

P.P. Rossi

***Le indagini sperimentali e le misure in sito
nella realizzazione di gallerie***

(estratto dagli atti del convegno *Problemi tecnico-economici connessi allo scavo di gallerie*, Verona, 2 ottobre 1987)

ismes s.p.a.

viale Giulio Cesare, 29 - 24100 BERGAMO - tel. 035/358111 - telex 301249 - BG

Le indagini sperimentali e le misure in sito nella realizzazione di gallerie

P.P. Rossi*

1. Premessa

Il comportamento strutturale di una galleria è condizionato da diversi parametri che dipendono sia dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso entro il quale la galleria è scavata, sia dalle caratteristiche costruttive dell'opera:

A) Parametri relativi all'ammasso roccioso.

— caratteristiche geologiche, idrogeologiche e strutturali dell'ammasso roccioso;

— caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso;

— stato di sollecitazione naturale.

B) Parametri caratteristici dell'opera.

— forma e dimensioni dello scavo;

— metodi di scavo;

— opere di sostegno temporanee o permanenti.

Per operare corrette scelte progettuali in merito ai metodi di scavo e alle opere di sostegno, è indispensabile una approfondita conoscenza dei parametri caratteristici dell'ammasso roccioso.

Mentre fino a qualche decennio fa

la progettazione e l'esecuzione di gallerie erano basate unicamente sull'esperienza personale, oggi sono disponibili nuove metodologie di indagine in sito e nuove tecniche di misura che consentono una valutazione meno soggettiva dei principali parametri necessari per la progettazione e la realizzazione dell'opera.

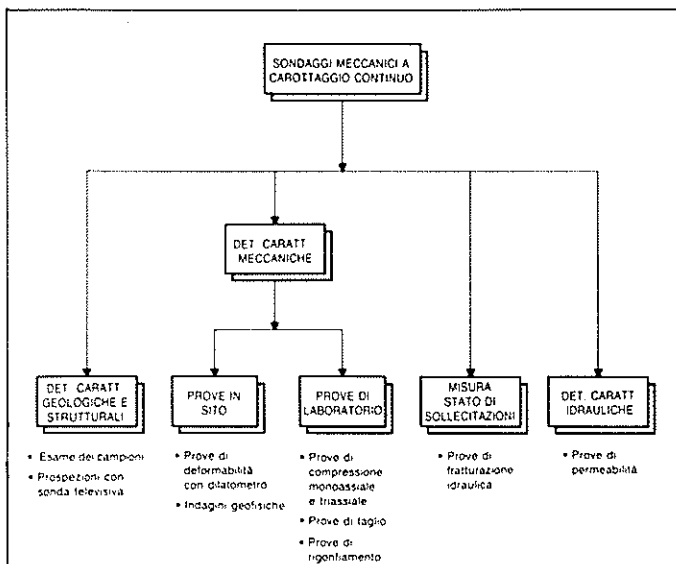
2. Indagini sperimentali per la determinazione dei parametri di progettazione

Un dettagliato studio delle caratteristiche geologiche dell'ammasso roccioso interessato dallo scavo costituisce premessa indispensabile per potere dare l'avvio alla fase di progettazione di una galleria. È necessario eseguire un rilievo geologico e strutturale di dettaglio allo scopo di evidenziare tutti i litotipi interessati dallo scavo e i principali sistemi di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso. Particolare attenzione deve essere rivolta in questa fase allo studio delle caratteristiche idrogeologiche perché l'eventuale presenza di acqua rappresenta uno dei problemi di primaria importanza per lo scavo di gallerie.

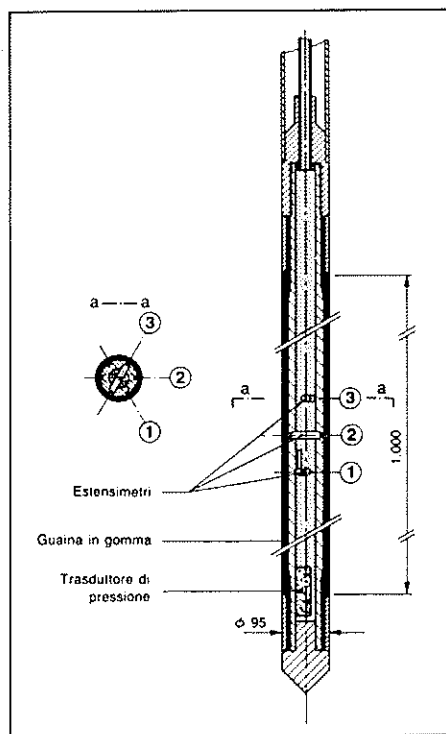
Molto spesso il solo rilievo di superficie, accompagnato dall'esame delle foto aeree, non è sufficiente a fornire uno schema geologico sufficientemente dettagliato. Solo l'esecuzione di sondaggi meccanici a carotaggio continuo, eseguiti dalla superficie del terreno, può consentire di acquisire le necessarie informazioni di carattere geologico e strutturale. Nell'eventualità che questi sondaggi fossero di difficile esecuzione prima dello scavo a causa di elevati spessori del terreno di copertura, è necessario far ricorso a fori pilota eseguiti in avanzamento durante lo scavo della galleria. Questi fori pilota possono essere facilmente eseguiti partendo da piccole camere laterali realizzate in modo da non causare intralcio alle operazioni di scavo. Con l'ausilio delle moderne tecniche di perforazione si possono realizzare, senza eccessivi problemi, fori orizzontali di lunghezza pari ad alcune centinaia di metri.

