

Misure e controlli per il consolidamento di una galleria ferroviaria con rivestimento in muratura

Giovanni Barla*
Achille Balossi Restelli**
Pietro Jarre***

SOMMARIO

Scopo della presente nota è la descrizione del sistema di controllo impiegato durante i lavori di consolidamento e ripristino statico del rivestimento in mattoni di una galleria ferroviaria a binario unico, costruita all'inizio del secolo: la galleria S. Pedrino, in Varese. Sono in particolare descritti i risultati delle misure eseguite per verificare la sicurezza dei lavori ed affinare il progetto dei previsti interventi.

La galleria S. Pedrino, lunga 235 m, si sviluppa sotto la città di Varese con coperture massime di 25 m. La forma della sezione è a ferro di cavallo, ed il rivestimento, di spessore 70 cm, è privo di arco rovescio.

Diverse prove con martinetti piatti (Fig. 1) hanno confermato che la situazione del rivestimento, molto deformato e danneggiato da filtrazione di acque, era tale da richiedere solleciti interventi di ripristino.

Gli interventi (Figg. 3 e 4) hanno avuto lo scopo di riportare la galleria verso una situazione statica soddisfacente, di regimare i flussi idraulici nel suo intorno, e di ancorare il rivestimento al terreno; per permettere il transito di carrozze a due piani, si è scavato inoltre il terreno alla base della galleria, per circa 1.0 m di altezza.

L'intervento è stato eseguito, per la parte di galleria più danneggiata, con raggere di 12 tubi valvolati (micropali tipo Tubfix), iniettati con miscele cementizie alla pressione massima di 0.5 MPa; intorno alla galleria è stato costituito così un arco di ricompressione del terreno e di scarico del rivestimento. Nella tratta meno danneggiata il rivestimento è stato ancorato al terreno con una serie di coppie di micropali inseriti nel piedritto.

Le misure di convergenza sul contorno della galleria ed il controllo dello stato tensionale nel rivestimento, con martinetti piatti (Fig. 5), hanno permesso di svolgere il lavoro in sicurezza, e di perfezionare il progetto iniziale. L'adeguatezza dello stesso progetto è stata dimostrata dalla uniformità dei cedimenti rilevati nel lungo termine.

Il piedritto, in particolare, si è dimostrato molto sensibile al contrasto offerto dal sottofondo al piede della galleria; gli effetti delle iniezioni cementizie (Figg. 6 - 8) sulle convergenze hanno imposto l'esecuzione di passate successive di iniezioni con quantitativi di miscela ridotti.

Una raggere di micropali è stata strumentata con estensimetri (Fig. 9), e si è verificato l'andamento nel tempo della trazione indotta dalle iniezioni sui micropali: per ricomprimere il terreno, questi sono stati portati in trazione, con valori di circa 100 kN. L'andamento nel tempo della trazione corrisponde ad un comportamento di tipo picco - residuo (Fig. 10), ed i valori misurati si accordano bene con i valori previsti con il modello matematico usato per dimensionare l'intervento (Fig. 11).

SOMMAIRE

Systeme de contrôle pour le renforcement d'un tunnel, des chemins de fer, avec le revêtement en briques

But de cet article est la description du système de contrôle employé pour le renforcement et le rétablissement statique du revêtement en briques et pierres dans un tunnel des chemins de fer, à une seule voie, construit au début du siècle: la galerie S. Pedrino a Varese (Italie).

Le tunnel S. Pedrino, longue de 235 m, court sous la ville de Varese avec un maximum de couverture de 25 m. La forme de la section est à fer à cheval (Fig. 3) et le revêtement, 70 cm d'épaisseur, n'a pas de radier. Plusieurs essais avec des vérins plats ont confirmé (Fig. 1) que la situation du revêtement, très déformé et endommagé par des percolations d'eau, était critique. Les techniques employées (Fig. 3 et 4) ont été appliquées pour obtenir des conditions satisfaisantes pour le tunnel, soit au point de vue statique, soit au point de vue hydraulique. En outre, pour permettre le passage de voitures à deux étages, on a creusé le sol à la base de la galerie pour environ 1 m.

L'opération a été réalisée, pour le tronçon le plus endommagé, avec des éventails de 12 micropieux Tubfix, injectés avec des coulis au maximum de pression d'injection de 0.5 MPa; autour de la galerie on a ainsi constitué un arc de recompression du sol, et de décharge de revêtement. Dans le tronçon le moins endommagé le revêtement a été ancré au sol par une série de micropieux insérés dans le pied-droit.

Les mesures de convergence et le contrôle de l'état de contrainte avec des vérins plats (Fig. 5) ont permis d'exécuter le travail en condition de suffisante sûreté et de perfectionner le projet initial. Le pied-droit, surtout, est résulté très sensible au contraste offert par le sous-fond au pied du tunnel; les effets des injections de coulis sur les convergences (Fig. 6 et 8) ont rendu nécessaire l'exécution de nombreuses passes d'injection avec des quantitatifs réduits de coulis.

La bonté du projet a été démontrée par l'uniformité des tassements mesurés après plusieurs mois.

Un éventail de micropieux a été contrôlé avec des strain gages (Fig. 9) et on a vérifié le développement dans le temps de la traction induite par les injections dans le micropieux: pour recomprimer le sol, les Tubfix ont été portés en traction à des valeurs (Fig. 10) d'environ 100 kN; ces valeurs s'accordent bien avec les valeurs prévues par les calculs à élément fini développés pour le dimensionnement de l'opération (Fig. 11).

* Prof. Ing. Giovanni Barla - Professore Ordinario di Meccanica delle Rocce - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Torino.

** Dott. ing. Achille Balossi Restelli, Studio di Ingegneria Civile, Milano.

*** Dott. ing. Pietro Jarre, Geanalysis s.r.l., Torino.

SYNOPSIS

Observations and measurements during the consolidation and repair work of a railway tunnel with a masonry lining

The purpose of the present is to describe the monitoring system used, and the observations and measurements performed during the soil reinforcement and repair work of a railway tunnel lining, the S. Pedrino Tunnel, near Varese (Italy).

The S. Pedrino Tunnel, 235 m in length, was constructed at the beginning of the century under the city of Varese, with a maximum depth of cover of 25 m approximately. The shape of the tunnel cross section is horseshoe and the brick masonry lining, without invert, is 70 cm in thickness.

A number of flat jack tests, performed in the tunnel lining (Fig. 1), allowed to assess its state of stress; the deformations in the lining and the damages due to water seepage were such as to require a reinforcement of the soil surround and of the same lining.

The techniques used (Figg. 3 and 4) were applied with the main object to obtain a satisfactory condition for the tunnel, from both the static and hydraulic point of view. Also, consideration needed be given in design to the additional requirement to lower the tunnel invert of 1.0 m approximately, in order to allow for the transit of double deck coaches.

The reinforcement system consisted, in the most damaged tunnel length, of the application of a number of consolidated arches, each one made of 12 micropiles (Tubfix type), injected with a cement mixture, at a maximum pressure of 0.5 MPa. In this way, a "compressed arch" could be created around the tunnel at the same time of the unloading of the lining. In the less damaged tunnel length, the lining was "anchored" to the surrounding soil by means of two micropiles which were fixed to the same lining structure.

The convergence measurements carried out at the tunnel contour, in conjunction with monitoring of the stress level in the lining (Fig. 5), allowed the consolidation and repair work to be performed with safety, while the initial design could be improved substantially.

