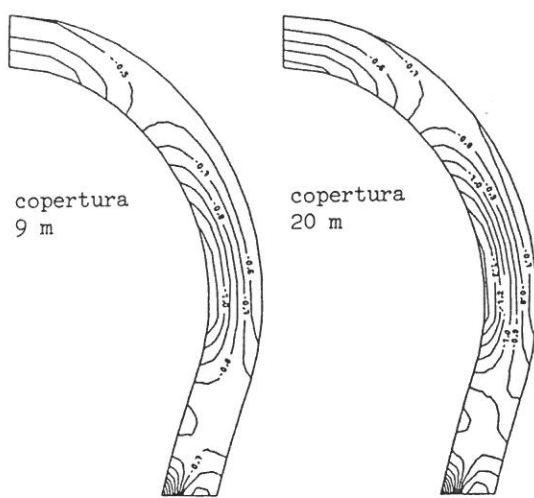


FIGURA 13 - Sforzi di compressione (MPa) calcolati con la simulazione dello scavo della galleria.

Le operazioni di consolidamento sono state simulate tenendo conto degli effetti statici indotti sulla struttura di insieme; la presenza dei micropali è riprodotta mediante elementi finiti monodimensionali, connessi al terreno secondo quanto previsto dal progetto (Figura 14).

Gli effetti considerati nella simulazione della costruzione dell'arco di ricompressione (lato Varese) sono:

- Presenza delle fasce di terreno trattato (bulbi, arco, controbulbi).
- Presenza dei micropali.
- Esecuzione delle iniezioni di ricompressione.

Le fasi precedenti alla costituzione dell'arco non inducono effetti statici rilevanti, poiché avvengono senza provocare deformazioni nel terreno. L'effetto statico delle iniezioni è invece molteplice, in quanto nell'arco si

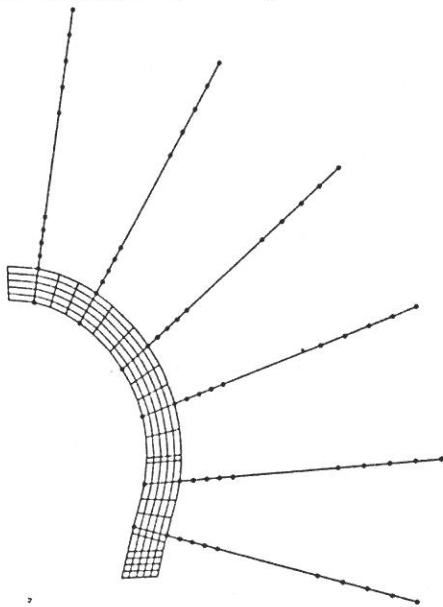


FIGURA 14 - Elementi finiti monodimensionali rappresentanti i micropali valvolati. Sono indicati i punti di connessione dei micropali al terreno.

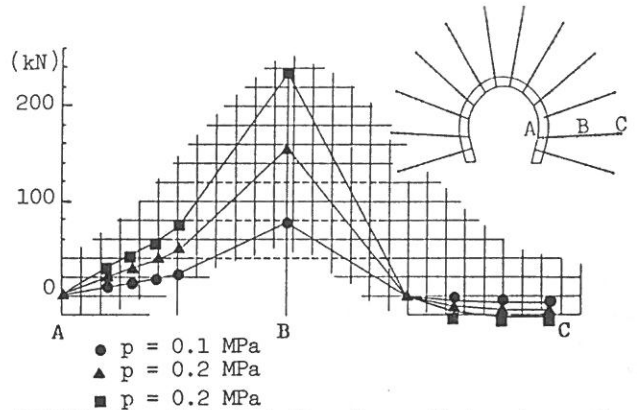


FIGURA 15 - Valori dello sforzo di trazione calcolato per i micropali in funzione della pressione residua di iniezione.

verificano:

- un aumento di volume, dovuto alle iniezioni in pressione delle miscele. L'incremento di volume, proporzionale alla pressione residua di ipotesi, è stato riprodotto secondo una dilatazione uniforme dell'area di ogni elemento finito appartenente alla fascia dell'arco di ricompressione;

- un aumento di rigidità, simulato raddoppiando il valore del modulo di deformabilità originario ( $E_d$  150 MPa + 300 MPa);

- un incremento di peso, dovuto al cemento iniettato ( $\Delta\gamma = 2 \text{ kN/m}^3$ ).