Anche le indagini geofisiche eseguite in superficie possono fornire preziose informazioni per la definizione dello schema geologico. L'aiuto fornito dalle tecniche geofisiche è particolarmente prezioso per la determinazione degli spessori del materiale alluvio-

* Responsabile Divisione Meccanica delle Rocce ISMES Bergamo

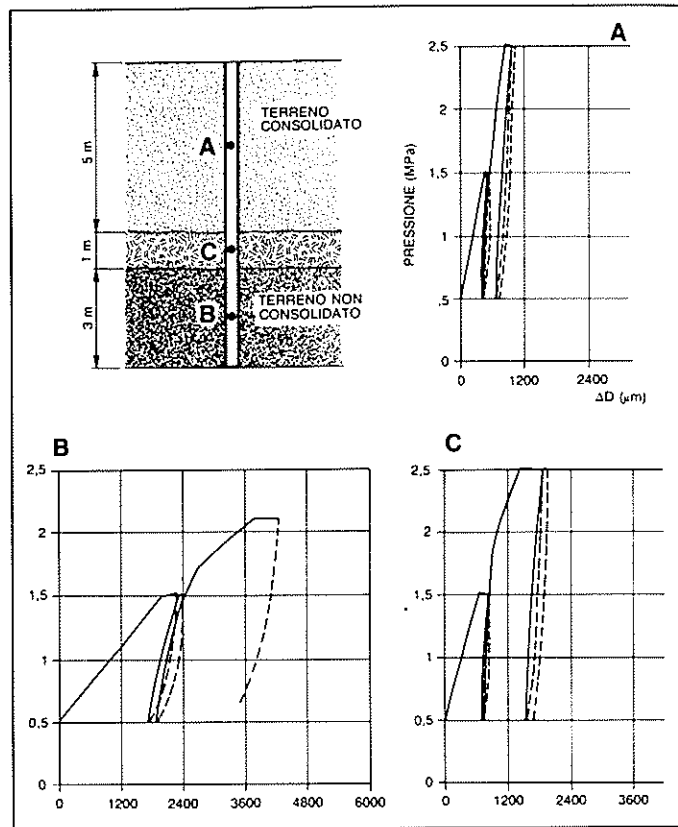


(sopra) Fig. 1



(a sinistra) Fig. 2

(a destra) Fig. 3



gi il maggior numero possibile di informazioni.

Nello schema di Fig. 1 sono schematicamente indicate le principali indagini che possono essere eseguite nei fori di sondaggio per la definizione dei parametri di progettazione.

2.1 Studio di dettaglio delle caratteristiche geologiche e strutturali

L'esame dei campioni estratti permette, come in precedenza osservato, di definire in dettaglio lo schema geologico dell'ammasso roccioso interessato dallo scavo della galleria. Per poter acquisire maggiori informazioni sulle caratteristiche strutturali dell'ammasso roccioso è consigliabile fare ricorso a prospezioni mediante sonda televisiva. Questa attrezzatura è provvista di obiettivi a visione frontale e laterale e rappresenta uno strumento di indagine molto efficace in grado di fornire le seguenti informazioni:

- determinazione della giacitura delle superfici di discontinuità (giunti) mediante l'ausilio di una bussola installata sulla testa della sonda televisiva (ciò consente di eseguire un rilievo strutturale di dettaglio su tutta la lunghezza del foro);

- determinazione dell'apertura dei giunti;
- eventuale presenza nei giunti aperti di materiale di riempimento (argilla, ecc.);
- esame di eventuali cavità presenti nell'ammasso roccioso e misura delle loro dimensioni;
- individuazione di tutti i punti di venuta d'acqua sia sopra che sotto falda.

L'esame dei campioni e le prospezioni con sonda televisiva permettono inoltre di effettuare una prima valutazione di massima delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso attraverso le definizioni degli «indici di qualità» (RQD, indice di fratturazione, indice di Point Load...).