The design could be validated during construction with a systematic application of the observational approach. The deformations at the tunnel contour, a few months after the completion of the consolidation and repair work, have shown to be uniformly distributed, with a satisfactory condition of the lining being achieved. The tunnel wall has shown to be greatly affected by the conditions imposed at the invert; the clear influence of the soil injection (Figg. 6 to 8) on the convergences of the same lining required the consolidation work to be performed in stages, by controlling both the volume and pressure of the cement mixture.

A typical cross of the tunnel was instrumented with strain gages being applied at the micropiles (Fig. 9), in order to monitor the traction, as due to the injection pressure. The soil around the tunnel was "compressed" with the micropiles being tensioned at 100 kN normal force.

The tensile force in the micropiles exhibits with time a peak-residual behavior (Fig. 10) and the measured values agree well with the predictions made by numerical modelling (Fig. 11).

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni sono sempre più frequenti interventi relativi a situazioni di dissesto in gallerie costruite in tempi non recenti. In questa nota vengono illustrati alcuni aspetti concernenti un intervento di consolidamento del rivestimento in mattoni di una galleria ferroviaria costruita all'inizio del secolo. L'opera in esame è la galleria S. Pedrino, in Varese, sulla linea delle Ferrovie Nord Milano, da Como a Laveno (tratto Varese - Casbeno).

Il rivestimento della galleria, soggetto a forti deformazioni ed a percolazione di acque, fu sottoposto in passato a numerosi interventi di manutenzione e parziale rifacimento, con i quali si sostituì, in diverse tratte, una parte della originaria muratura in mattoni.

La necessità di mantenere l'opera in servizio, migliorandone anzi i livelli di prestazione, ha indotto alla scelta di un articolato progetto, volto al consolidamento dei terreni intorno alla galleria ed al miglioramento delle caratteristiche statiche della struttura.

La particolare delicatezza della situazione ha richiesto la messa in opera di un sistema di controlli e misure che ha consentito l'esecuzione dei lavori in condizioni di sicurezza, ed anche l'affinamento, in corso d'opera, dei metodi e delle tecnologie di intervento inizialmente previste.

2. GENERALITÀ

Interventi di risanamento dei rivestimenti di gallerie possono avere una duplice funzione:

- il ripristino ed il miglioramento delle condizioni di servizio;
- il ripristino di un idoneo comportamento strutturale del rivestimento e delle condizioni globali di stabilità della struttura.

Per la galleria S. Pedrino i problemi alla base dell'intervento sono stati:

- la necessità di aumentare l'altezza della sezione, per consentire il transito di convogli con carrozze viaggiatori a due piani;
- l'esigenza di rendere staticamente sicuro il rivestimento;
- la necessità di ridurre i fenomeni di filtrazione e percolazione delle acque, e di sottoporre quindi a regime il flusso idraulico intorno alla galleria.

La galleria S. Pedrino (Fig. 1) si sviluppa per una lunghezza di 235 m circa, con coperture molto modeste sui portali (lato Varese e lato Laveno) e crescenti sino ad un massimo di 25 m nella tratta centrale. La sezione della galleria (25 m² circa), a binario unico, era a forma di cavallo, priva di arco rovescio; nella zona del portale verso Varese la galleria è adiacente alle fondazioni di alcuni edifici di una certa altezza costruiti di recente.

Il rivestimento, già sottoposto ad interventi di rinforzo della originaria struttura in mattoni, come indicato in figura 2, era in una situazione statica sfavorevole. Diverse prove eseguite con il metodo del ripristino delle tensioni con martinetti piatti (Barla e Rossi, 1983) hanno messo in luce che il rivestimento (di spessore pari a 70 cm) risultava molto sollecitato: la tensione circonferenziale sui piedritti era prossima a 1.25 MPa (Fig. 1), indipendentemente dalla copertura. Il terreno morenico, a matrice prevalentemente limosa, era molto decompresso, e per gran parte della galleria gravante in modo pressoché totale sul rivestimento.

Le indagini preliminari hanno messo in luce che la situazione del rivestimento era particolarmente precaria nei primi 120 m a partire dal portale lato Varese. In questa zona, ed in prossimità del portale lato Laveno, erano presenti stillicidi d'acqua, abbondanti e diffusi, testimoniati anche da spesse concrezioni calcaree depositate all'intradosso del rivestimento.

ta verso la verifica continua, in sede esecutiva, dei risultati conseguiti con gli interventi. La possibilità di seguire un metodo «costruttivo» di questo tipo è strettamente legata alla presenza di due fattori:

- una decisa disponibilità da parte delle diverse componenti interessate (Impresa, Direzione Lavori, Progettisti), a progressivi cambiamenti ed a eventuali correzioni;
- un attento e continuo esame dei risultati ottenuti, che comporta la presenza di un sistema di controllo che nelle fasi precedente, contemporanea e successiva all'esecuzione degli interventi sia studiato, installato ed utilizzato.

3. TIPOLOGIA DELL'INTERVENTO

Il problema è stato affrontato nel modo seguente:

a) *Per i primi 120 m (lato Varese)* si è provveduto alla costituzione di un arco di terreno consolidato, oltre l'estradosso della galleria; l'arco consolidato (Fig. 3), è stato realizzato mediante un sistema meccanico di micropali valvolati. Dalle valvole di un ritorno è stata iniettata miscela cementizia in pressione, in modo da penetrare il terreno secondo una serie di microfratture («claquages») molto ravvicinate. Grazie alle numerosissime placche di cemento che si integrano tra di loro, e formano una vera e propria maglia che ingloba il terreno raddensato, si ottiene nell'arco una notevole ricompressione ed un sensibile aumento di resistenza e di rigidità.

La ricompressione ottenuta con le iniezioni provoca un incremento di volume nell'arco, che diviene nel tempo in grado di portare su di sé parte dei carichi prima gravanti sul solo rivestimento.

Il consolidamento del terreno si traduce così in un beneficio, ottenuto a prezzo di deformazioni, per il rivestimento della galleria. I micropali valvolati sono stati disposti in 59

raggere di 12 tubi ciascuna; l'interasse delle raggere, disposte a quinconce, è stato fissato in 2 m.

Il problema più difficile, nell'esecuzione dell'arco di ricompressione, è stato la necessità di iniettare il terreno ad una pressione sufficiente alla sua idrofratturazione, per penetrarlo con le miscele cementizie, ma non tale da provocare dissesti nel rivestimento, degradato, in mattoni. Ulteriori dettagli concernenti le tecnologie impiegate sono reperibili altrove (Balossi, Barla e Jarre, 1986).

- b) *Per i restanti 115 m (lato Laveno)* è stato assicurato il rivestimento al terreno mediante una serie di coppie di micropali (Fig. 4) intestati nei piedritti. Questo intervento si è reso necessario anche in ragione dell'esigenza di consentire il transito di carrozze a due piani; questo ha comportato lo scavo del piede della galleria per una profondità di circa 1.0 m, secondo quanto indicato nel seguito. I micropali subverticali contribuiscono a riportare i carichi nel terreno, al di sotto del piano di fondazione; i micropali orizzontali limitano le deformazioni di convergenza al piede della sezione della galleria.
- c) *Per l'intera lunghezza della galleria*, si è provveduto alla sottofondazione dei piedritti con murette, scavate a campioni, in c.a. 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. con blocchetti prefabbricati annegati in resine poliuretatiche.
- d) È stato quindi eseguito un intasamento a tergo del rivestimento (Fig. 4) con iniezioni di miscele cementizie attraverso appositi fori, in passate successive.
- e) Si è infine provveduto alla regolazione del flusso delle acque, mediante drenaggi (Fig. 3) e canalette di raccolta. Nella tratta con arco di ricompressione, i dreni sono stati prolungati oltre l'arco stesso per circa 3.0 m.

