

P.P. Rossi

509

*Criteri di indagine e
controllo per il progetto
e la realizzazione
di gallerie*

Pier Paolo Rossi

**CRITERI DI INDAGINE E CONTROLLO PER IL PROGETTO
E LA REALIZZAZIONE DI GALLERIE**

Convegno: "Le gallerie nei tracciati stradali e ferroviari"

Bologna 23 Settembre 1994

CRITERI DI INDAGINE E CONTROLLO PER IL PROGETTO E LA REALIZZAZIONE DI GALLERIE

Pier Paolo Rossi
ISMES S.p.A. Bergamo

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 (caratteristiche geologiche, idrogeologiche, strutturali e meccaniche, stato di sollecitazione naturale) sia dalle caratteristiche costruttive dell'opera (forma e dimensioni dello scavo, metodo di scavo, opere di sostegno temporanee e permanenti).

Al fine di operare corrette scelte progettuali in merito ai metodi di scavo ed alle opere di sostegno è indispensabile una approfondita conoscenza delle caratteristiche dell'ammasso roccioso e dei parametri che ne condizionano il comportamento meccanico.

Mentre, fino a qualche decennio fa, la progettazione e l'esecuzione delle gallerie erano basate prevalentemente sull'esperienza personale, oggi sono disponibili nuove metodologie di indagine e nuove tecniche di misura che consentono una valutazione meno soggettiva dei principali parametri necessari per la progettazione e la realizzazione dell'opera.

I moderni criteri progettuali per la realizzazione delle opere in sotterraneo prevedono l'esecuzione di indagini geomeccaniche in due diverse fasi:

- caratterizzazione preliminare del sito in fase di progettazione
- analisi del comportamento dello scavo in corso d'opera.

La caratterizzazione preliminare, intrapresa con l'obiettivo di ridurre al minimo l'incertezza sulle condizioni geologiche e geotecniche del sito, consiste in uno studio geologico della zona interessata dall'opera e in indagini geomeccaniche, eseguite in situ ed in laboratorio, atte a definire i principali parametri che determinano il comportamento meccanico dell'ammasso roccioso.

Successivamente, durante lo scavo dell'opera, viene condotta una seconda serie di indagini geomeccaniche con l'obiettivo di acquisire dati per la verifica delle ipotesi progettuali. In questa fase si ha inoltre l'opportunità di osservare il comportamento globale della struttura sotterranea, rilevando il comportamento deformativo dell'ammasso roccioso nell'intorno dello scavo in funzione del tempo.

2. INDAGINI PRELIMINARI IN FASE 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. Dopo un accurato esame delle foto aeree è necessario eseguire un rilievo geologico e strutturale di dettaglio allo scopo di evidenziare tutti i litotipi interessati dallo scavo ed 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.

Le indagini geofisiche eseguite in superficie con le tecniche sismiche a riflessione e rifrazione ad alta risoluzione forniscono preziose informazioni per la definizione dello schema geologico e strutturale dell'ammasso roccioso.

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.

Le prospezioni eseguite mediante moderne sonde televisive a colori consentono di ottenere un quadro molto preciso delle caratteristiche strutturali dell'ammasso roccioso.

Dopo la definizione dello schema geologico è necessario procedere alla determinazione dei parametri fisici e meccanici necessari alla 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 sondaggi il maggior numero possibile di informazioni sulle caratteristiche di deformabilità e di resistenza dell'ammasso roccioso sul suo stato di sollecitazione originario.

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

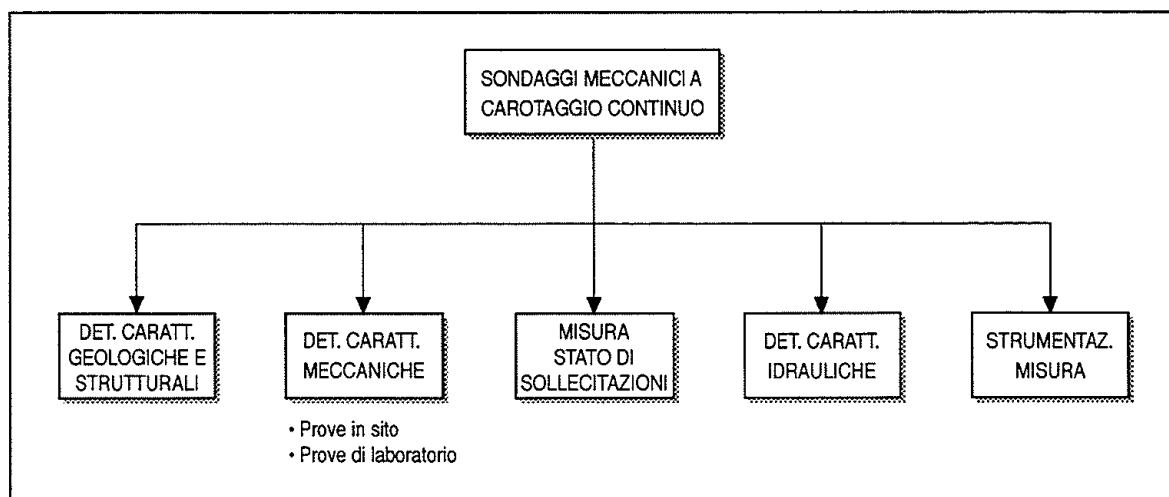


Fig. 1 - Schema tipo delle indagini che possono essere eseguite utilizzando i sondaggi meccanici a carotaggio continuo.

2.1 Sismica a riflessione ad alta risoluzione

La metodologia di indagine sismica a riflessione ad alta risoluzione permette di evidenziare l'andamento delle principali superfici di discontinuità presenti nel terreno e, in particolare, la giacitura della stratificazione, i limiti di sequenza, le variazioni litologiche, i motivi tettonici, ecc.

Un segnale sismico viene generato sulla superficie del terreno e si propaga in profondità ove, a causa di variazioni delle caratteristiche elastiche del terreno, viene parzialmente riflesso verso l'alto e trasformato in segnale elettrico da opportuni ricevitori (geofoni).

La successiva fase di elaborazione consiste nel trattare matematicamente i segnali sismici allo scopo di ottenere una sezione sismica del terreno rappresentato dai diversi orizzonti riflettenti. Nella successiva fase di interpretazione si ricava una sezione geologica stratigrafico-strutturale dei terreni indagati (Fig. 2).

Questa tecnica di indagine consente di raggiungere profondità variabili da qualche metro a qualche centinaio di metri, con una definizione che può arrivare a $\pm 5\%$ della profondità.

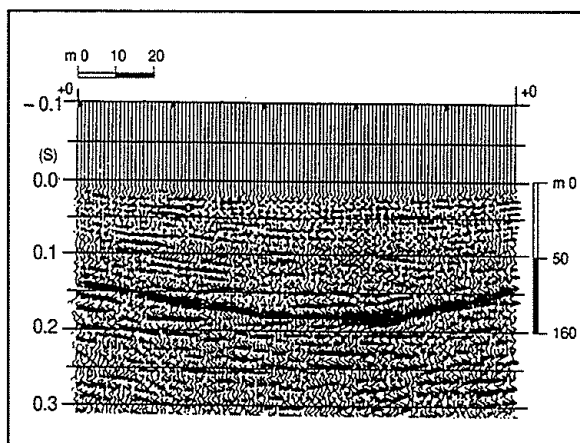


Fig. 2 - Rilievo sismico a riflessione ad alta risoluzione di un bacino idroelettrico: la fascia scura evidenzia il contatto col substrato roccioso.

2.2 Sismica a rifrazione ad alta risoluzione

Le indagini sismiche a rifrazione costituiscono il mezzo più idoneo per la determinazione dello spessore di terreni di copertura del substrato roccioso o per individuare la presenza di strati corticali con caratteristiche scadenti rispetto al substrato.

Il presupposto alla applicazione del metodo è che il numero di strati sia piccolo, in genere due o tre, i loro spessori piuttosto consistenti in rapporto alla profondità e infine che la velocità sismica di ciascuno strato sia maggiore di quella dello strato sovrapposto. Con il metodo sismico a rifrazione è possibile ottenere il profilo continuo dell'andamento della superficie di separazione tra le differenti unità sismiche e la velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali (V_p) associate a tali unità. Con queste ultime è possibile effettuare una valutazione delle caratteristiche elastiche dei materiali interessati dall'indagine.

Questa tecnica di prova è per certi versi complementare alla sismica a riflessione ad alta risoluzione. La definizione del metodo è mediamente pari a $\pm 10\%$ della profondità.

In Fig. 3 è riportato a titolo di esempio il risultato di una indagine sismica a rifrazione ad alta risoluzione eseguita sui terreni interessati dallo scavo di una galleria per la linea ferroviaria ad Alta Velocità Bologna-Firenze.