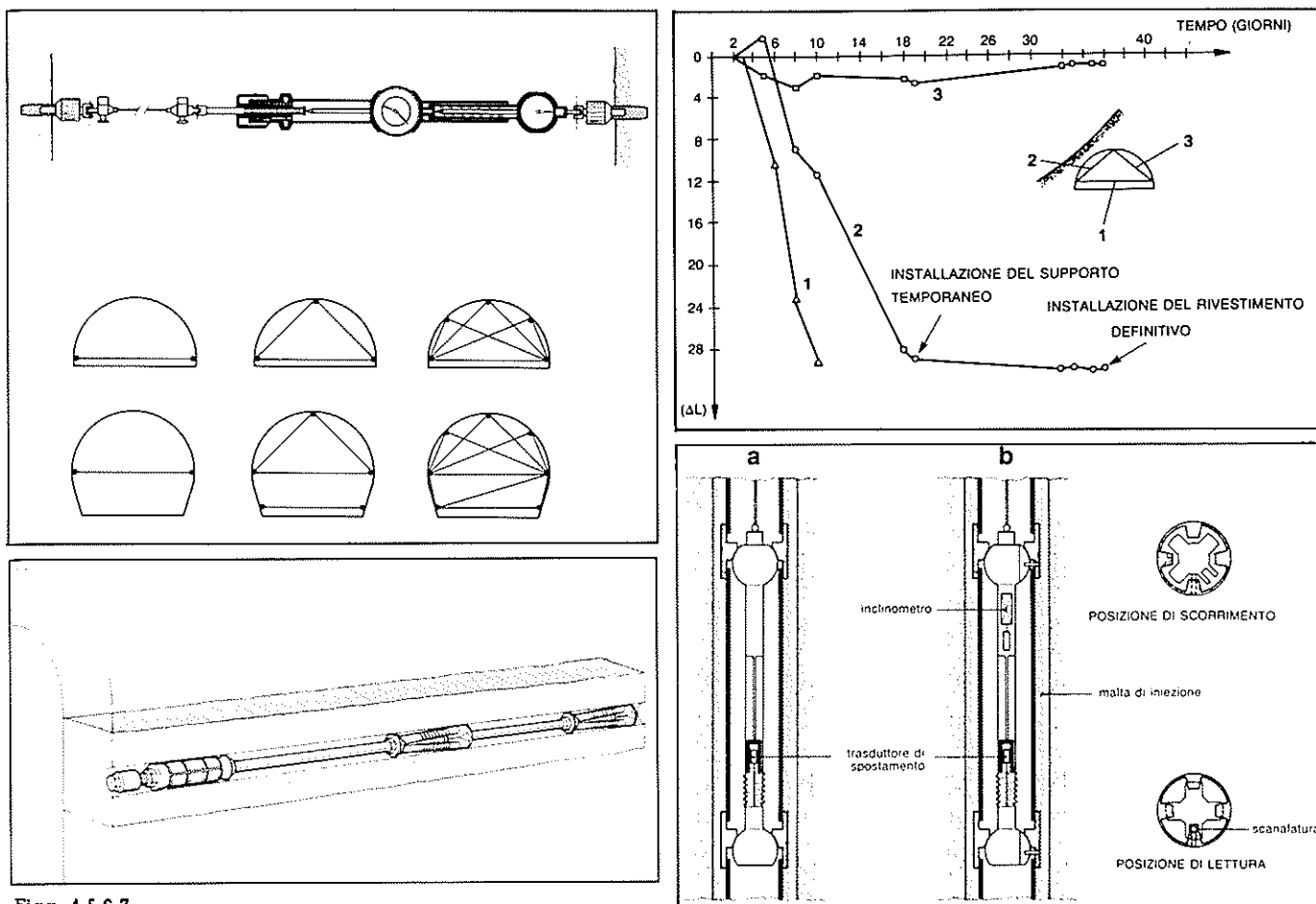
2.2 Determinazione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso

a) Prove in sito

La presenza di fori di sondaggio si presenta particolarmente utile per l'esecuzione di indagini in sito volte alla determinazione delle caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso. Viene utilizzata allo scopo una sonda dilatometrica (Fig. 2), la quale è in grado di applicare sulla superficie del foro una sollecitazione uniformemente

nale presente nelle valli che possono interessare il tracciato della galleria.