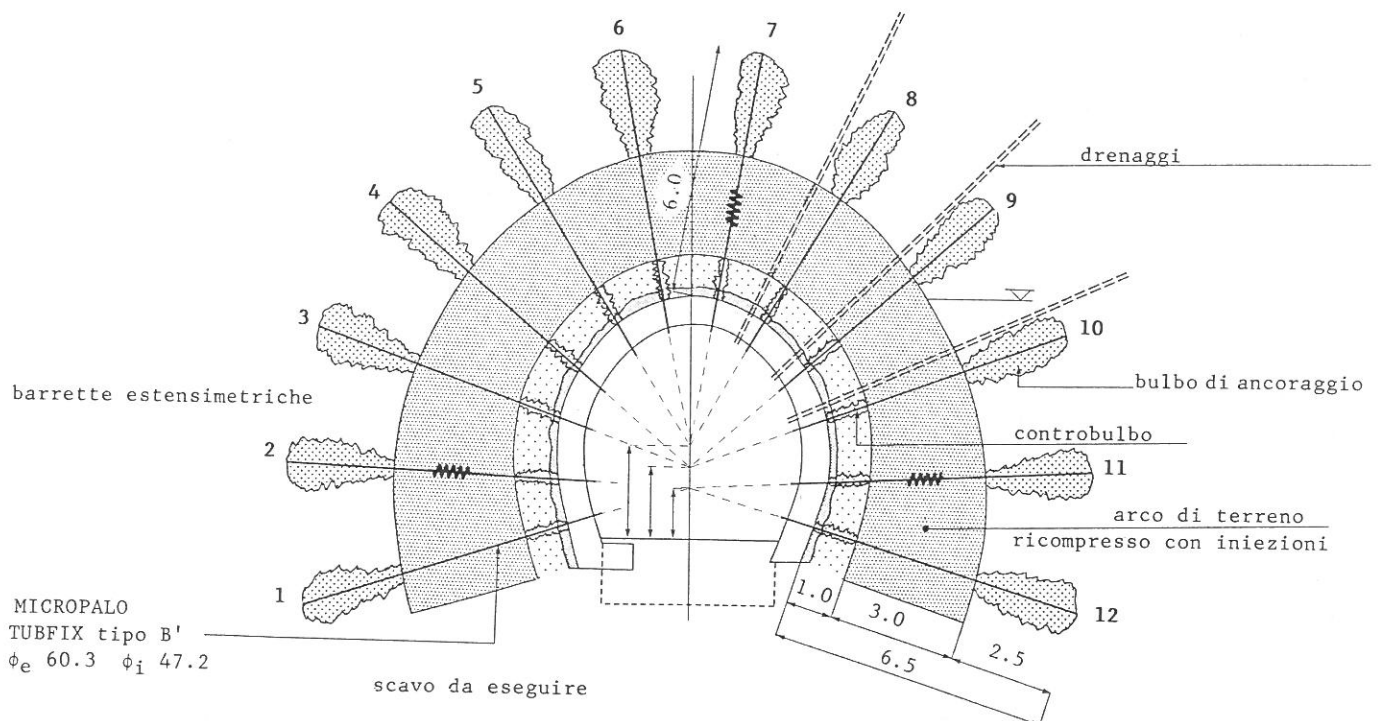


Fig. 3

Arco di ricompressione del terreno. Interasse raggere: 2 m. Intervento eseguito per 120 m, tra il portale lato Varese e la sezione C5. I micropali 2, 7 e 11 della raggere n. 44 sono stati strumentati con barrette estensimetriche. Sezione vista verso Laveno.

Arc de recompression du terrain. Entraxe des rayons: 2 m. Intervention sur 120 m entre le portail côté Varese et la section C5. Les micro-poteaux 2, 7 et 11 du rayon n. 44 ont été équipés de barrettes extensimétriques. Section vue vers Laveno.

Arc of earth recompression. The distance between centres of the dial: 2 m. Operation carried out for 120 m between the Varese-side gate and section C5. Microposts 2,7 and 11 of dial 44 have been fitted with extensometric bars. Section seen towards Laveno.

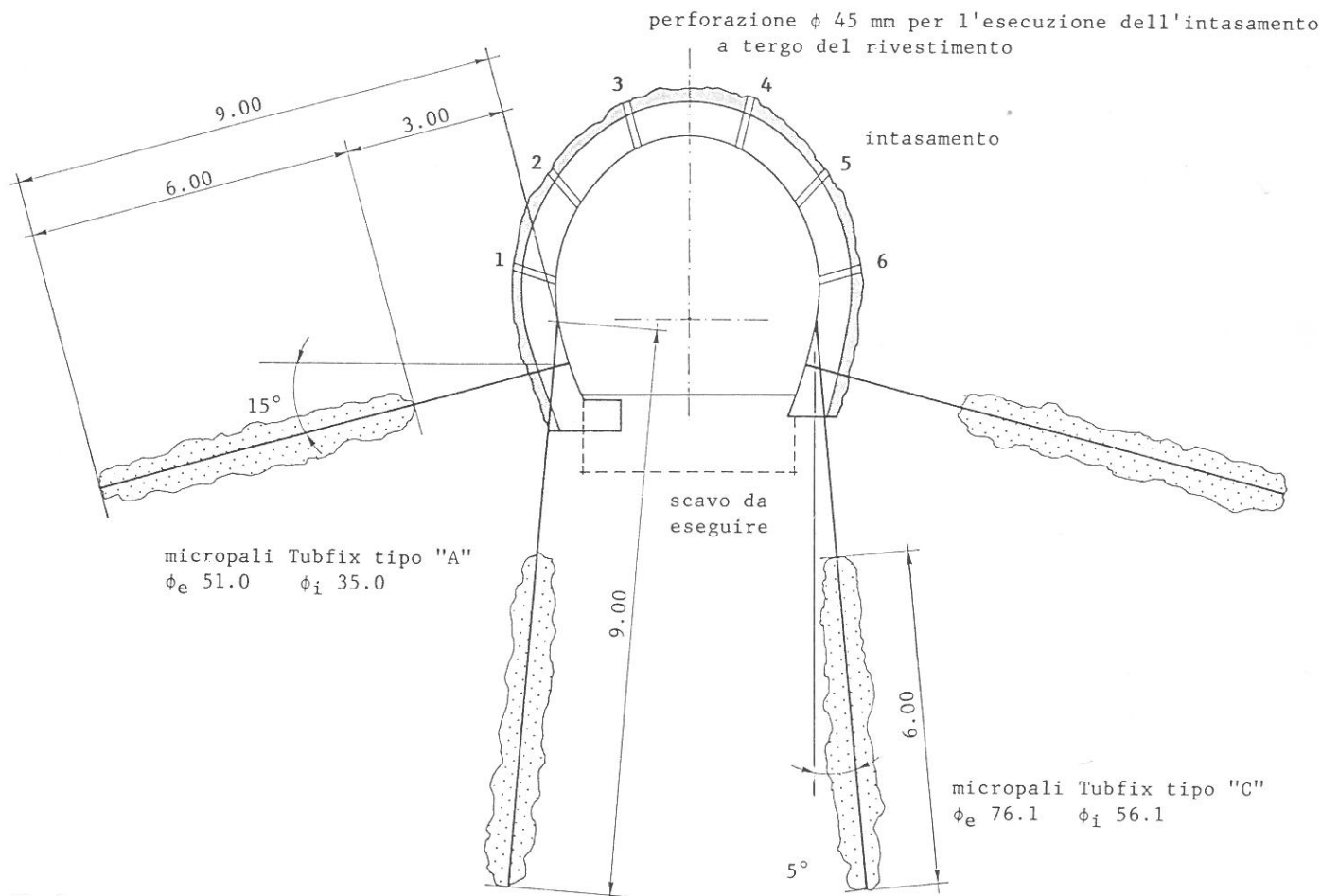


Fig. 4
Ancoraggio del rivestimento al terreno. Interasse: 1.5 m. Intervento eseguito per 115 m, tra il portale Laveno e la sezione C5.
Ancrage du revêtement au terrain. Entraxe: 1,5 m. Intervention sur 15 mètres entre le portail Laveno et la section C5.
Anchorage of the earth lining. Distance between centres 1.5 m. Operation carried out for 115 m between the Laveno gate and section C5.