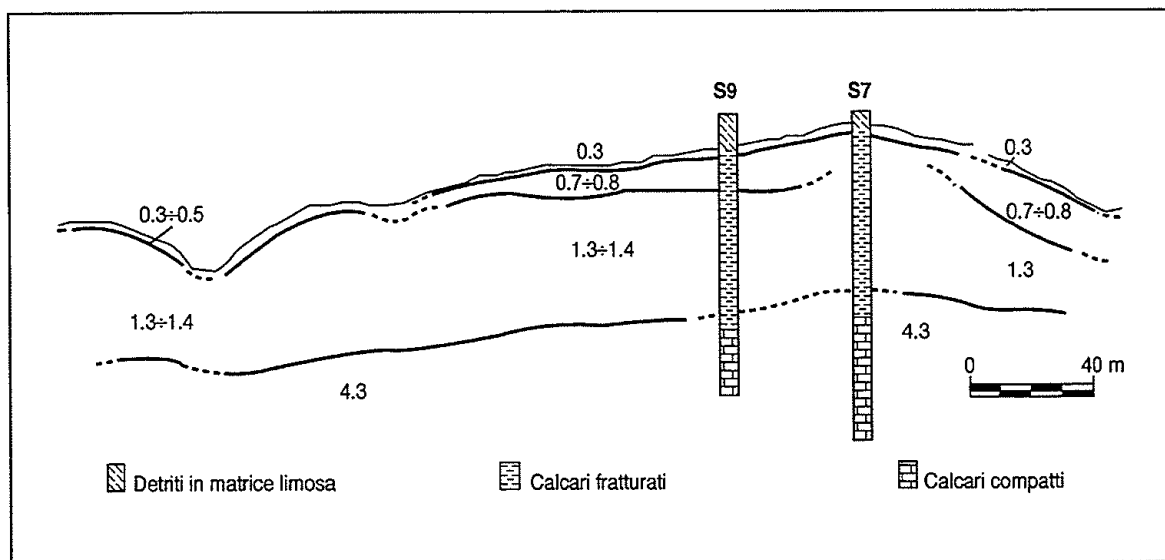


Fig. 3 - Ricostruzione stratigrafica mediante sismica a rifrazione ad alta risoluzione e confronto con i sondaggi meccanici.

2.3 Rilievi con sonda televisiva

Per definire le caratteristiche geostrutturali di dettaglio dell'ammasso roccioso è necessario fare ricorso a prospezioni mediante sonda televisiva. Questa attrezzatura, che consente di eseguire un rilievo continuo su tutta la lunghezza del foro, rappresenta uno strumento di indagine molto efficace in grado di fornire le seguenti informazioni:

- determinazione della giacitura dei giunti;
- misura 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 il livello di falda.

I rilievi con sonda televisiva sono inoltre utilizzati per la scelta delle sezioni in corrispondenza delle quali è necessario eseguire altri tipi di prove (prove dilatometriche, prove di fratturazione idraulica). L'attrezzatura per eseguire i rilievi è composta da una telecamera a tenuta idraulica, atta a resistere a pressioni fino a 20 MPa, da un cavo multipolare portante con verricello per calare la sonda a velocità costante nel foro di sondaggio, da un'unità di controllo per la regolazione di messa a fuoco, apertura diaframma e intensità di illuminazione e da un monitor collegato ad un sistema di videoregistrazione per la visione e la registrazione delle immagini.

Recentemente è stato introdotto un sofisticato sistema di ripresa in foro ad alta definizione che consente, tramite il trattamento digitale dell'immagine, di ottenere in tempo reale lo sviluppo a colori della parete del foro (Fig. 4). Questo sistema consente, mediante una successiva elaborazione dei dati con calcolatore, di ottenere la giacitura delle fratture rilevate, nonché di valutare l'apertura delle discontinuità.

Con questo metodo si raggiungono facilmente profondità dell'ordine di 500 m. L'utilizzo di questa tecnica richiede solo che il foro sia stabile (o rivestito nelle zone non stabili) e che l'acqua che lo riempie sia sufficientemente trasparente: ciò preclude l'utilizzo di fanghi per la stabilizzazione del foro di sondaggio.

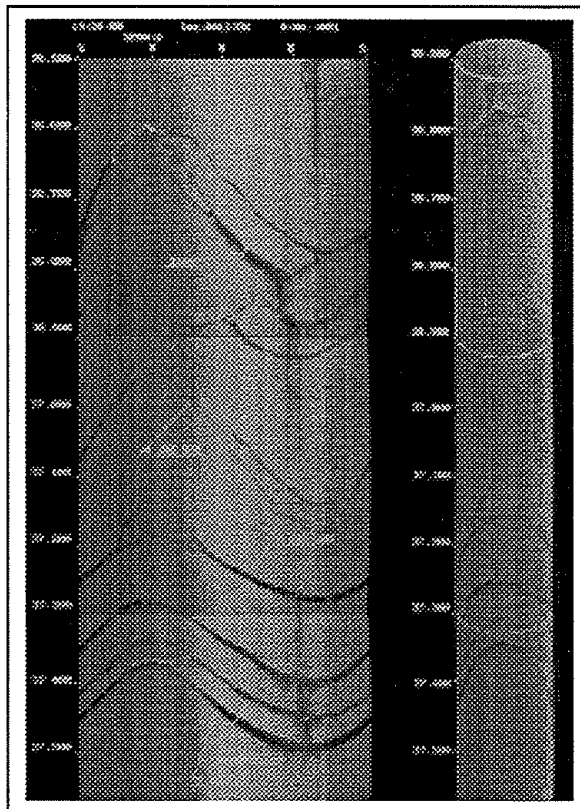


Fig. 4 - Immagine della parete di un foro ottenuta mediante sonda TV a colori ad alta definizione. È visibile a sinistra la sviluppata della superficie del foro e a destra la ricostruzione della carota.

2.4 Rilievi di carotaggio sonico in foro

Il carotaggio sonico è un metodo di prospezione che consente di caratterizzare i terreni lapidei mediante il rilievo delle modalità di propagazione delle onde elastiche nel materiale circostante una perforazione riempita con acqua.

Per questo tipo di indagine vengono utilizzate sonde soniche costituite da un trasmettitore piezoelettrico e da uno o più ricevitori, anch'essi di tipo piezoelettrico, posti a distanza variabile da 0,5 a 1,0 m dal trasmettitore.

L'impulso, generato dal trasmettitore, si propaga nel materiale circostante il foro sotto forma di onde elastiche e le sue modalità di propagazione dipendono dalla natura e dalle caratteristiche dei materiali attraversati.

Le caratteristiche del materiale ed il suo stato in integrità influenzano, oltre che la velocità, anche l'ampiezza, la frequenza e la forma dei segnali sonici ricevuti. Per questo i segnali sono registrati in modo digitale e successivamente riprodotti sotto forma di diagrafie soniche che rappresentano la sequenza dei segnali sonici in funzione del tempo di acquisizione e della profondità della perforazione.

2.5 Misura dello stato di sollecitazione originario mediante fratturazione idraulica

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, che sovente possono avere intensità più elevata di quella della componente verticale.

Risulta quindi estremamente utile misurare in sito lo stato di sollecitazione originario utilizzando tecniche che consentano di operare nei fori di sondaggio anche 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.

La fratturazione idraulica rappresenta perciò l'unica tecnica di prova in grado di misurare lo stato di sollecitazione a grandi profondità. Il punto nel quale si vuole misurare lo stato di sollecitazione viene raggiunto attraverso un sondaggio meccanico avente direzione coincidente con una delle direzioni principali di sollecitazione. Mediante packers gonfiabili (Fig. 5) viene isolato un tratto di foro a cui viene applicata una pressione idraulica inviando una portata costante di fluido. L'andamento della pressione (illustrato in Fig. 6) mette in evidenza un picco di pressione P_c richiesto per provocare la rottura a trazione della roccia intorno al foro e la pressione P_f necessaria per mantenere aperta la frattura quando essa è estesa a grande distanza dal foro.

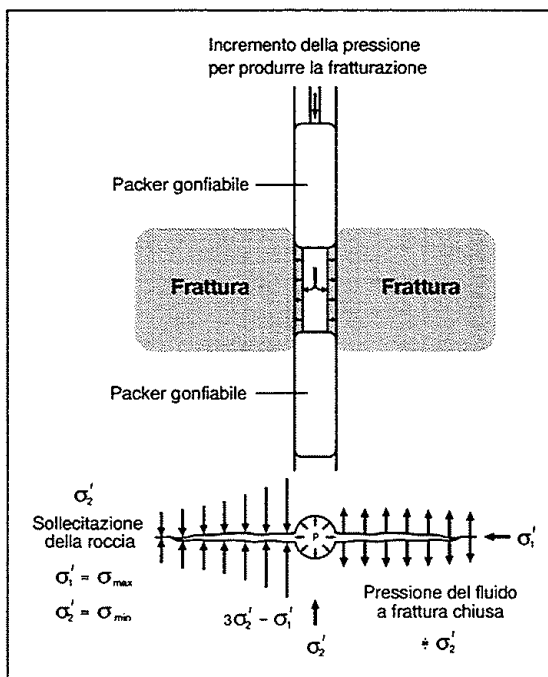


Fig. 5 - Schema della prova di fratturazione idraulica per la misura dello stato di sollecitazione originario.