Per studiare gli effetti della pressione di iniezione sono state condotte tre analisi parametriche, con pressioni pari a 0.1, 0.2 e 0.3 MPa. E' importante osservare che questi valori si riferiscono alla pressione residua nell'arco.

I risultati ottenuti sono particolarmente interessanti, poiché la simulazione ha messo molto bene in luce il comportamento di insieme dei diversi elementi strutturali:

- Con l'iniezione dell'arco, i micropali subiscono un incremento di trazione, proporzionale alla pressione residua di ipotesi (Figura 15). Il valore massimo si ottiene al centro dell'arco, nei micropali in chiave, ed è pari a 230 kN, per pressioni di 0.3 MPa.

- Alla trazione nei micropali corrisponde una ridistribuzione degli sforzi nel terreno (Figura 16), che subisce una ricompressione proporzionale al confinamento fornito dal terreno di copertura ed alle pressioni di ipotesi.

- Il rivestimento tende a scaricarsi. In particolare, le compressioni all'intradosso diminuiscono, proporzionalmente con le pressioni di ipotesi, e tendono verso valori di trazione.

- Con coperture crescenti, i micropali sono più confinati, e si verificano spostamenti minori del rivestimento. Nella Figura 17 sono indicate le configurazioni iniziali (tratto continuo) e deformate (tratto discontinuo) del rivestimento e dell'area dell'arco di ricompressione.

E' interessante notare che i bordi interno ed esterno dell'arco soggetto ad iniezioni tendono ad allargare l'area, ma sono trattenuti dai micropali, che subiscono così un incremento di trazione.

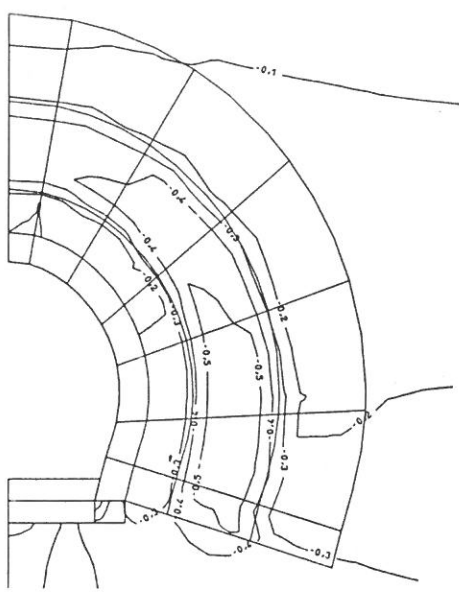


FIGURA 16 - Sforzo di compressione (MPa) nel terreno in seguito al consolidamento (pressione di ipotesi 0.3 MPa).

La simulazione dello scavo al piede è stata eseguita applicando sul contorno di ipotesi un sistema di forze che ha ridotto del 50 per cento le tensioni ortogonali al contorno. Gli effetti dello scavo, secondo i calcoli, sono consistiti principalmente in una tendenza dei piedritti a chiudere, verso la galleria, in modo crescente con la copertura, cioè con le tensioni preesistenti.

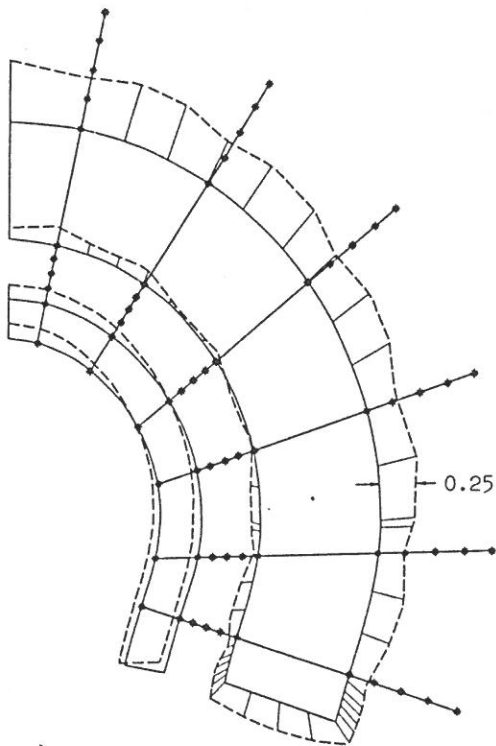


FIGURA 17 - Spostamenti dei contorni dell'arco di ricompressione e del rivestimento, in seguito al consolidamento (pressione di ipotesi 0.3 MPa).