Dopo la definizione dello schema geologico è necessario procedere alla determinazione dei parametri fisici e meccanici necessari per la progettazione dello scavo. L'unico mezzo a disposizione per acquisire le informazioni necessarie per lo studio dei parametri di progetto è costituito dai sondaggi meccanici. Risulta quindi estremamente importante che i sondaggi vengano eseguiti a regola d'arte e che venga predisposto un programma di indagini che permetta di ricavare dai sondag-



Figg. 4-5-6-7

distribuita, fino ad un valore massimo pari a 20 MPa e di misurarne le deformazioni diametrali mediante speciali trasduttori installati nella sezione mediana della sonda dilatometrica. L'esame della curva carichi-deformazioni permette di valutare le caratteristiche di deformabilità dello strato di terreno in esame per diversi valori della sollecitazione applicata.

Il dilatometro illustrato in Fig. 2 si è dimostrato particolarmente idoneo a valutare l'efficacia dei trattamenti di consolidamento di terreni incoerenti nel caso di scavo di gallerie per linee metropolitane. Si riportano a titolo di esempio in Fig. 3 i risultati di prove dilatometriche eseguite sui terreni interessati dallo scavo della Linea 3 della Metropolitana Milanese. I diagrammi carichi-deformazione riportati in figura sono relativi a prove dilatometriche eseguite su tre diversi tipi di terreno:

- A) terreno consolidato;
- B) terreno non consolidato;
- C) terreno scarsamente consolidato.

Il confronto fra i diagrammi relativi alle prove A e B mostra chiaramente

te il sensibile incremento del modulo di deformabilità del terreno a seguito degli interventi di consolidamento.

Oltre alle prove di tipo meccanico è opportuno utilizzare i fori di sondaggio per l'esecuzione di indagini geofisiche mediante carotaggio sonico le quali costituiscono un utile ausilio per la definizione delle caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso.

b) Prove di laboratorio

Sui campioni estratti mediante carotaggio vengono eseguite in laboratorio prove di compressione monoassiale e triassiale per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità e resistenza dei differenti litotipi interessati dallo scavo. È opportuno eseguire le prove mediante attrezzatura di carico a velocità di deformazione controllata in grado di fornire sia il valore della resistenza di picco sia quello della resistenza residua.

La caratterizzazione meccanica dei giunti può essere eseguita in laboratorio mediante prove di taglio diretto.

Particolare attenzione deve essere dedicata alla eventuale presenza di ma-

teriale di tipo rigonfiante. In questo caso è indispensabile eseguire approfondite indagini sperimentali mediante prove di «swelling» per la determinazione della pressione di rigonfiamento in condizioni di deformazione assiale impedita e della deformazione di rigonfiamento del campione in condizioni di carico costante.

2.3 Misura dello stato di sollecitazione originario

Le condizioni topografiche spesso molto variabili, la complessa struttura degli ammassi rocciosi e le azioni tettoniche non consentono di fare alcuna previsione in merito alle componenti del tensore degli sforzi agenti nell'ammasso roccioso prima dello scavo. In qualche caso (terreni con superficie pianeggiante) può essere lecito assumere per la componente di sollecitazione verticale un valore pari al carico litostatico. Nessuna ipotesi può invece essere fatta per le componenti orizzontali, le quali sovente possono avere intensità più elevata di quella della componente verticale.

Risulterebbe quindi estremamente utile misurare in sito lo stato di sollecitazione originario utilizzando tecniche che consentano di operare nei fori di sondaggio fino a considerevoli profondità.

Le tecniche di misura basate su sovracarotaggio a fondo foro («doorstopper») permettono di raggiungere profondità molto limitate (inferiori a 15 m) e risultano quindi del tutto improponibili prima dello scavo della galleria.

Molto più promettente sembra rivelarsi la tecnica della «fratturazione idraulica» la quale permette di misurare lo stato di sollecitazione fino a profondità di gran lunga più elevata. È attualmente in fase di studio una attrezzatura di carico molto maneggevole che consentirà di eseguire prove speditive di fratturazione idraulica fino alla profondità di circa 200-300 m.

2.4 Determinazione delle caratteristiche idrauliche

L'eventuale presenza di acqua nell'ammasso roccioso interessato dallo scavo di una galleria costituisce un problema di primaria importanza che merita particolare approfondimento. I fori di sondaggio trovano utile impiego anche per la determinazione delle caratteristiche idrauliche. Essi permettono l'effettuazione di prove di permeabilità a differenti profondità; consentono inoltre di studiare le oscillazioni dei livelli di falda e di individuare, mediante prospezioni con sonda televisiva, i giunti lungo i quali sono presenti fenomeni di percolazione di acqua.

3. Indagini sperimentali in corso d'opera

Durante l'esecuzione dello scavo è importante verificare l'esattezza delle ipotesi progettuali non solo per motivi di sicurezza, ma anche per acquisire preziose informazioni che potranno risultare utili nel corso di progettazioni successive.