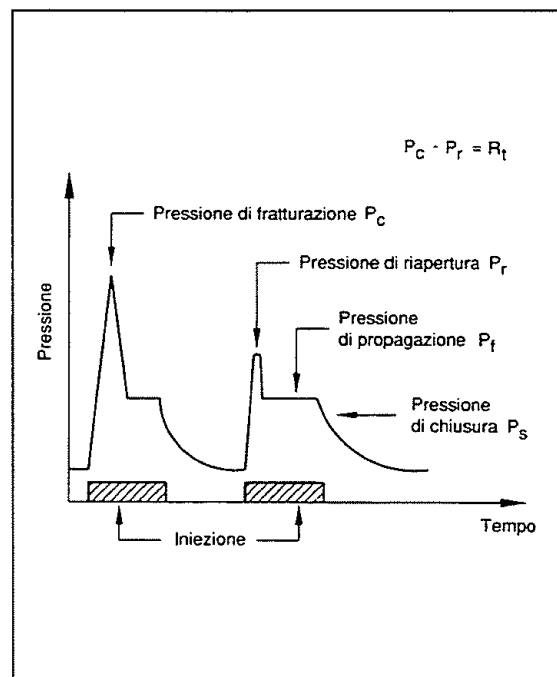


Fig. 6 - Diagramma tipo pressione-tempo rilevato nel corso di una prova di fratturazione idraulica.

Questi due valori vengono utilizzati per calcolare lo stato di sforzo in situ. La frattura presenta sempre una orientazione normale alla sollecitazione orizzontale minima ($\sigma_{h \min}$).

Successivamente, dopo aver depressurizzato il tratto di prova ed aver eliminati i packers, viene inserita una camera di gomma gonfiabile che registra l'impronta della posizione di frattura; tale posizione fornisce la direzione degli sforzi principali.

L'interpretazione delle prove consiste nel calcolo del tensore degli sforzi originario a partire dai valori caratteristici di pressione e dall'orientazione della frattura.

In Fig. 7 è riportato il risultato di una campagna di prove di fratturazione idraulica eseguite sull'ammasso roccioso calcareo del Vomano (Teramo) con la rappresentazione statistica delle alterazioni principali di tensione.

Recenti esperienze eseguite all'ISMES indicano che è possibile determinare lo stato tensionale originario con sufficiente accuratezza anche in condizioni di roccia fratturata, con un numero esiguo di prove (circa 6 prove) fino a profondità dell'ordine di 500 m.

Sfruttando la presenza di giunti naturali preesistenti che intersecano la cavità di prova, la fratturazione idraulica diventa una tecnica molto versatile (Crivelli, e Al. 1993a; Devin e Al. 1993; Cornet e Valette, 1984), permettendo la determinazione del tensore degli sforzi tridimensionali a partire da un unico sondaggio verticale.

La fratturazione idraulica si sta quindi rilevando un metodo per la misura dello stato tensionale adatto anche a rocce fratturate e di scadente qualità meccanica.

Il principale inconveniente di questa tecnica di prova sta nella necessità di rilevare l'orientazione della frattura attraverso un packer ad impressione che deve essere calato e riestratto dal foro per ciascuna prova. Se la roccia è debole ed il foro instabile accade spesso di non avere il tempo di effettuare tale operazione per tutte le prove.

Attualmente sono in corso studi per la messa a punto di un sistema atto a determinare l'orientazione della frattura in tempo reale durante l'esecuzione della prova (Mosnier e Cornet, 1989): questa applicazione sarà destinata ad innovare la tecnica della fratturazione idraulica rendendola molto più economica ed ampliandone il campo di applicabilità.

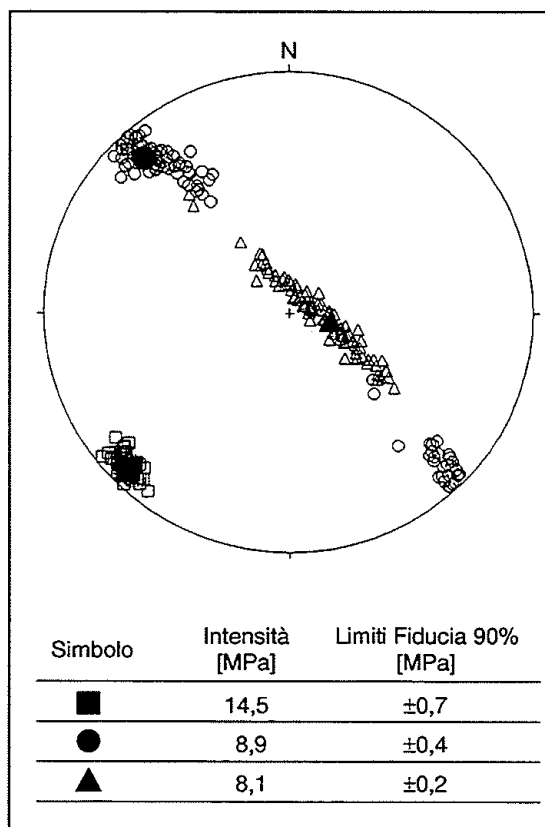


Fig. 7 - Rappresentazione statistica delle direzioni principali di tensione misurate mediante prove di fratturazione idraulica sull'ammasso roccioso calcareo del Vomano (Teramo).

2.6 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.

La prova di permeabilità può essere eseguita sia a fondo foro (utilizzando un solo packer) sia in un tratto qualunque del foro (utilizzando un doppio packer). In Fig. 8 sono illustrati i due schemi di prova.

Una variante recentemente introdotta permette di eliminare alcuni inconvenienti della prova tradizionale con doppio packer a spese però di una maggiore complicazione tecnologica ed esecutiva. Tale variante prevede l'utilizzo di quattro packers che consentono di isolare idraulicamente altri due tratti di foro, rispettivamente sopra e sotto il tratto di prova (Fig. 9).

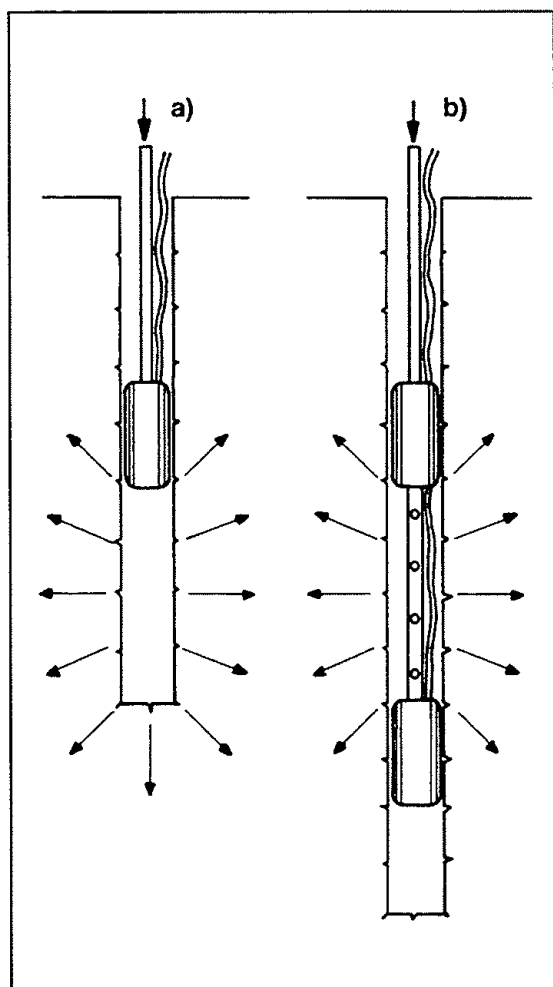


Fig. 8 - Prova di permeabilità in foro di sondaggio: a) prova a fondo foro
b) prova con doppio packer.

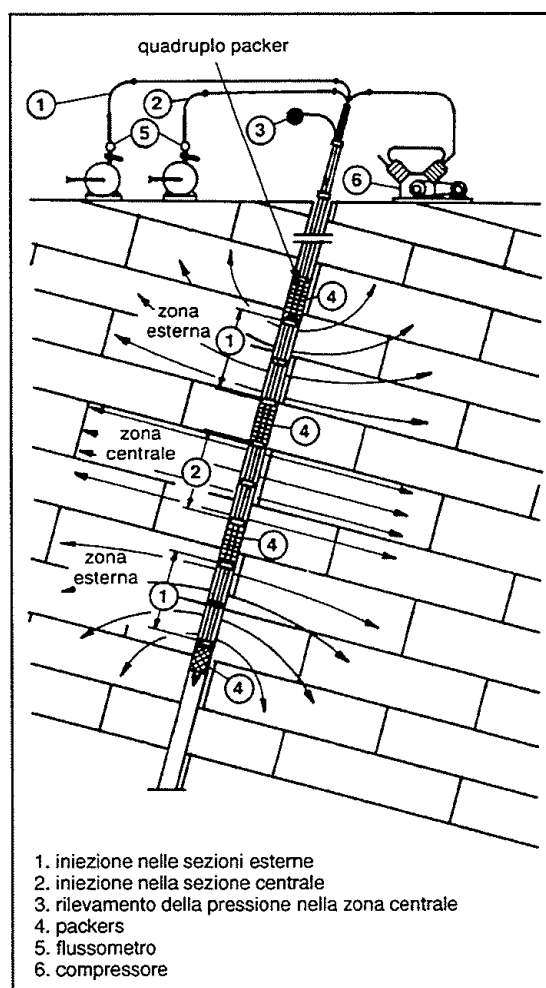


Fig. 9 - Prova di permeabilità in foro con quattro packers.