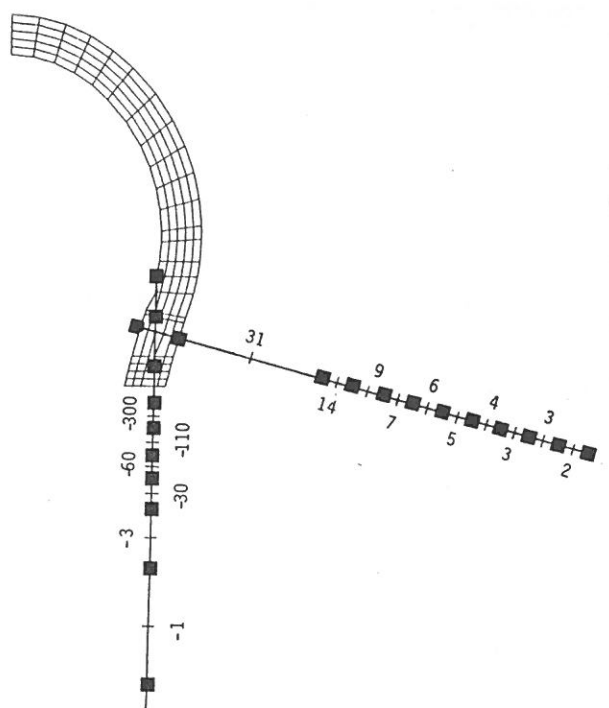


FIGURA 18 - Lato Laverno. Sforzi dei micropali (kN) calcolati con la simulazione dello scavo da effettuare al piede della galleria. I valori di trazione sono positivi.

Con riferimento all'intervento sul lato Laverno, nella Figura 18 sono riportati i valori di sforzo nei micropali risultanti dallo scavo al piede; in base a questi valori è stata verificata la scelta relativa al tipo dei micropali.

## 5. SISTEMA DI CONTROLLO

Per controllare i risultati conseguiti con l'intervento, svolgere il lavoro in sicurezza e verificare quanto previsto in sede di progetto, è stato messo in opera un sistema di misure, la cui presenza ha caratterizzato l'esecuzione stessa dell'intervento; ogni operazione eseguita è stata infatti documentata, ed i risultati ottenuti sono stati interpretati alla luce di quanto previsto in sede teorica e di quanto verificato in realtà.

Il livello delle pressioni neutre nel terreno è stato controllato con piezometri esterni alla galleria e celle prossime al paramento; le deformazioni del rivestimento sono state osservate con 10 sezioni di convergenza (Figura 19) distribuite lungo la galleria secondo quanto indicato nella Figura 2.

In accordo alla posizione delle lavorazioni, sono stati installati e spostati a più riprese dei misuratori di convergenza collegati a registratori continui, in modo che il personale di cantiere potesse verificare l'eventuale comparsa di movimenti critici.

Quattro sezioni con martinetti piatti (Figura 19) sono state posizionate lungo la galleria.

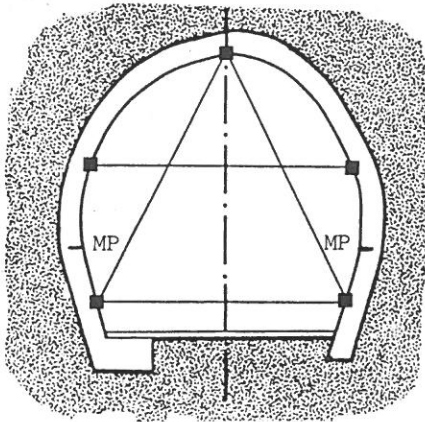


FIGURA 19 - Stazione attrezzata per le misure di convergenza (■) e con martinetti piatti (MP).