È opportuno verificare in primo luogo se lo stato di sollecitazione originario dell'ammasso roccioso è prossimo a quello ipotizzato in sede di progettazione. Questa verifica può essere eseguita mediante la tecnica di sovracarotaggio (doorstopper) utilizzando fori di modesta profondità (inferiori a 15 m) realizzati in tre diverse direzioni a partire dalla superficie della galleria o da una camera laterale ad essa.

Le caratteristiche di deformabilità possono essere verificate mediante prove di carico che coinvolgano volumi rocciosi decisamente superiori a quelli interessati della prova dilatometrica. La prova di carico su piastra può risultare spesso di difficile esecuzione in quanto può causare seri intralci al transito della galleria. Più interessante, perché di più facile e rapida esecuzione, risulta la prova con martinetto piatto in parete la quale permette di determinare le caratteristiche di deformabilità dello strato superficiale di roccia nell'intorno dello scavo. Il martinetto piatto in parete consente anche di determinare lo stato di sollecitazione (secondario) esistente al contorno dello scavo.

Largo impiego trovano in fase di scavo, le tecniche di misura di tipo geofisico. Mediante rilievi a rifrazione eseguiti lungo le generatrici della galleria è possibile valutare lo spessore della roccia «allentata» a seguito dello scavo. La ripetizione di queste misure dopo diversi intervalli di tempo può consentire di valutare l'evoluzione dei fenomeni di rilascio della roccia nell'intorno dello scavo.

4. Misure di controllo in sito del comportamento dello scavo

Come osservato nei paragrafi precedenti, la determinazione dei parametri di progettazione presenta notevoli difficoltà e spesso si deve inevitabilmente fare ricorso a valutazioni basate più sull'esperienza personale del progettista che sui risultati di indagini sperimentali. Il mezzo più efficace a disposizione del progettista per verificare in corso d'opera l'esattezza delle ipotesi progettuali è costituito dalle misure di controllo in sito del comportamento dello scavo.

Le misure in sito permettono di confrontare il comportamento reale dello scavo con quello previsto in fase di progetto e apportare eventuali varianti in corso d'opera per modificare gli interventi di stabilizzazione previsti.

Un affidabile sistema di misura permette infine di controllare le condizioni di sicurezza del cantiere durante i lavori di scavo.

È necessario in primo luogo adottare un sistema di misura a breve e medio termine per il controllo del comportamento dell'ammasso roccioso nell'intorno dello scavo. Dopo la posa in opera del rivestimento definitivo sarà

invece necessario operare un controllo a lungo termine mediante l'installazione di un sistema di monitoraggio in grado di tenere sotto costante controllo il comportamento statico dell'opera durante l'esercizio.

4.1 Misura degli spostamenti relativi

Il metodo di controllo più semplice a disposizione del progettista per esaminare il comportamento deformativo dell'ammasso roccioso nel corso dell'esecuzione degli scavi è costituito dalle misure di convergenza. Speciali barre di ancoraggio vengono poste in opera a ridosso del fronte di scavo e le misure di convergenza vengono eseguite mediante distometro a nastro o a filo in acciaio. In Fig. 4 è riportato lo schema dell'apparecchiatura con alcuni possibili schemi di installazione delle basi di misura nelle diverse fasi di scavo.

L'esame delle misure distometriche permette di seguire l'evoluzione dei processi deformativi in funzione del tempo e di individuare quindi il momento più idoneo per la posa in opera del rivestimento provvisorio e definitivo. Questa strumentazione permette di evidenziare eventuali discordanze fra il comportamento reale e le previsioni di progetto consentendo quindi di apportare tempestivamente le necessarie modifiche progettuali (Fig. 5).

4.2 Misura degli spostamenti assoluti

La misura degli spostamenti assoluti dell'ammasso roccioso nell'intorno dello scavo viene eseguita mediante l'impiego di estensimetri multibase installati entro fori radiali realizzati in una sezione della galleria il più possibile prossima al fronte di scavo.

Questi strumenti oltre a misurare gli spostamenti assoluti dei vari punti della superficie della galleria, permettono di determinare anche lo spessore dell'anello di roccia alterato nell'intorno dello scavo e la sua eventuale evoluzione nel tempo.