Mediante tubazioni distinte viene immessa acqua nei tre tratti di foro in modo da ottenere in tutti la stessa pressione, misurando però solo la portata immessa nel tratto centrale mediante un trasduttore elettrico.

Con tale disposizione si ottiene un flusso dell'acqua di tipo radiale in corrispondenza del tratto centrale di misura, che consente di riprodurre fedelmente lo schema di flusso teorico sul quale si basa l'interpretazione dei risultati della prova.

2.7 Determinazione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso

2.7.1 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 di diametro 75 o 100 mm (Fig. 10), la quale è in grado di applicare sulla superficie del foro una sollecitazione uniformemente 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 in relazione ai diversi valori della sollecitazione applicata.

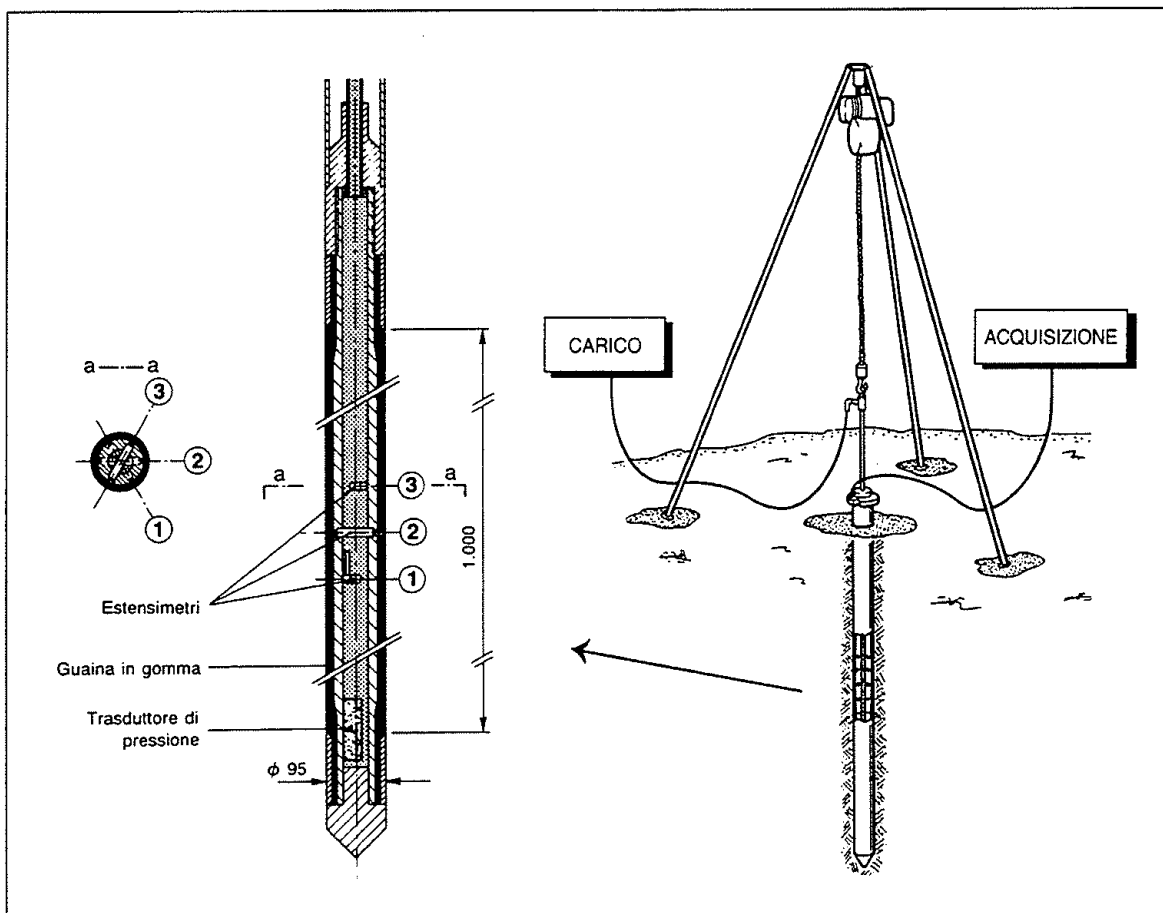


Fig. 10 - Schema della sonda dilatometrica per fori di diametro 75 mm o 100 mm.

E' opportuno osservare che le prove dilatometriche interessano una fascia di roccia intorno al sondaggio di spessore molto modesto (dell'ordine di grandezza del diametro del sondaggio); tale spessore può quindi essere notevolmente minore della spaziatura delle discontinuità presenti nella massa rocciosa.

I valori dei moduli rilevati con il dilatometro possono risultare molto superiori a quelli effettivi della massa rocciosa ed essere invece più prossimi a quelli corrispondenti al materiale roccioso.

I risultati forniti dalle prove dilatometriche sono comunque di indubbio interesse in quanto permettono la determinazione di un indice di qualità di tipo meccanico facilmente correlabile con altri indici di qualità determinati nello stesso foro.

Il modesto costo e il breve tempo richiesto da questo tipo di indagine permette di eseguire numerose prove consentendo quindi analisi di tipo statistico dei risultati.

La possibilità di usufruire di un'unità mobile per prove in situ, oltre ad incrementare la produttività, consente di ridurre l'intervallo di tempo tra la fine della perforazione e l'inizio delle prove e, nel caso di materiali rocciosi deboli, di eseguire la prova in condizioni di minimo disturbo alla parete del foro e di minimo rischio per l'attrezzatura.

Il dilatometro, illustrato in Fig. 10, 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. 11 i risultati di prove dilatometriche eseguite sui terreni interessati dallo scavo della Linea 3 della Metropolitana Milanese.

I diagrammi carichi-deformazioni riportati in figura sono relativi a prove dilatometriche eseguite su tre 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 il sensibile incremento del modulo di deformabilità del terreno a seguito degli interventi di consolidamento.

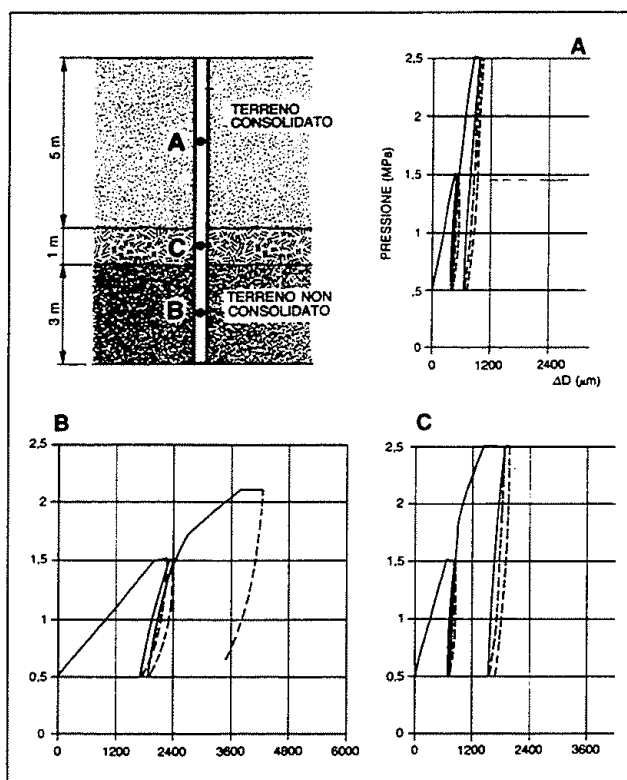


Fig. 11 - Prove dilatometriche eseguite sui terreni interessati dallo scavo di una galleria della linea 3 della Metropolitana Milanese: confronto fra i risultati ottenuti su terreni consolidati e non consolidati.

2.7.2 Prove di laboratorio

Sui campioni estratti mediante carotaggio vengono eseguite in laboratorio, in particolare, prove di compressione monoassiale e triassiale per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità e resistenza dei differenti litotipi interessati dallo scavo. E' 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 dei campioni.

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

Particolare attenzione deve essere dedicata alla eventuale presenza di materiale di tipo rigonfiante. In questo caso è indispensabile eseguire approfondite indagini sperimentali mediante prove di "swelling" (Fig. 12) per la determinazione della pressione di rigonfiamento in condizioni di deformazione assiale impedita e della deformazione di rigonfiamento in condizioni di carico costante.