4. FASI DI INTERVENTO

L'intervento si è svolto, schematicamente, secondo le seguenti fasi:

- entro il 15 giugno 1984: preparazione del progetto, conclusione delle ultime indagini, messa in opera del sistema di controllo e misura.
- 15 giugno - 15 luglio: interruzione del transito; eliminazione del ballast e getto di un fondo di magrone. Esecuzione delle perforazioni per le prime raggere verso il portale lato Varese.
- 15 luglio - 30 agosto: costituzione dell'arco di ricomprensione, in due passate successive di iniezioni, nei primi 120 m. Esecuzione di 8 raggere addizionali nei pressi del portale lato Varese; messa in opera dei micropali sul lato Laveno.
- 30 agosto - 15 ottobre : scavo delle murette di sottofondazione dei piedritti, rimozione del magrone, getto della platea di base sostitutiva del ballast, posà dei binari. Riapertura del transito.
- 15 ottobre - 15 novembre: esecuzione dei drenaggi e delle iniezioni di intasamento, a transito interrotto, nelle ore notturne.
- settembre - dicembre 1985: esecuzione di misure di controllo degli effetti nel lungo termine.

5. SISTEMA DI CONTROLLO

Il sistema di controllo ha avuto lo scopo di verificare l'innesco e lo sviluppo di deformazioni e di variazioni dello stato di sollecitazione nel rivestimento. I risultati ottenuti sono inoltre serviti a convalidare, a posteriori, le assunzioni fatte con il dimensionamento, mediante modello matematico (Barla e Jarre, 1986), dell'intervento.

Oggetto di controllo sono stati i seguenti elementi:

- il livello della falda è stato costantemente rilevato mediante tre piezometri a pelo libero, in appositi fori di sondaggio. Le pressioni neutre nel terreno intorno al rivestimento sono state invece controllate in tre fori, attrezzati con celle piezometriche tipo Casagrande, eseguiti dall'interno della galleria.
- Le deformazioni del rivestimento sono state misurate mediante 10 sezioni di convergenza (C1 - C10, Fig. 2), equipaggiate con 5 chiodi ciascuna, secondo lo schema della Fig. 5. Le misure sono state effettuate con un distometro a nastro, quasi quotidianamente. Secondo la posizione delle lavorazioni più impegnative, sono stati installati e spostati a più riprese due misuratori di convergenza potenziometrici, collegati a registratori continui.
- La sollecitazione circonferenziale nel rivestimento è stata controllata collegando ad un manometro 4 martinetti piatti installati (Fig. 5) nei pressi dei portali (Sezioni MP1 e MP4, Fig. 2).
- Lo sforzo di trazione indotto nei micropali dalle iniezioni e dagli scavi al piede è stato misurato mediante barrette estensimetriche installate (Fig. 3) su tre micropali della raggere 44 (Fig. 2).

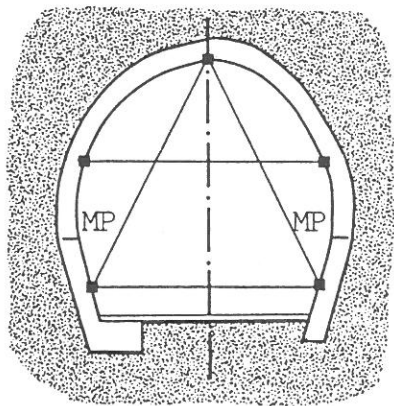


Fig. 5
Sezione equipaggiata con chiodi per le misure di convergenza, e con martinetti piatti (MP) per il controllo della tensione circonferenziale nel rivestimento.

Section équipée de clous pour les mesures de convergence et de vérins plats (MP) pour le contrôle de la tension circonférentielle dans le revêtement.

Section equipped with nails to measure the convergence and flat jacks (MP) to check the circumferential tension of the lining.

6. RISULTATI DELLE MISURE

In quanto segue, vengono illustrati i principali risultati emersi dai rilievi, con particolare riguardo alle misure di convergenza ed al controllo dello sforzo di trazione indotto nei micropali dell'arco consolidato.

6.1 MISURE DI CONVERGENZA

Le misure eseguite con il distometro a nastro hanno messo in luce, già nella prima fase dell'intervento, che nei pressi del portale lato Varese la situazione era molto precaria. Nelle Figg. 6 e 7 sono riportati i valori medi misurati alle sezioni C1 e C2, che si sono rivelate come le più critiche.

Dalla Fig. 6 si può osservare che la sola rimozione del ballast ha provocato una chiusura della sezione C1 (media corde orizzontali) pari a 0.75 cm: non essendoci arco rovescio, è stato sufficiente togliere al rivestimento il modesto contrasto offerto dal sottofondo al piede per provocare un deciso movimento dei piedritti. L'entità dello spostamento non è stata modesta in rapporto alla larghezza della galleria, di poco superiore ai 4.00 m, ove si tenga anche conto del degrado dello stesso rivestimento.

In questa fase i martinetti piatti della sezione MP1 hanno registrato una diminuzione della tensione circonferenziale da 1.2 MPa a 0.8 MPa, ed un successivo recupero, dopo il getto del magrone, a 1.0 MPa.

A fine luglio sono state eseguite le iniezioni delle raggere vicine alla sezione C1; per cercare di contenere i tempi, le iniezioni sono state effettuate in un'unica passata. La risposta del rivestimento è stata immediata e critica: dalla Fig. 6 si nota una chiusura pari a 3.00 cm. Sulla sezione erano montati, al momento, i deformometri potenziometrici: i registratori hanno indicato che la chiusura si è verificata in modo estremamente brusco. Il rivestimento ha reagito improvvisamente, senza preavviso. Nei pressi di una nicchia sono comparse preoccupanti fessure.

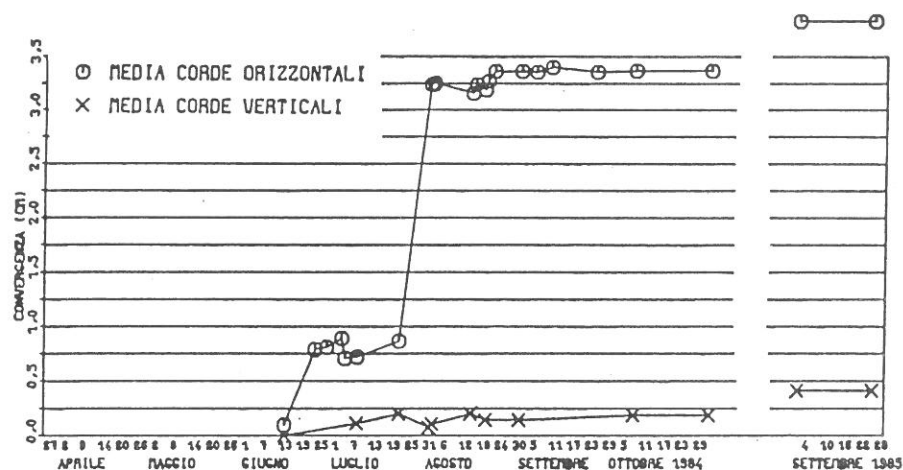


Fig. 6
Sezione C1 - Misure di convergenza: la chiusura della sezione è in gran parte dovuta agli effetti delle iniezioni eseguite a fine luglio.