Per rendere possibile l'installazione degli estensimetri è necessario interrompere le operazioni di scavo per permettere l'esecuzione delle perforazioni. Per cercare di ridurre il più possibile questi tempi di attesa sono stati messi a punto estensimetri a due basi di misura di facilissima installazione i quali richiedono fori di piccolo diametro (35

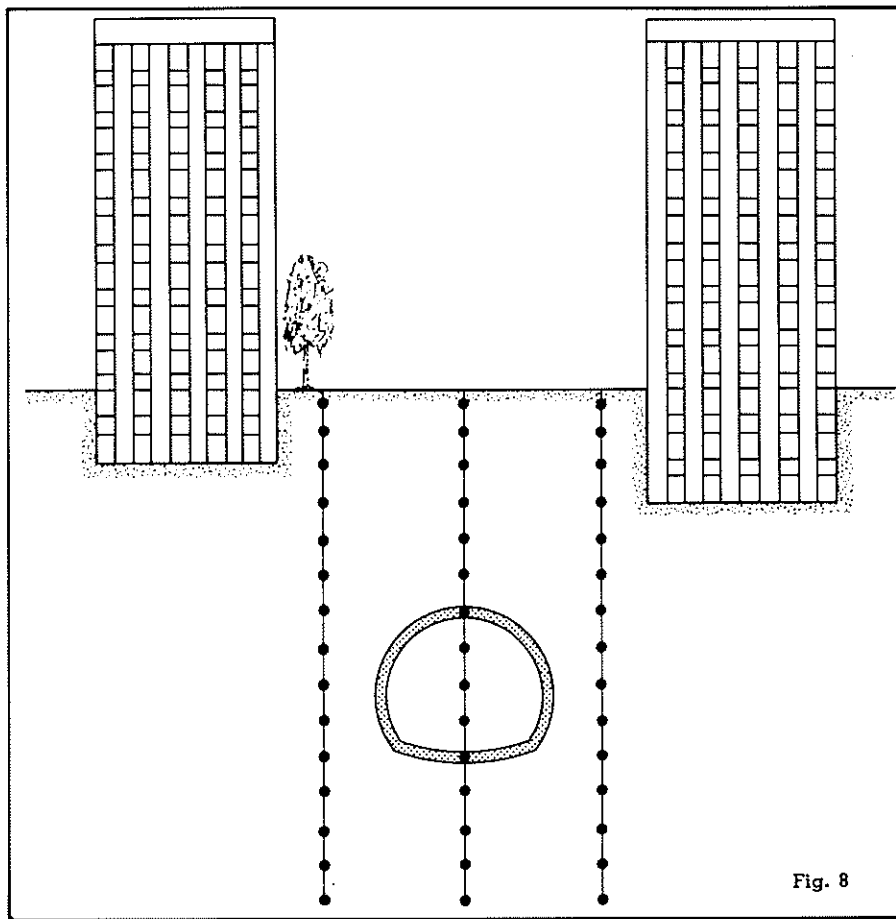


Fig. 8

mm) che possono essere eseguiti mediante perforatore in tempi molto brevi. Questi estensimetri possono raggiungere una profondità massima pari a circa 10 m e prevedono l'esecuzione di letture manuali mediante comparatore meccanico. Lo schema dell'estensimetro composto da due tubi coassiali con ancoraggi ad espansione meccanica, è illustrato in Fig. 6.

Nella eventualità che sia necessario conoscere con maggiore dettaglio il comportamento deformativo dell'ammasso roccioso in funzione della profondità, si consiglia l'impiego dello speciale estensimetro «ISETH» messo a punto dal Prof. Kovari del Politecnico di Zurigo. Lo strumento, illustrato nello schema di Fig. 7a, prevede l'installazione di una catena di basi estensimetriche della lunghezza di 1 m ciascuna realizzate mediante tubi in PVC e ancoraggi metallici cementati entro un foro di diametro non inferiore a 100 mm. Le misure di deformazione sono realizzate mediante una speciale sonda di tipo rimovibile provvista di un trasduttore di spostamento. L'accoppiamento fra le due teste della sonda

estensimetrica e gli anelli metallici posizionati lungo il foro è di tipo sferico e consente quindi una precisione molto elevata (0.005 mm).

È opportuno rilevare che, allorché gli estensimetri o le basi distometriche vengono installate sul fronte di scavo, l'ammasso roccioso ha già subito una deformazione non certo trascurabile la quale non può in alcun modo essere determinata. L'unico mezzo a disposizione per valutare questa deformazione è quello di installare estensimetri multibase prima dell'esecuzione dello scavo. Mentre nel caso di gallerie stradali o ferrovie scavate entro ammassi rocciosi questa operazione è praticamente impossibile, essa diviene di più facile esecuzione nel caso di gallerie per linee metropolitane dal momento che lo spessore del terreno di copertura è in generale piuttosto modesto. In questo caso l'installazione di estensimetri multibase (del tipo «ISETH») permette sia di misurare le deformazioni del terreno nell'intorno dello scavo sia di tenere sotto attento controllo eventuali cedimenti degli edifici ubicati in prossimità dello scavo (Fig. 8).