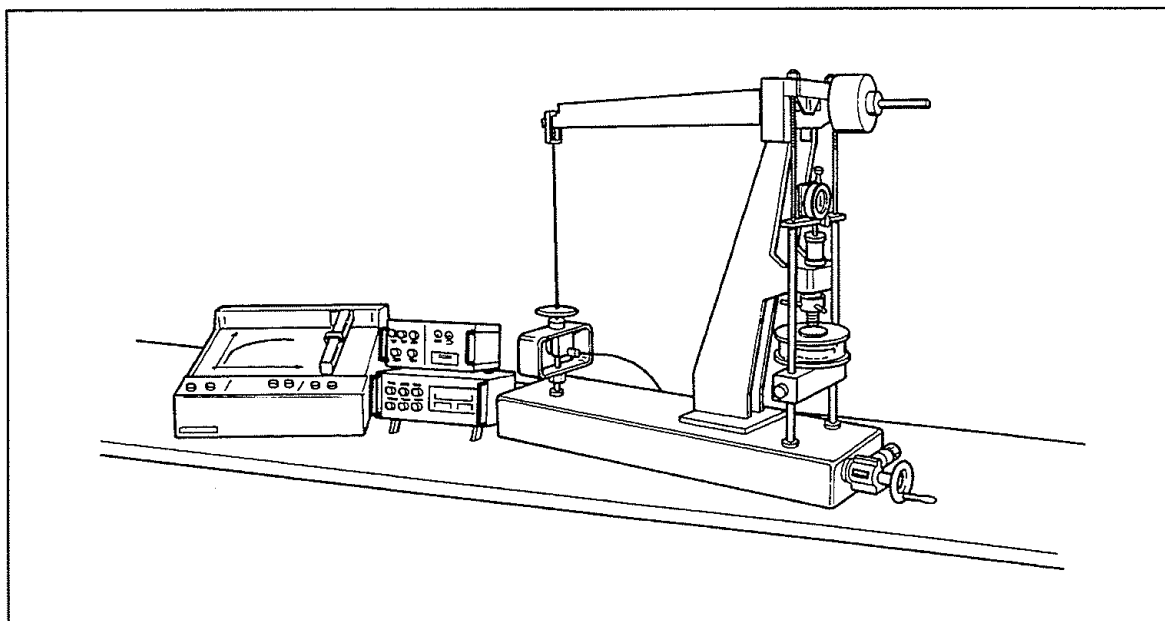


Fig. 12 - Attrezzatura per prova di rigonfiamento (Swelling Test).

3. INDAGINI SPERIMENTALI IN CORSO D'OPERA

Durante l'esecuzione dello scavo è importante verificare l'esattezza delle ipotesi progettuali al fine di garantire la corretta esecuzione dell'opera. Questo controllo permette inoltre di acquisire preziose informazioni che potranno risultare utili nel corso di progettazioni successive.

E' opportuno verificare in primo luogo se lo stato di sollecitazione dell'ammasso roccioso è uguale a quello determinato in sede progettuale mediante la fratturazione idraulica.

Questa verifica può essere eseguita mediante la tecnica di sovracarotaggio (doorstopper) utilizzando fori di modesta profondità (inferiori a 15 m) oppure utilizzando la tecnica della

fratturazione idraulica, impiegando però apparecchiature leggere ed atte ad operare entro fori di modeste profondità e di piccolo diametro.

Le caratteristiche di deformabilità possono essere verificate mediante prove di carico che coinvolgono volumi rocciosi decisamente superiori a quelli interessati dalla 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 (perchè di facile e rapida esecuzione) risulta la prova con martinetto piatto in parete, che permette di determinare le caratteristiche di deformabilità dello strato superficiale di roccia nell'intorno dello scavo. Questa tecnica di prova consente anche di determinare lo stato di sollecitazione (secondario) esistente al contorno dello scavo.

Anche le tecniche di misura di tipo geofisico trovano largo impiego in fase di scavo. 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 nell'intorno dello scavo.

3.1 Misura dello stato di sollecitazione originario

3.1.1 Tecniche di sovracarotaggio

Le tecniche di sovracarotaggio (Fig. 13) comportano l'esecuzione di un foro a carotaggio continuo fino a raggiungere il punto della roccia dove si vuole effettuare la misura. Sul fondo del foro viene applicata una cella estensimetrica, incollata per mezzo di resine epossidiche. In un secondo tempo la cella viene sovracarotata misurando le deformazioni prodotte dal rilascio tensionale. Con prove di compressione radiale sullo spezzone di carota che contiene la cella estensimetrica vengono valutate le costanti elastiche della roccia.

Con l'ausilio della teoria dell'elasticità, a partire dalle deformazioni registrate durante il rilascio tensionale dovuto al sovracarotaggio e usando le costanti elastiche misurate nelle prove di compressione radiale, è possibile determinare lo stato di sollecitazione originario.

I metodi di sovracarotaggio (in Italia vengono usate principalmente la tecnica Doorstopper e la Cella CSIRO) sono carat-

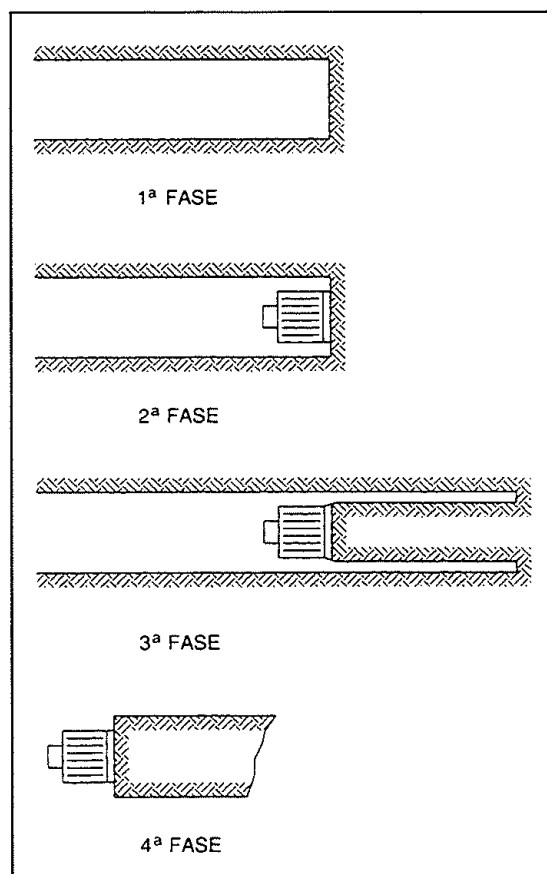


Fig. 13 - Fasi di prova per la misura dello stato di sollecitazione mediante tecnica "doorstopper".

terizzati da sofisticate e laboriose procedure sperimentali. Affinchè forniscano risultati affidabili è inoltre necessario che il comportamento della roccia sia con buona approssimazione di tipo elastico. Il campo di applicazione delle tecniche di sovracarotaggio è inoltre limitato alle rocce poco fratturate e prive di acqua.

Poichè si tratta di misure puntuali, cioè che coinvolgono volumi ridotti di materiale roccioso, la dispersione dei risultati è in genere piuttosto elevata: ciò richiede l'esecuzione di numerose prove al fine di ottenere un tensore degli sforzi originario rappresentativo alla scala dell'opera in progetto.

3.1.2 Tecnica di fratturazione idraulica

La tecnica di fratturazione idraulica è frequentemente applicata anche a partire da cunicoli sotterranei.

Le differenze principali rispetto al caso dei sondaggi verticali profondi sono le seguenti:

- l'orientazione del sondaggio può essere anche diversa dalla verticale perchè possono essere facilmente realizzati fori con diversa orientazione;
- i sondaggi hanno lunghezza limitata (15-25 m).

In tali condizioni, per diminuire il costo della prova, è preferibile adottare un'attrezzatura particolarmente leggera e maneggevole (MINIFRAC), che opera in fori di piccolo diametro (38 mm), i quali possono essere eseguiti anche a distruzione.

Questa tecnica, di recente applicazione, si presenta molto interessante poichè i tempi e i costi delle indagini risultano molto ridotti e i risultati ottenuti sono del tutto raffrontabili con quelli ottenuti mediante l'attrezzatura di fratturazione idraulica di diametro 75 mm illustrata nel paragrafo 2.5.

3.2 Determinazione delle caratteristiche di deformabilità

3.2.1 Prova con martinetto piatto in parete

La prova con martinetto piatto in parete viene utilizzata non solo per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità, ma anche per la misura dello stato di sollecitazione esistente sulla superficie di un ammasso roccioso.

La tecnica di prova prevede l'esecuzione di un taglio piano normale alla parete rocciosa, in modo da causare il rilascio delle tensioni preesistenti nella roccia circostante. Tale rilascio provoca una chiusura del taglio rilevabile attraverso misure dello spostamento relativo fra due punti posti in posizione simmetrica rispetto al taglio stesso. Un martinetto piatto viene cementato all'interno del taglio e la pressione all'interno del martinetto viene generalmente aumentata fino ad annullare le deformazioni rilevate dopo il taglio. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto è pari alla sollecitazione preesistente nell'ammasso roccioso a meno di una costante che tiene conto del rapporto fra l'area del martinetto e quella del taglio e della rigidità del bordo di saldatura del martinetto.

Il taglio presenta una lunghezza compresa fra 60 e 100 cm e profondità, pari alla metà della sua lunghezza. Le misure di deformazione vengono eseguite su diverse basi di misura mediante estensimetro rimovibile, oppure mediante trasduttori elettrici di spostamento (Fig. 14).