Section C1 - Mesures de convergence: la fermeture de la section est due en grande partie aux effets des injections faites fin juillet.

Section C1 - Convergence measurement: the closure of the section is largely due to the effects of the injections made at the end of July.

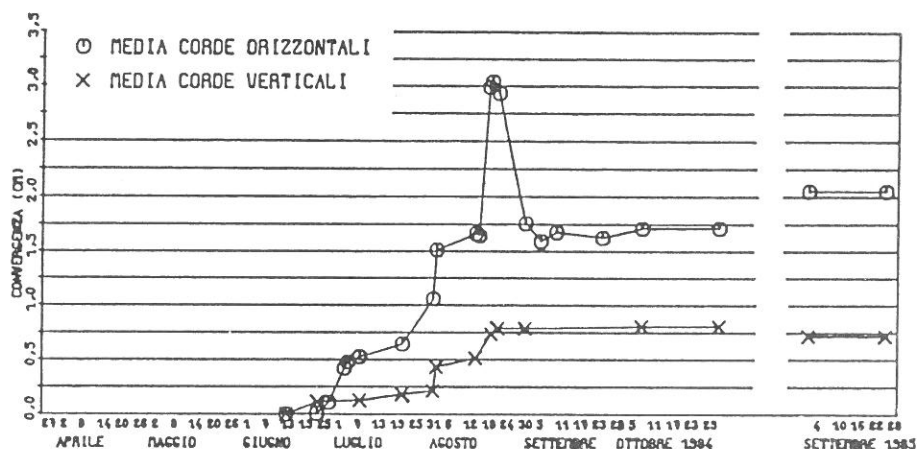


Fig. 7
Sezione C2 - Misure di convergenza: si osservano i diversi effetti della prima passata di iniezione (1 agosto) e della seconda passata (24 agosto). Il recupero della chiusura della sezione è attribuito all'efficacia della raggiera di micropali.

Section C2 - Mesures de convergence: on voit les différents effets de la première passe d'injection (1er août) et de la seconde passe (24 août). La récupération de la fermeture de la section est attribuée à l'efficacité du rayon des micropoteaux.

Section C2 - Convergence measurement: the different effects of the first injection (August 1) and the second (August 24) can be seen. The recovery of the closure is due to the effectiveness of the micropost dial.

- Fase n. 1
- × Fase n. 2
- ◇ Fase n. 3
- ⊗ Totale

Fig. 8

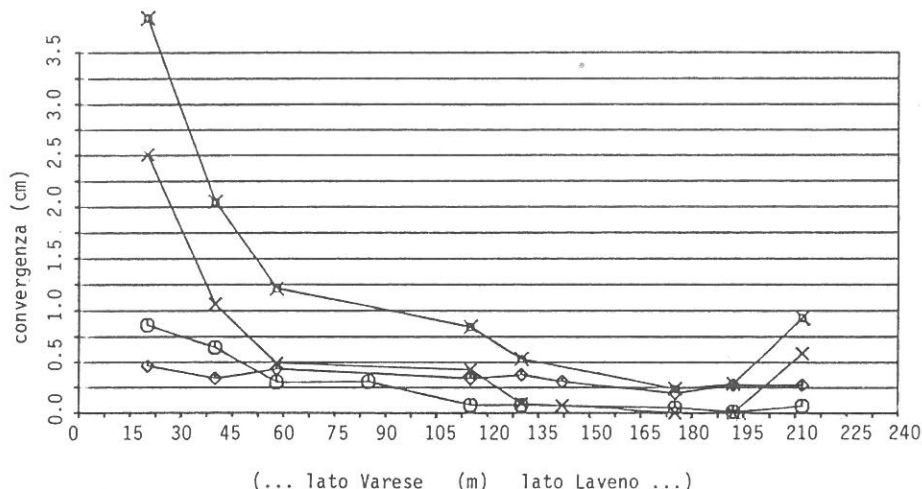
Misure di convergenza: valori medi delle corde orizzontali rispetto alla progressiva longitudinale della galleria.

Fase 1: 27/3/84 - 27/7/84 rimozione ballast e getto magrone

Fase 2: 27/7/84 - 9/10/84 iniezioni di consolidamento e/o scavi al piede

Fase 3: 9/10/84 - 3/9/85 iniezioni di intasamento ed effetti di lungo termine.

I valori massimi totali si sono registrati nei pressi dei portali, i minimi nella tratta meno dissestata, verso Laveno.



Mesures de convergence: valeurs moyennes des cordons horizontaux par rapport à la longitudinale progressive du tunnel Phase 1: 27/3/1984-27/7/1984 - Enlèvement du balaste et coulée du mortier maigre.

Phase 2: 27/7/1984-9/10/84 - Injections de consolidation et/ou excavations au pied.

Phase 3: 9/10/1984-3/9/1985 - Injections de colmatage et effets à long terme.

Les valeurs maxi totales ont été enregistrées dans les alentours des portails, les minima dans la portion la moins endommagée, vers Laveno.

Convergence measurement: average values of the horizontal cables with respect to the longitudinal progressive of the tunnel.

Phase 1: 27/3/1984-27/7/1984 ballast removal and concrete casting.

Phase 2: 27/7/1984-9/10/1984 reinforcement injections and/or workings at the foot.

Phase 3: 9/10/84-3/9/85 tamping injections and long term effects.

The total maximum values were recorded around the gates. The minimum in the less irregular stretch towards Laveno.

In seguito a questi avvenimenti si sono adottate maggiori precauzioni nell'esecuzione delle iniezioni, che sono state quindi eseguite sempre in due passate successive, con quantitativi di miscela dimezzati e pressioni contenute. Il limite massimo di pressione, rilevata al manometro dell'iniettore, è stato fissato in 0.5 MPa. In questa zona si è quindi provveduto al rinforzo dell'arco con delle raggere intermedie, particolarmente orientate a sostenere i carichi e contenere il rivestimento nella zona di appoggio dei piedritti.

Queste precauzioni hanno fatto sì che le ulteriori convergenze registrate alla sezione C1 fossero minime. In Fig. 6 si nota come solo con l'intasamento si è verificata, a lunga scadenza, ancora una certa chiusura orizzontale (0,40 cm circa), accompagnata da un modesto abbassamento della sezione (0.20 cm circa).

La Fig. 7 (sezione C2) permette invece di apprezzare gli effetti distinti delle due passate di iniezione; dopo le prime deformazioni, dovute alla rimozione del ballast ed al getto del magrone, si ha una chiusura (1.00 cm) ed un abbassamento (0.25 cm) a causa della prima passata di iniezione, eseguita ai primi di agosto. La seconda passata (24 agosto) ha provocato una chiusura (1.50 cm) solo temporanea, poiché recuperata anche grazie al contenimento fornito dai micropali della raggere, ed un irreversibile abbassamento (0.25 cm).