Il valore della pressione indicata dal manometro collegato al martinetto è stato rilevato quotidianamente.

I risultati più interessanti delle misure si sono registrati con l'esecuzione delle prime raggere lato Varese; con l'inizio delle iniezioni, il rivestimento ha avuto un cedimento improvviso di circa 1 cm, a chiudere, alle reni. Questo ha indotto all'esecuzione di almeno due passate successive, con quantitativi di miscela dimezzati. Per il portale lato Varese, si è inoltre provveduto al rafforzamento delle raggere originarie con un sistema di micropali aventi funzioni di ancoraggio del piede.

Le iniezioni successivamente eseguite in questa zona hanno provocato deformazioni molto modeste nel rivestimento.

Il controllo costante dello stato deformativo ha poi permesso di apprezzare lungo la galleria i duplici effetti delle iniezioni successive, e di verificare che le convergenze misurate durante le diverse lavorazioni, ed in particolare durante gli scavi, fossero ben contenute entro valori accettabili (Figura 20).

Nel complesso, il sistema di misura ha consentito di procedere con sicurezza alle diverse lavorazioni, dimostrando l'adeguatezza del progetto e la necessità di intervenire con cautela nei confronti di una situazione che, a partire dai risultati delle prime indagini, non ha cessato di essere particolarmente delicata.

## 6. CONCLUSIONI

Il consolidamento dei terreni e dei rivestimenti in gallerie in mattoni può essere effettuato con successo con la messa a punto di particolari tecnologie, sulla scorta di approfondite indagini preliminari che permettano di articolare l'intervento secondo le specifiche esigenze del problema in esame.

L'esperienza acquisita con gli interventi descritti indica inoltre come sia possibile utilizzare i metodi di simulazione matematica per cercare di prevedere, non solo in modo qualitativo, il comportamento di insieme delle

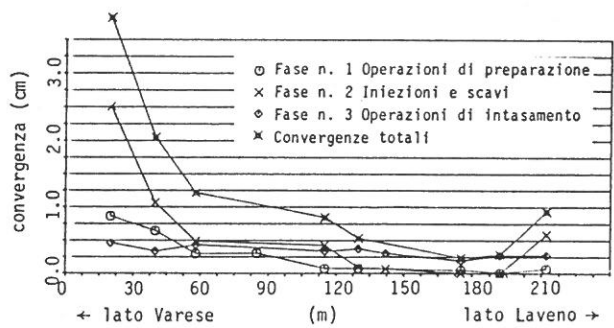


FIGURA 20 - Misure di convergenza eseguite nel corso dell'intervento. Valori medi misurati sulle corde orizzontali.

strutture che, con il consolidamento dei terreni, si vogliono realizzare.

E' infine importante osservare che solo il continuo controllo dei risultati ottenuti, secondo un metodo di progettazione aperto a cambiamenti in corso d'opera, consente di svolgere anche in situazioni delicate il lavoro in sicurezza, documentando le necessità di intervento e gli effetti conseguiti.

## 7. BIBLIOGRAFIA

G. Barla e P.P. Rossi (1983) "Stress measurements in tunnel linings". Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zurich.

G. Barla e P. Jarre (1986) "Numerical predictions and real behavior of a reinforcement system for a tunnel in northern Italy". Second Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Ghent.

G. Barla, A. Balossi Restelli e P. Jarre (1986) "Misure e controlli per il consolidamento di una galleria ferroviaria con rivestimento in muratura". Gallerie e Grandi Opere Sotterranee (in corso di pubblicazione).

## 8. RINGRAZIAMENTI

Alle FERROVIE NORD MILANO, ed in particolare all'Ing. Stiriti, Vicedirettore Impianti Fissi, ed Ing. Ceriani, Direttore dei Lavori, ed all'Impresa appaltatrice RODIO S.p.A., che ha eseguito gli interventi di consolidamento, ed alla ditta A.I.C.E. s.r.l., che ha curato per conto della RODIO S.p.A. il sistema di controllo, avvalendosi della consulenza della GEOANALYSIS s.r.l., che ha altresì curato le analisi di calcolo per il dimensionamento dell'intervento, vanno i più sentiti ringraziamenti degli Autori.