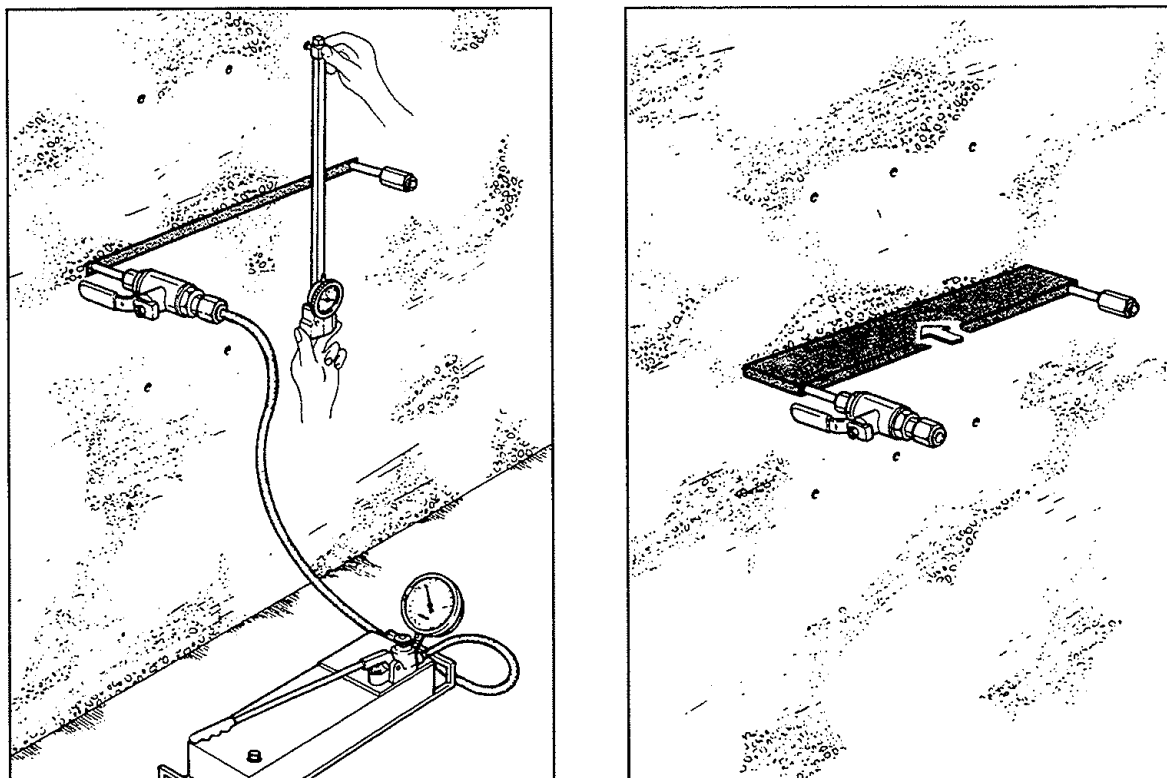


Fig. 14 - Schema della prova con martinetto piatto in parete.

Questo metodo di prova presenta il grosso vantaggio di richiedere una attrezzatura abbastanza semplice, ma ha l'inconveniente che le caratteristiche del materiale vengono misurate in una zona di terreno spesso danneggiata dalle operazioni di scavo.

Una determinazione più precisa delle caratteristiche di deformabilità può essere effettuata utilizzando due martinetti piatti paralleli i quali permettono di eseguire una prova di compressione monoassiale sulla porzione dell'ammasso roccioso compresa fra due martinetti.

E' opportuno segnalare che questa tecnica di prova ha trovato di recente vasto impiego nel campo delle strutture murarie: i martinetti piatti possono essere facilmente inseriti entro corsi di malta e permettono di eseguire prove meccaniche "non distruttive" per la determinazione dello stato di sollecitazione e delle caratteristiche di deformabilità e di resistenza della muratura. Quest'ultima tecnica può quindi essere utilizzata anche con successo per l'analisi delle condizioni statiche dei rivestimenti in muratura di gallerie esistenti.

3.2.2 Prova di carico su piastra

La prova di carico su piastra prevede l'applicazione di una sollecitazione uniformemente distribuita su una superficie rocciosa e la misura dei cedimenti indotti nell'ammasso roccioso in direzione normale alla superficie di carico.

La prova viene eseguita all'interno di cunicoli esplorativi utilizzando un'attrezzatura di contrasto del tipo illustrato in Fig. 15, che è realizzata in parti componibili e permette l'adattamento a cunicoli di diverso diametro.

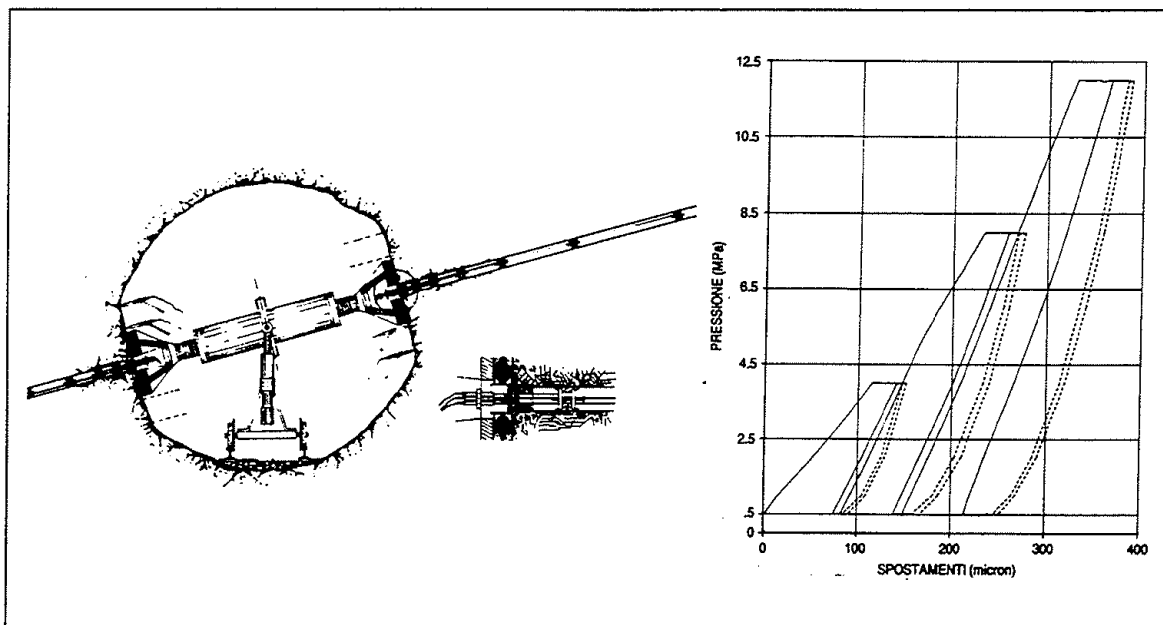


Fig. 15 - Schema della prova di carico su piastra eseguita all'interno di un cunicolo esplorativo e diagramma tipo carichi-deformazioni rilevato al centro di una piastra di carico di diametro 50 cm su un ammasso roccioso calcareo.

Per ricavare informazioni affidabili sulle caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso è indispensabile disporre di un quadro di misure il più possibile completo ed esauriente. Per questo motivo è opportuno che le informazioni vengano rilevate non solo sulla superficie dell'ammasso roccioso, nell'intorno della piastra di carico, ma anche all'interno dell'ammasso stesso, a differenti profondità dalla superficie caricata, mediante speciali estensimetri multibasse. La sola misura degli spostamenti superficiali non permetterebbe infatti di depurare i risultati dall'influenza della corona di roccia plasticizzata esistente attorno al cunicolo dovuta all'azione dello scavo e alla variazione dello stato tensionale conseguente allo scavo.

Per lo studio di rocce anisotrope (stratificate o scistose) è necessario che le prove di carico su piastra vengano eseguite in direzione normale e parallela al piano di anisotropia.

In Fig. 16 sono riportati a titolo di esempio i diagrammi delle deformazioni, in funzione della profondità, rilevati su un ammasso roccioso stratificato in direzione normale e parallela ai piani di stratificazione.