Nella figura 8 sono riportati i valori delle chiusure orizzontali rilevate lungo la galleria: in accordo alle ipotesi progettuali, le convergenze massime si sono avute presso i portali, le minime nella parte centrale e verso Laveno, con le massime coperture e le minime percolazioni di acqua. Dalla figura 8 si nota inoltre che nel lungo termine (Fase 3) gli effetti degli scavi al piede e dell'intasamento sono stati omogenei lungo la galleria: la convergenza media è stata di 0.34 cm. con uno scarto massimo di 0.13 cm.

In questo periodo si è inoltre registrato un abbassamento, crescente con la copertura, intorno 0.30 cm.

Nella tabella 1 sono riportate, in percentuale rispetto al valore totale, le chiusure registrate in ciascuna delle tre fasi prin-

cipali dei lavori. È interessante notare che nella tratta con arco di ricompressione (sezioni C1-C5) più della metà del cedimento totale è dovuta alla fase di consolidamento e scavo, mentre nella tratta successiva (C6-C9) gran parte delle chiusure sono imputabili ai lavori di preparazione e finitura dell'intervento. Sul portale lato Laveno (sezione C10) gli effetti dello scavo al piede sono stati percentualmente significativi nonostante la presenza dei micropali di ancoraggio.

Tabella 1

Sezione (°)	Progr. (m)	Convergenze medie orizzontali (valori percentuali rispetto al valore totale)		
		FASE 1 27/3/84 - 27/7/84 rimozione ballast e getto magrone	FASE 2 27/7/84 - 9/10/84 iniezioni di consolidamento e/o scavi al piede	FASE 3 9/10/84 - 3/9/85 iniezioni di intasamento ed effetti di lungo termine
C1	20	23	65	12
C2	40	31	52	17
C3	58	25	40	35
C5	115	9	51	40
C6	130	14	16	70
C8	175	20	4	76
C9	192	5	2	93
C10	212	7	63	30

(°) Per le sezioni C4 e C7 le misure non sono disponibili per l'intero periodo.

6.2 MISURE CON MARTINETTI PIATTI

I martinetti piatti sono stati letti quotidianamente. I risultati più interessanti, in termini di variazioni della pressione, sono raccolti nella Tabella 2.

Tabella 2

Valori della pressione (MPa) letta ai manometri dei martinetti piatti

MP1		MP4		Operazioni eseguite
sx	dx	sx	dx	
13.00	13.00	13.00	14.00	Valori iniziali
8.00	11.00	12.00	12.00	Rimozione ballast lungo l'intera galleria
10.00	13.00	12.50	14.00	Getto magrone
10.00	13.00	10.00	9.00	Esecuzione scavo murette nella tratta adiacente al martinetto MP4
7.00	9.00	10.00	9.00	Esecuzione arco di ricompressione nella tratta adiacente al martinetto MP1
9.00	12.00	10.00	9.00	Dopo due settimane dall'esecuzione arco di ricompressione
9.00	12.00	8.00	7.00	Intasamento tratta martinetto MP4
9.00	12.00	8.00	7.00	Valori finali

Ogni operazione ha comportato dapprima uno scarico, poi un parziale recupero.

6.3 MISURE DELLO SFORZO DI TRAZIONE NEI MICROPALI

Su tre micropali della raggera 44 sono state saldate, al centro dell'arco di ricompressione (Fig. 3), della barrette estensimetriche con cui si è misurato lo sforzo di trazione indotto, dalle iniezioni nel terreno, sui micropali stessi. L'effetto delle

iniezioni, secondo quanto previsto, è stato duplice:

- hanno indotto nel terreno una certa ricompressione;
- hanno posto di conseguenza in trazione i micropali.

Scopo delle misure è stata proprio la verifica del funzionamento dell'arco, mediante la misura, indiretta, della trazione indotta nei micropali. Su ognuno di questi sono state saldate tra barrette, a 120° l'una dall'altra (Fig. 9). Le barrette, protette da una struttura di acciaio che le ha preservate da danneggiamenti durante l'inserimento nel foro, hanno indicato i valori di deformazione conseguenti alle diverse lavorazioni. L'ordine delle operazioni relative alle quattro raggere a monte ed a valle della raggera 44 è stato prestabilito, e controllato, in modo che gradatamente la raggera strumentata fosse interessata dalle miscele di iniezione. In accordo alle previsioni, il valore della trazione ha raggiunto dapprima valori prossimi al picco, quando le iniezioni sono state effettuate proprio attraverso le valvole vicine alle barrette, quindi si è portato verso valori inferiori, e sostanzialmente costanti.

La pressione al manometro è stata limitata a 0.5 MPa, si può ipotizzare che, date le perdite di carico, nel terreno la pressione non abbia superato 0.2 -0.3 MPa.

Con riferimento alla lettura iniziale, eseguita a micropalo inserito e completo di bulbo di ancoraggio e controbulbo, dalle deformazioni misurate si sono ottenuti i valori della trazione di ogni micropalo.

I risultati sono riportati nella figura 10, dove sono indicate le operazioni eseguite. Si può osservare che:

- L'esecuzione della prima passata induce una consistente crescita dei valori di trazione (fino a 70 kN) sui micropali n. 2 e n. 11 (ai piedritti), mentre il micropalo n. 7 (in calotta) non esibisce effetti apprezzabili.
- Nel periodo tra la prima e la seconda passata di iniezione