Per questo tipo di installazione entro fori verticali si presenta particolarmente interessante l'estensimetro TRI-VEC provvisto di dispositivo inclinometrico in grado di fornire, oltre alle deformazioni lungo l'asse del foro, anche le due componenti orizzontali di spostamento di ciascun punto di misura. Questo strumento messo a punto presso il Politecnico di Zurigo, è illustrato in Fig. 7b. La precisione dell'inclinometro in oggetto è pari a 0.05 mm/m.

4.3 Controllo del comportamento del rivestimento definitivo

Le misure di controllo di cui ai punti 4.1 e 4.2 sono relative alla fase di scavo e in generale hanno termine all'atto dell'installazione del rivestimento definitivo.

A questo punto è opportuno predisporre un sistema di monitoraggio a lungo termine, da installare nelle sezioni più significative, in grado di controllare il comportamento statico dell'opera durante l'esercizio.

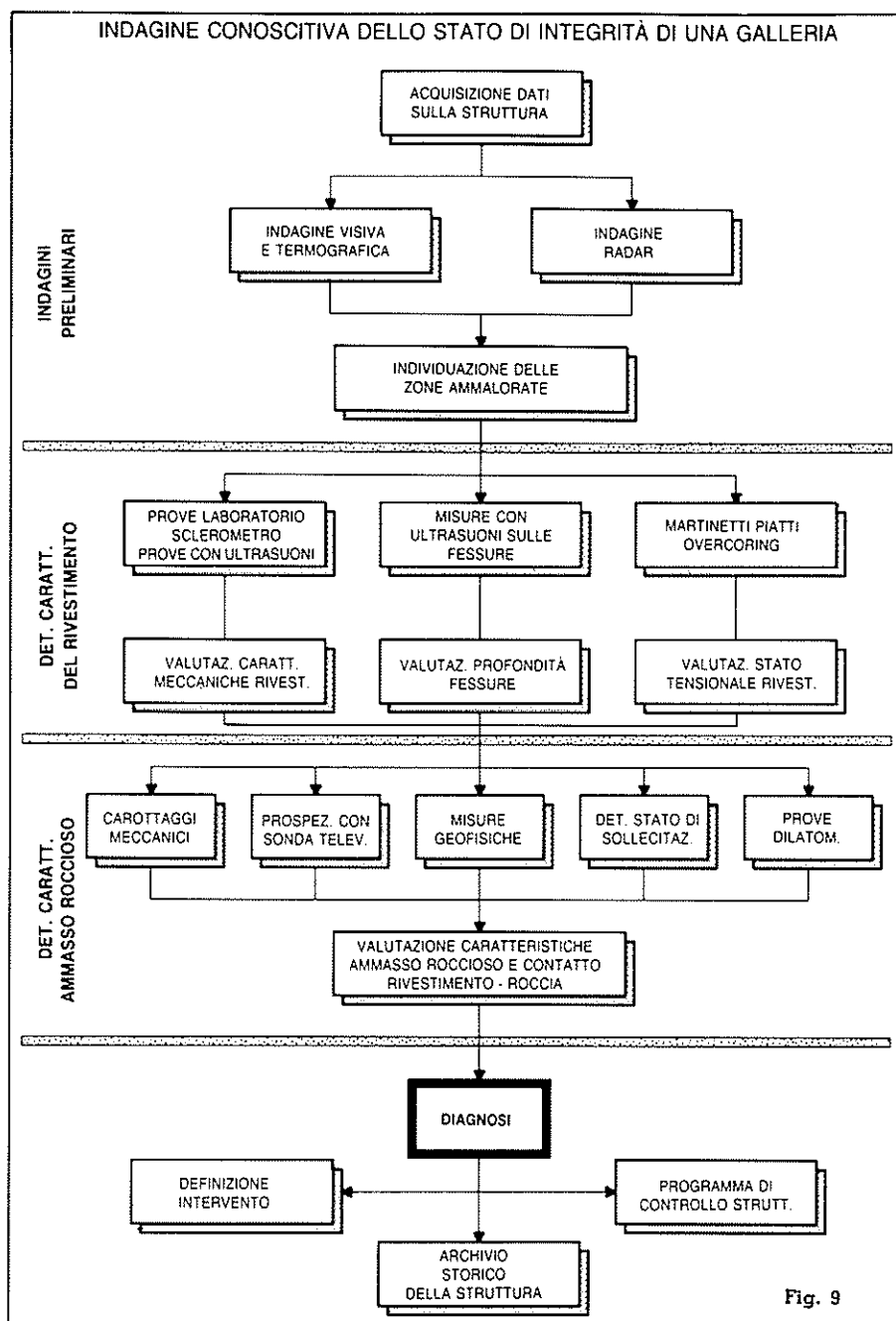
La strumentazione di controllo da installare sul rivestimento definitivo deve fornire le seguenti informazioni:

- analisi delle deformazioni subite dal rivestimento mediante speciali estensimetri da annegare nel getto
- controllo delle sollecitazioni al contatto fra l'ammasso roccioso e il rivestimento mediante celle di pressione
- analisi delle deformazioni dell'ammasso roccioso nell'intorno dello scavo mediante estensimetri multibase
- controllo delle condizioni idrauliche nelle sezioni più significative mediante l'installazione di celle piezometriche.