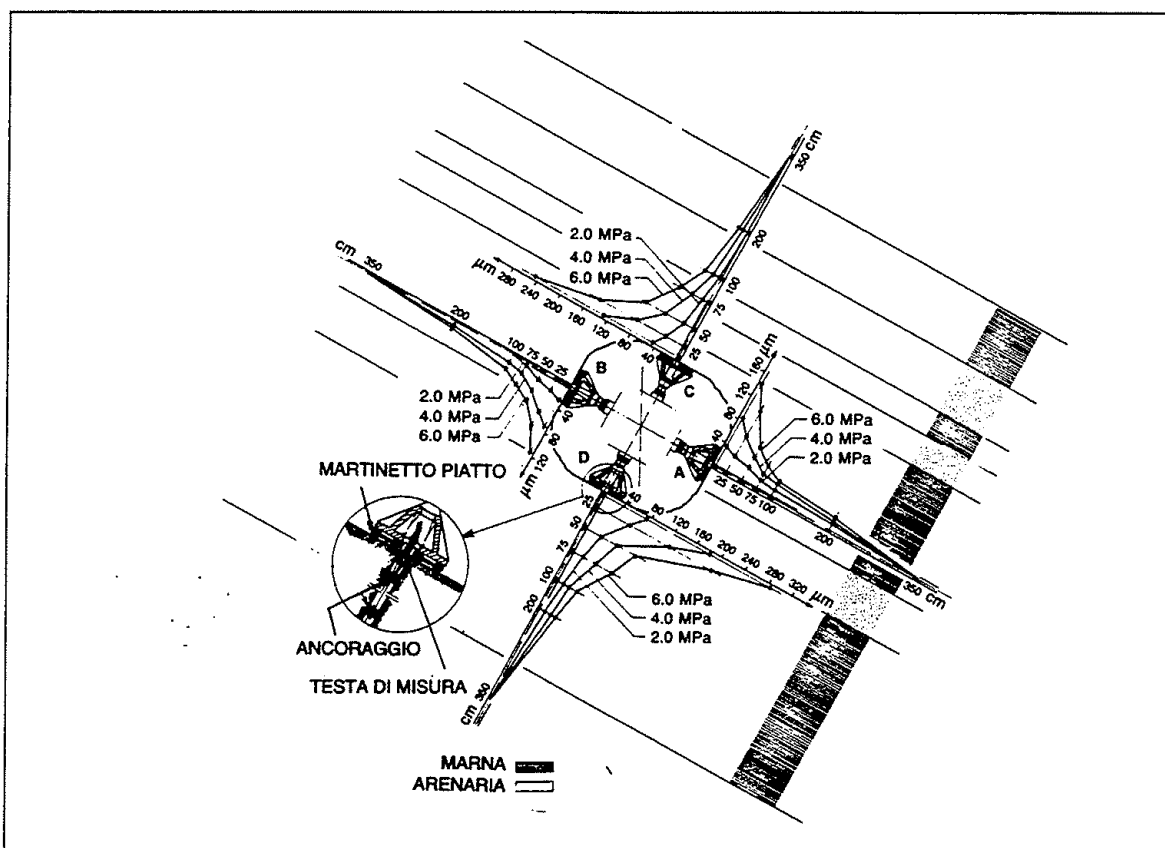


Fig. 16 - Diagrammi delle deformazioni in funzione della profondità rilevate su un ammasso roccioso anisotropo mediante prove di carico su piastra (formazione marnoso-arenacea di fondazione della diga di Ridracoli).

4. MISURE DI CONTROLLO IN SITO DEL COMPORTAMENTO DELLO SCAVO

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. Queste misure permettono di confrontare il comportamento reale dello scavo con quello previsto in fase di progetto e di apportare eventuali varianti in corso d'opera per modificare gli interventi di stabilizzazione previsti. Un affidabile sistema di misura permette inoltre di tenere sotto costante controllo le condizioni di sicurezza del cantiere durante i lavori di scavo. E' 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 è invece necessario operare un controllo a lungo termine mediante l'installazione di un sistema di monitoraggio in grado di valutare 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. A questo scopo 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. 17 è riportato lo schema dell'apparecchiatura, con alcuni possibili schemi di installazione delle basi di misura nelle diverse fasi di scavo.

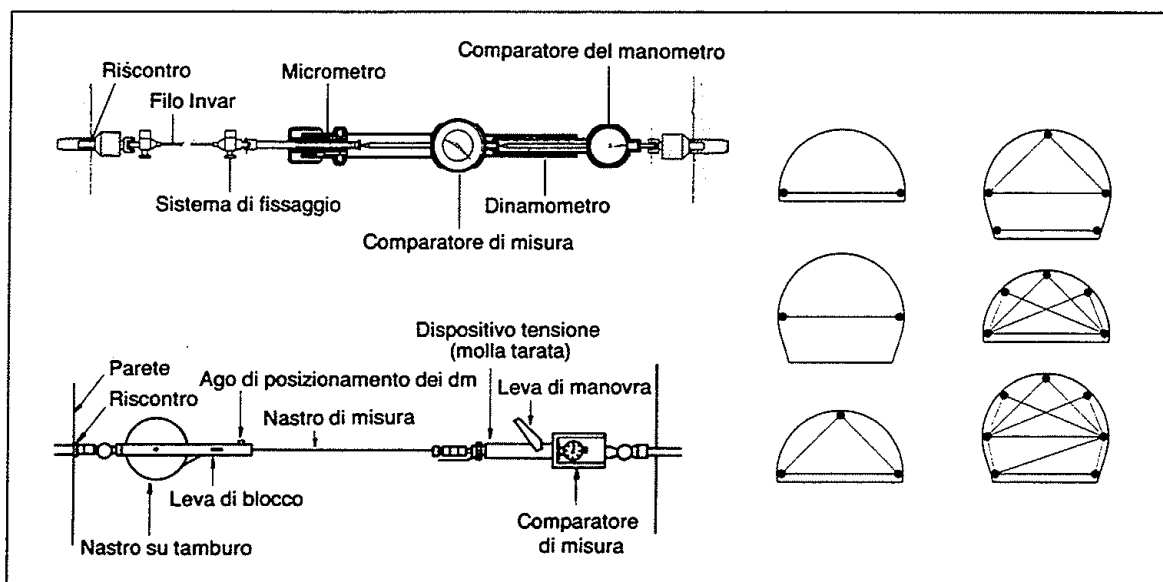


Fig. 17 - Distometro per misure di convergenza e schemi tipo delle basi di misura.

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

Per la misura delle deformazioni radiali e assiali sulla superficie laterale della galleria sono oggi disponibili anche interessanti tecniche di misura di tipo ottico che consentono di raggiungere precisioni dell'ordine di 0,3-0,5 mm.

4.2 Misura degli spostamenti assoluti

La misura degli spostamenti assoluti dell'ammasso roccioso sull'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 ed il suo comportamento 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 tali 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 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'effettuazione di letture manuali mediante comparatore meccanico.

Lo schema dell'estensimetro, composto da due tubi coassiali con ancoraggi ad espansione meccanica, è illustrato in Fig. 18.

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 "sliding micrometer - ISETH", messo a punto dal Prof. Kovari del Politecnico di Zurigo. Lo strumento, illustrato nello schema di Fig. 19, prevede l'installazione di una catena di basi estensimetriche della lunghezza di 1 m cadauna realizzate in PVC con ancoraggi metallici cementati entro un foro di diametro non inferiore a 100 mm.

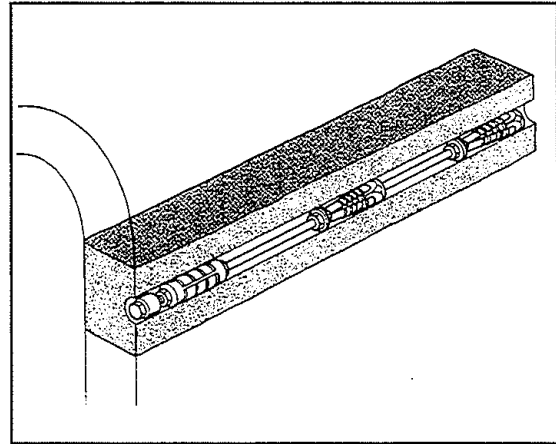


Fig. 18 - Estensimetro meccanico a due basi di misura.

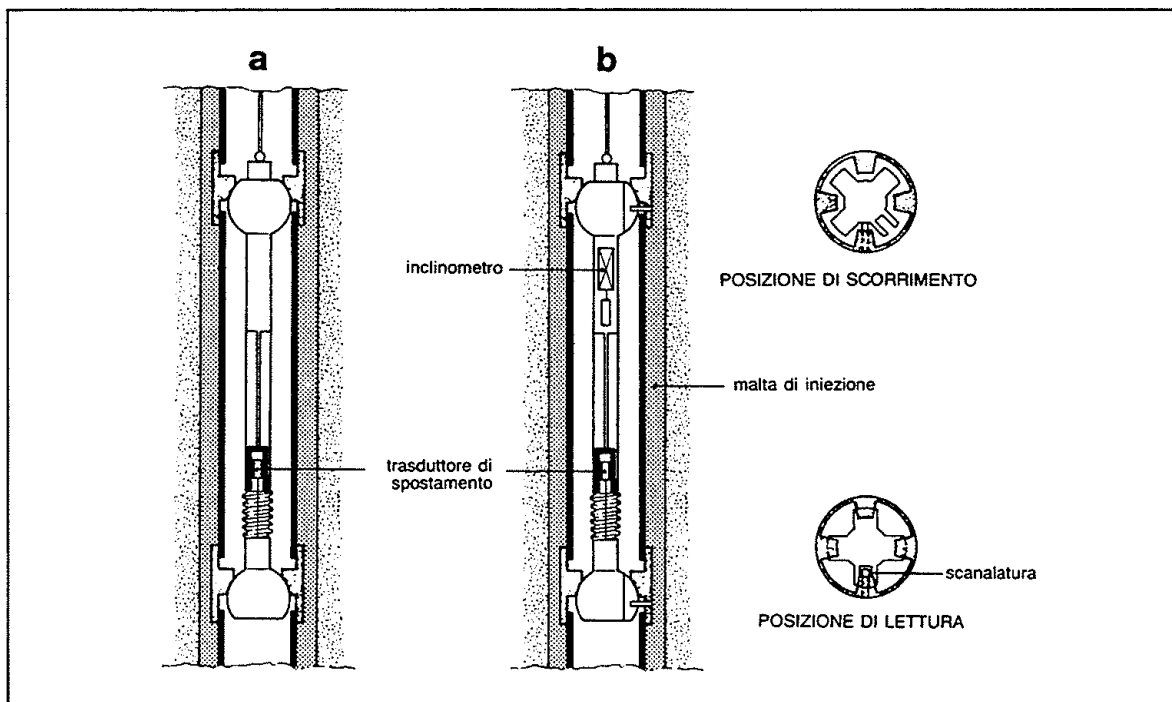


Fig. 19 - a) Estensimetro multibase rimovibile (Sliding Micrometer - ISETH)

b) Estensimetro rimovibile con inclinometro (TRIVEC) per la misura delle 3 componenti di spostamento.