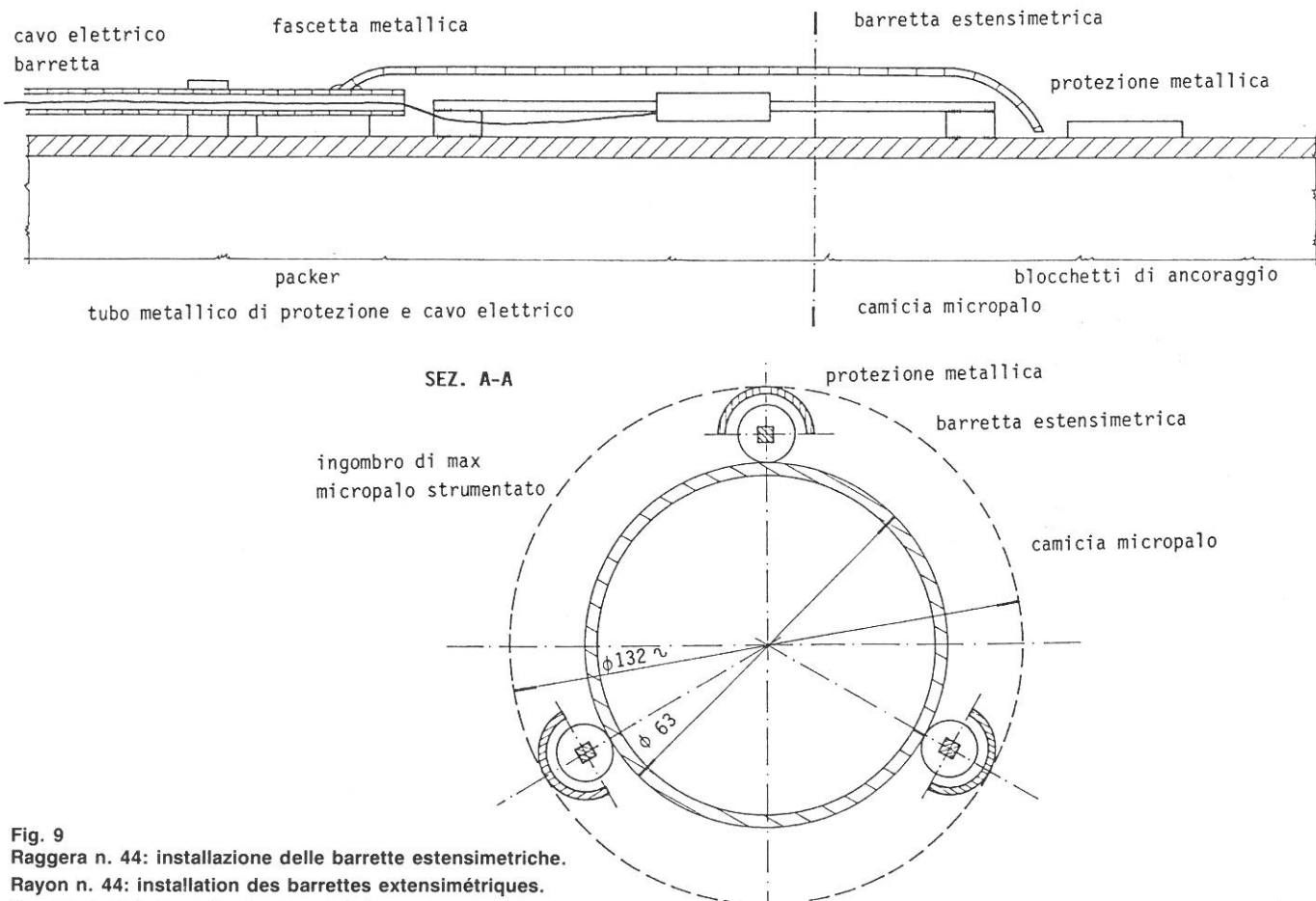


Fig. 9
Raggera n. 44: installazione delle barrette estensimetriche.
Rayon n. 44: installation des barrettes extensimétriques.
Dial 44: Installation of extensometric bars.

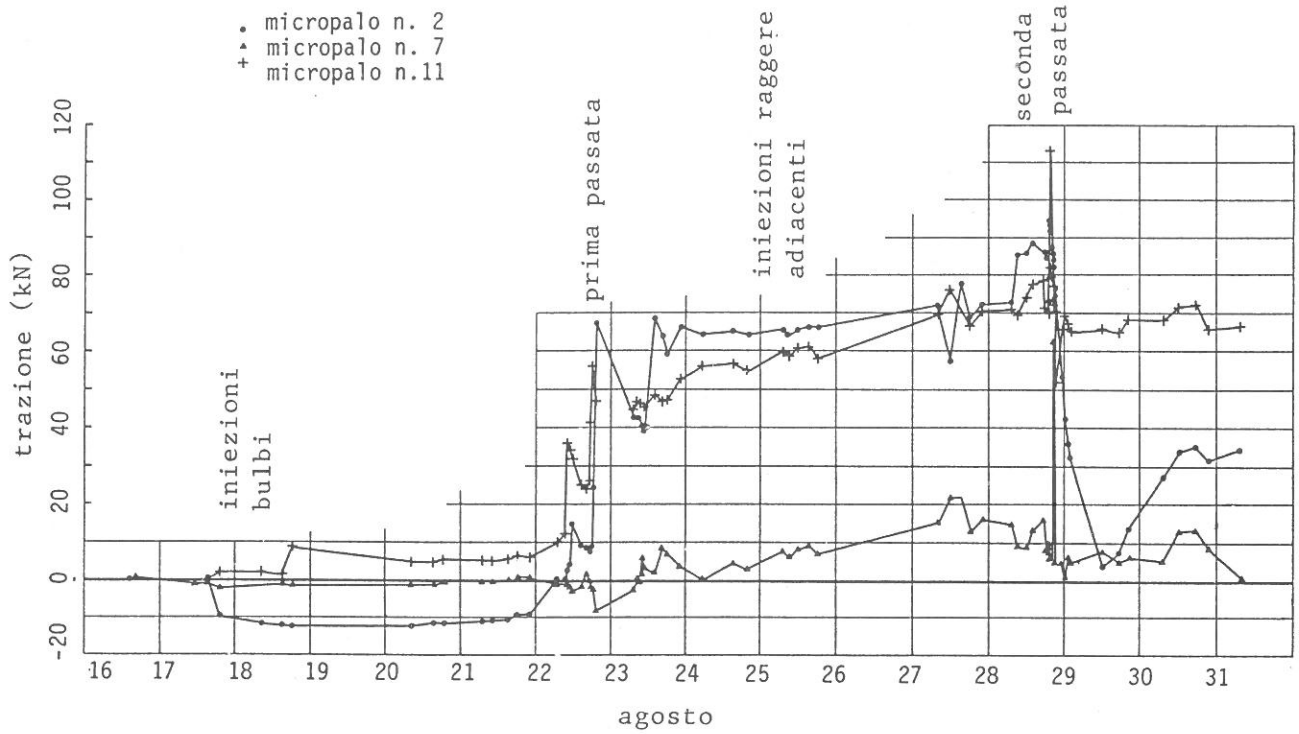


Fig. 10
 Raggera n. 44: valori della trazione indotta nei micropali delle iniezioni nell'arco di ricompressione del terreno.
 Rayon n. 44: valeurs de la traction produite dans les micropoteaux des injections dans l'arc de recompression du terrain.
 Dial 44: Values of traction induced in the microposts of the injections in the arc of earth re-compression.