5. Controllo delle condizioni statiche di gallerie esistenti

Nel corso degli ultimi anni sta assumendo importanza sempre crescente il controllo delle condizioni statiche del rivestimento di gallerie esistenti. Numerose gallerie stradali e ferroviarie e gallerie di derivazione di impianti idroelettrici, con rivestimento in calcestruzzo o muratura, mostrano evidenti segni di degrado. Prima di procedere all'esecuzione di interventi di consolidamento statico è necessario eseguire una indagine diagnostica volta ad accertare la causa e la tipologia del degrado al fine di predisporre gli interventi più idonei.

Uno schema tipo di indagine diagnostica proposto per una galleria con



rivestimento in calcestruzzo è illustrato nello schema di Fig. 9 il quale si riferisce alla tipologia di intervento adottata per lo studio delle condizioni statiche della galleria del Monte Bianco.

Una prima serie di indagini preliminari ha lo scopo di acquisire informazioni sulla struttura e di individuare le zone ammalorate che richiedono un approfondimento di indagine. Queste informazioni possono essere acquisite in primo luogo mediante attenta indagine visiva accompagnata sovente da rilievi termografici. Particolarmente in-

teressante si presenta in questa fase la tecnica di indagine con «RADAR» la quale permette di individuare eventuali anomalie presenti al contatto fra rivestimento e roccia o all'interno dell'ammasso roccioso (cavità, venute d'acqua).

Dopo aver individuato le zone da sottoporre ad analisi più approfondite viene dato corso ad indagini volte alla caratterizzazione fisico-meccanica del rivestimento. Si cerca in questa fase di determinare le caratteristiche meccaniche del rivestimento, di valutare la pro-

fondità delle fessure e di misurare lo stato di sollecitazione esistente nel rivestimento stesso.

Ulteriori indagini più approfondite, che richiedono l'esecuzione di carotaggi, permettono di determinare le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso e le condizioni di contatto fra rivestimento e roccia. In questa fase di indagine trova largo impiego la sonda televisiva per valutare le caratteristiche strutturali dell'ammasso roccioso e per evidenziare eventuali cavità presenti al contatto fra rivestimento e roccia.

Al termine del programma di indagini indicato in Fig. 9 si può formulare una diagnosi delle condizioni statiche dell'opera che permette di prendere decisioni in merito alla scelta degli interventi di consolidamento statico. Nelle zone ove le condizioni statiche risultassero tali da escludere la presenza di pericoli immediati, ci si può limitare all'installazione di un sistema di monitoraggio in grado di tenere sotto controllo il tratto di galleria esaminato.

6. Bibliografia

- ASTOLFI G., FRASSONI A., GARBIN C., MORO T., ROSSI P.P., VANIN V. (1986). Indagini e interventi di ripristino di una galleria idroelettrica lesionata. Congresso Internazionale su grandi opere sotterranee, Firenze, Vol. II.
- BARLA G., ROSSI P.P. (1983). Stress measurements in tunnel linings. International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Zurich.
- BIENIAWSKI Z.T. (1983). Rock Mechanics design in mining and tunnelling. A.A. Balkema Publisher.
- FRASSONI A., MORO T., NOCILLA N., ROSSI P.P. (1981). Physical and mechanical characterization of a weak rock involved in the excavation of an underground power-house. Proc. Int. Symp. on Weak Rock, Tokio, 21-24, September.
- FRASSONI A., ROSSI P.P. (1986). Prove in situ, lo stato dell'arte, nuovi sviluppi applicativi. Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria della roccia, Torino Novembre 1986.
- I.S.M.R. (1979). Commission on standardization of laboratory and field tests (1979). Suggested methods for determining in situ deformability of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 16, pp. 195-214.
- MANFREDINI G., MARTINETTI S., ROSSI P.P., SANPAOLO A. (1974). Observation on the procedures and on the interpretation of the plate bearing test. proc. 3rd Congress Int. Soc. Rock Mechanics, Denver, Vol. II A, pp. 89-94.
- RIBACCHI R. et al. la statica delle gallerie in roccia (1986). L'ingegneria, rivista ANIAI 1-12/1986.