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/m).

Una versione più recente e più economica di questo strumento è utilizzabile in fori di diametro di 56 mm e profondità fino a 30 m con precisione di 0,02 mm/m.

Questo strumento è particolarmente interessante per le misure delle deformazioni nell'intorno di una galleria in quanto consente di ottenere una elevata precisione pur riducendo fortemente i costi di perforazione e di installazione.

In Fig. 20 sono illustrati alcuni schemi tipo di misure con sonde estensimetriche.

E' opportuno rilevare che, allorchè 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 ferroviarie scavate entro ammassi

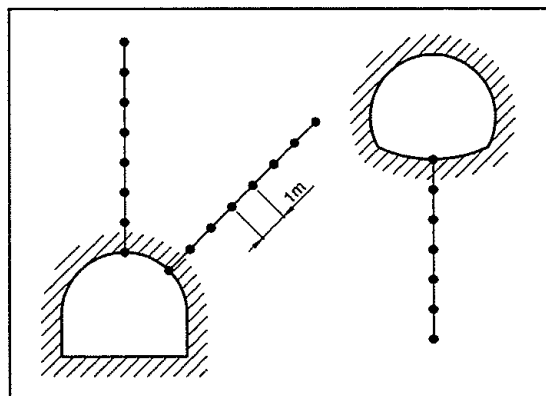


Fig. 20 - Schemi tipo di misura delle deformazioni nell'intorno dello scavo mediante estensimetro multibase rimovibile (ISETH).

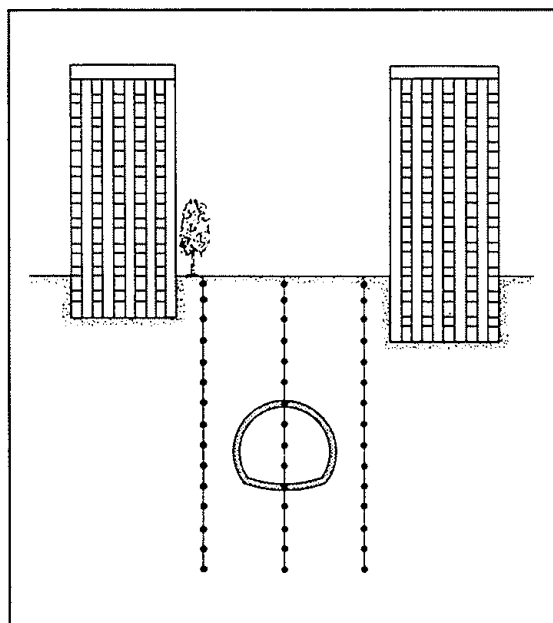


Fig. 21 - Schema tipo di installazione di estenso-inclinometri TRIVEC per il controllo delle deformazioni nell'intorno di gallerie metropolitane.

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 permette sia di misurare le deformazioni del terreno nell'intorno dello scavo, sia di tenere sotto controllo eventuali cedimenti degli edifici ubicati in prossimità dello scavo (Fig. 21).

Per questo tipo di applicazione entro fori verticali risulta particolarmente interessante l'utilizzo dell'estenso-inclinometro TRIVEC, 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 con precisione 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 tra l'ammasso roccioso ed 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 celle piezometriche.

5. VALUTAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI CON TECNICHE DI BACK-ANALYSIS

La "back-analysis" dei dati relativi al comportamento di una galleria, di un cunicolo pilota o, in generale, di una struttura in roccia, è una procedura di calibrazione di un modello matematico del sistema ammasso-cavità.

Attraverso l'uso di metodi numerici, quali quelli degli elementi finiti e degli elementi distinti, vengono condotte diverse simulazioni all'elaboratore elettronico delle operazioni di scavo.

Ciò permette di ricercare, per tentativi successivi, un insieme di valori dei parametri meccanici dell'ammasso e delle condizioni al contorno che diano luogo a spostamenti e deformazioni simili a quelli misurati. A questo proposito un tipico problema è quello di definire accuratamente i parametri meccanici globali dell'ammasso roccioso (le sue caratteristiche di resistenza di deformabilità ed il suo comportamento reologico) e le condizioni al contorno cui esso è sottoposto (stato tensionale originario e posizione della superficie piezometrica).

Generalmente, per tener conto dei fenomeni di plasticizzazione dell'ammasso attorno allo scavo, si adottano modelli non lineari. Le soluzioni diventano quindi onerose e la ricerca della soluzione diventa difficile. Una ulteriore difficoltà proviene anche dal fatto che, con tali modelli, la soluzione generalmente non è unica. Tuttavia se, oltre alle misure di spostamento e deformazione, si dispone anche di una valutazione dello stato tensionale originario, il problema si semplifica notevolmente e la qualità della soluzione viene accresciuta.

Per ottenere i parametri globali dell'ammasso con metodi di "back-analysis" possono essere individuate, durante l'esecuzione dello scavo, sezioni di galleria rappresentative in cui vengono misurati spostamenti e deformazioni nell'intorno dello scavo, installando estensimetri multibase (sliding deformeter di piccolo diametro) e basi di misura distometriche e viene valutato lo stato di sollecitazione originario. Poichè ad esempio, in una galleria lunga diversi chilometri, lo stato tensionale originario può essere molto diverso nelle varie sezioni, è opportuno misurare lo stato di sollecitazione esistente in prossimità di ogni sezione mediante la tecnica di fratturazione idraulica utilizzando l'apparecchiatura MINIFRAC entro fori di piccolo diametro (eseguiti in avanzamento nel fronte di scavo) in modo da minimizzare le interferenze con le operazioni di abbattimento. La combinazione fra le misure di deformazione e le misure dello stato tensionale, secondo lo schema di tipo illustrato in Fig. 22, consente quindi di valutare i parametri meccanici globali all'ammasso roccioso attraverso una operazione di back-analysis che risultano di elevata affidabilità.

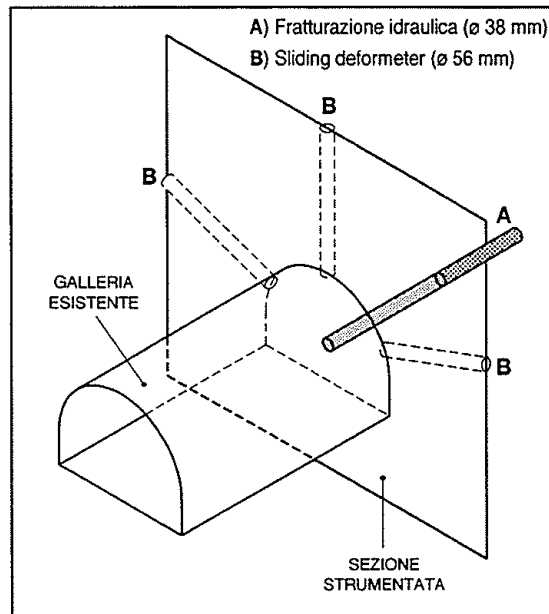


Fig. 22 - Sezione tipo di misura per back-analysis con l'indicazione delle perforazioni per l'installazione degli estensimetri multibase (sliding deformometer) e per l'esecuzione delle prove di fratturazione idraulica con MINIFRAC.

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.

CORNET F.H., VALETTE B. (1984). In situ stress determination from hydraulic injection tests data. Journal of Geophysical Research, V.89, N.B13.

CRIVELLI R., DEVIN P., GUIDO S., ROSSI P.P., ZANINETTI A. (1993a). In situ stress determination in anisotropic rock by means of hydraulic fracturing and overcoring tests. Proc. of the ISRM Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul.

CRIVELLI R., DEVIN P., GUIDO S., ROSSI P.P., ZANINETTI A. (1993b) Determinazione della deformabilità degli ammassi rocciosi con prove dilatometriche. Rivista Italiana di Geotecnica, in corso di pubblicazione.

DEVIN P., GUIDO S., ZANINETTI A. (1993). Determinazione dello stato tensionale in rocce fratturate mediante fratturazione idraulica. XVIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Rimini.

FRASSONI A., ROSSI P.P. (1986). Prove in sito, lo stato dell'arte, nuovi sviluppi applicativi. Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria della roccia, Torino, Novembre 1986.

ISRM COMMISSION ON TESTING METHODS (1987). Suggested methods for deformability determination using a flexible dilatometer. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., V.24, n.2.

LOUIS C. (1974). Rock Hydraulics, Rock Mechanics, Edited by L. Müller, Springer Verlag, pp. 299-387.

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. IIA, pp. 89-94.

MOSNIER J., CORNET F. (1989). Apparatus to provide an image of the wall of a borehole during a hydraulic fracturing experiment. Proc. 4th Int. Seminar of the Results of EC Geothermal Energy Research and Demonstration, Firenze.

ROSSI P.P. (1990). Le indagini sperimentali per le caratterizzazioni degli ammassi rocciosi. Bollettino ISMES n. 277.