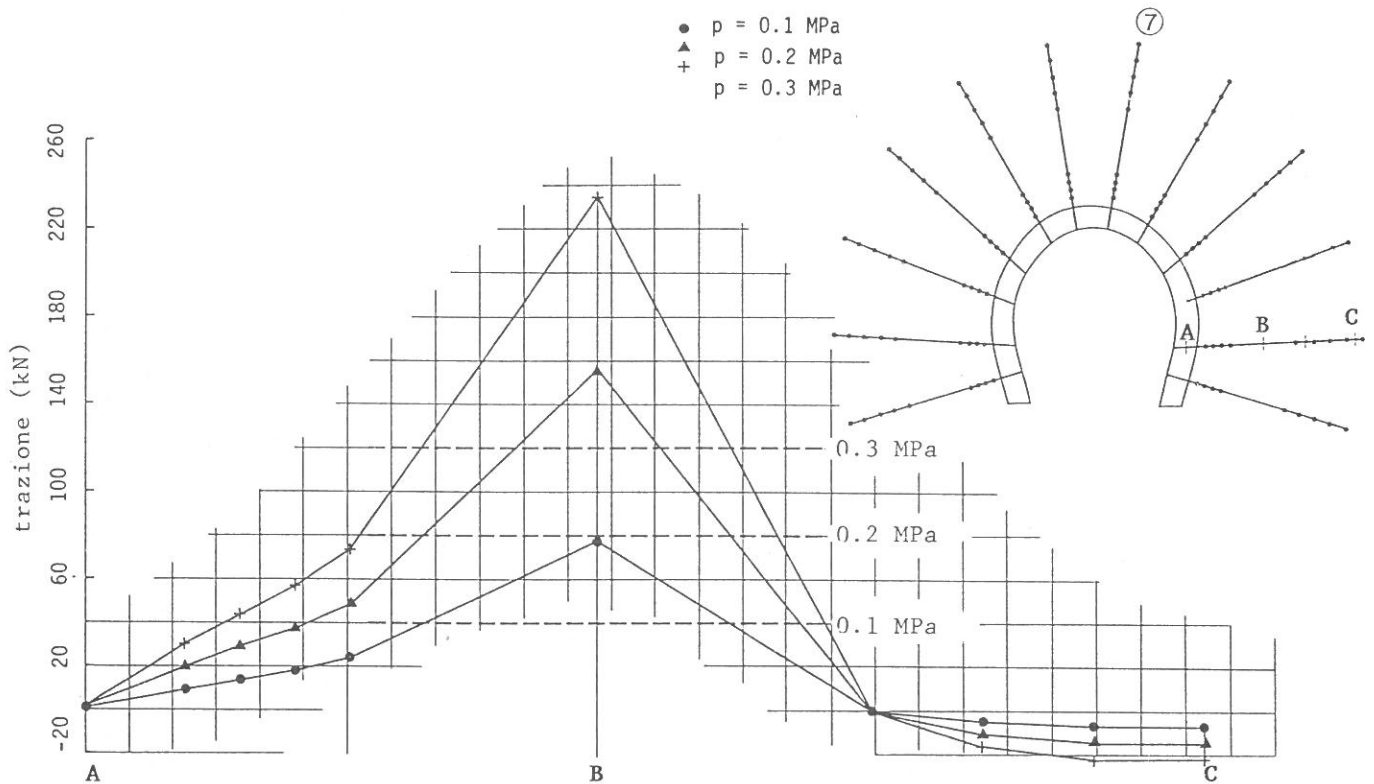


Fig. 11
 Modello matematico per la verifica del progetto di intervento. Distribuzione dello sforzo di trazione lungo il micropalo 7. In linea discontinua sono indicati i valori medi calcolati nel tratto dell'arco di ricompressione: 120 kN ($p=0.3$ MPa), 80 kN ($p=0.2$ MPa), 40 kN ($p=0.1$ MPa).
 Modèle mathématique de vérification du projet d'intervention. Distribution de l'effort de traction le long du micro-poteau 7. La ligne hachurée indique les valeurs moyennes calculées dans la portion de l'arc de recompression: 120 kN ($p=0.3$ MPa), 80 kN ($p=0.2$ MPa), 40 kN ($p=0.1$ MPa).
 Mathematical model to check the design of the operation. Distribution of the traction strain along micropost 7. The average values calculated in the arc of re-compression: 120 kN ($p=0.3$ MPa), 80 kN ($p=0.2$ MPa), 40 kN ($p=0.1$ MPa) are shown by the broken line.

si ha un'ulteriore incremento della trazione, a causa dell'influenza delle iniezioni sulle raggeri adiacenti, ed alla progressiva unione delle microfrazture nel terreno. Questa interazione diviene consistente a partire dall'inizio della seconda passata (27 Agosto) nella tratta in esame.

- In seconda passata si raggiungono i valori di picco, quando viene iniettato il micropalo strumentato: 100 kN, nel micropalo n. 2, 60 kN nel n. 7, 110 kN nel n. 11. La trazione decresce quindi bruscamente, verso valori costanti che rispecchiano più verosimilmente gli effetti delle pressioni residue nell'arco di ricompressione: 30 kN nel n. 2, 10 kN nel n. 7, 60 kN nel n. 11.

Si può quindi concludere osservando che:

- il dimensionamento dei micropali, verificato con un modello matematico, ha fornito un corretto margine di sicurezza: nella figura 11 sono indicati i valori, calcolati con un modello ad elementi finiti (Barla e Jarre, 1986), della trazione nei micropali. Il valore medio della trazione del micropalo, nella tratta dell'arco di ricompressione, risulta proporzionale alla pressione residua di ipotesi, e vale 80 kN per una pressione di 0.2 MPa, e 120 kN per una pressione di 0.3 MPa. Questi valori si accordano bene con quelli sperimentalmente rilevati.
- Sulla raggera strumentata è stata accertata la presenza dell'arco di ricompressione, che agisce nel terreno a più di un anno dal termine delle iniezioni. La pressione residua non si è annullata, e permane a conferire un buon grado di ricompressione.
- I modesti valori di trazione registrati sul micropalo di calotta sono da attribuire, con ogni probabilità, alla maggiore decompressione iniziale di questa zona; la situazione avrebbe, tempi permettendo, richiesto un'ulteriore passata di iniezioni.
- La raggera ha subito gli effetti degli scavi di sottomurazione e di abbassamento del piano di appoggio dei binari, nonché gli effetti dell'intasamento a tergo del rivestimento. Sul lato di monte, dove lo scavo al piede è stato approfondito per la costruzione della canaletta di scolo delle acque, si è registrato un notevole incremento dello sforzo di trazione (micropalo n. 11). Il micropalo di calotta (n. 7) ha analogamente raddoppiato il suo valore di trazione, anche in accordo con gli abbassamenti registrati con le misure di convergenza.

CONCLUSIONI

L'intervento per il consolidamento ed il ripristino di soddisfacenti condizioni statiche del rivestimento della galleria S. Pedrino è stato eseguito, sulla base di approfondite indagini preliminari, in condizioni strettamente controllate.

L'ottica di progettazione, orientata a cogliere gli aspetti emergenti dai controlli e dalle misure, ha consentito di svolgere i lavori in tempi ridotti e rispettando al contempo gli obiettivi del lavoro. In tal senso, le misure sono servite ad affinare il progetto iniziale, procedere con la voluta speditezza ma anche in provate condizioni di sicurezza.

In accordo con le previsioni di progetto, le iniezioni di miscele cementizie attraverso i micropali valvolati hanno ricompreso il terreno circostante la galleria. L'arco consolidato ha contribuito a scaricare parzialmente il rivestimento in mattoni, che risulta meno sollecitato e saldamente unito al terreno.

Il comportamento dell'arco di ricompressione è stato studiato con la misura indiretta della trazione indotta nei micropali. Lo sforzo di trazione ha raggiunto valori di picco nel corso delle iniezioni sui micropali, quindi si è portato a valori costanti, corrispondenti alle previsioni teoriche che assegnavano alla pressione di ricompressione valori intorno agli 0.2 MPa.

Gli scavi di sottofondazione e di abbassamento del piano di appoggio dei binari hanno, unitamente con l'intasamento, provocato un consistente incremento dei valori di trazione nei micropali. Il valore finale registrato è ben all'interno dei valori ammissibili per i micropali scelti per l'intervento.

L'esperienza acquisita permette infine di osservare che, in interventi analoghi, risultano fondamentali tre fattori:

- esecuzione di approfondite indagini preliminari;
- esecuzione di misure di controllo;
- rispetto dei tempi necessari al consolidamento dei terreni.



BIBLIOGRAFIA

BARLA G. e ROSSI P.P. - "Stress Measurements in Tunnel Linings", Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zurich 1983.

BALOSI RESTELLI A., BARLA G. e JARRE P. - "Miglioramento delle condizioni di servizio e di sicurezza di una galleria ferroviaria con rivestimento in muratura", Int. Congr. sulle Grandi Opere Sotterranee, Firenze 1986.

BARLA G. e JARRE P. - "Numerical Predictions and Real Behavior of a Reinforcement System for a Tunnel in North Italy", Second Int. Conf. on Numerical Models in Geomechanics, Ghent 1986.

RINGRAZIAMENTI: Alle FERROVIE NORD MILANO, ed in particolare all'Ing. Stiriti, Vicedirettore Impianti Fissi, ed all'Ing. Ceriani, Direttore dei Lavori, all'Impresa 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 GEONALYSIS s.r.l., che ha altresì curato le analisi per il dimensionamento dell'intervento, vanno i più sentiti ringraziamenti degli Autori.