

356

R. Crivelli
P. Devin
S. Guido
P.P. Rossi

*Indagini in sito e in
laboratorio per il
progetto e l'esecuzione
di gallerie profonde*



INDAGINI IN SITO E IN LABORATORIO PER IL PROGETTO E L'ESECUZIONE DI GALLERIE PROFONDE

CRIVELLI R., DEVIN P., GUIDO S., ROSSI P.P.

ISMES S.p.A. Bergamo

SOMMARIO

Nella presente memoria si descrivono le più significative tecniche di prova e di indagine in situ e le prove di laboratorio che si utilizzano per la caratterizzazione sia della roccia che all'ammasso roccioso interessati dal progetto e dalla costruzione di gallerie profonde.

In particolare si passano in rassegna prove e indagini di tipo geofisico, geomeccanico e di caratterizzazione di tipo geostrutturale di comune impiego sia per le indagini preliminari della fase progettuale che per quelle in corso d'opera della fase costruttiva. Si descrivono inoltre gli strumenti utilizzati per le misure di controllo in situ per verificare il comportamento dello scavo durante la costruzione e l'utilizzo dell'opera.

1. PREMESSA

Le fasi di progetto e di realizzazione di gallerie profonde richiedono lo studio di una serie di problematiche, legate in particolare all'individuazione dei tracciati e alle indagini per la definizione dei parametri geomeccanici delle strutture rocciose, che si vanno rilevando tecnicamente sempre più complesse e che assumono contemporaneamente una importanza via via più rilevante in vista di una minimizzazione del cosiddetto "rischio geologico". Da un punto di vista strettamente tecnico, il comportamento strutturale di una galleria è condizionato da una serie di 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 relativamente 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 a breve e a lungo termine.

Mentre, fino a qualche decennio fa, la progettazione e l'esecuzione delle gallerie erano basate prevalentemente su esperienze empiriche, oggi sono disponibili metodologie di indagine e nuove tecniche di misura che consentono una valutazione oggettiva 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 geognostiche 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 a rifrazione ad alta risoluzione forniscono importanti informazioni per la definizione dello schema geologico e strutturale dell'ammasso roccioso.

Tuttavia il solo rilievo di superficie, accompagnato dall'esame delle foto aeree, non è sufficiente a fornire uno schema geo-

logico 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 (fig. 1).

dovranno esistere. Tuttavia il problema permanente è quello di riconoscere spazialmente quando queste cause possono manifestarsi singolarmente o diversamente associate. Pertanto, tanto più l'indagine preliminare sarà spinta a livello di dettaglio,

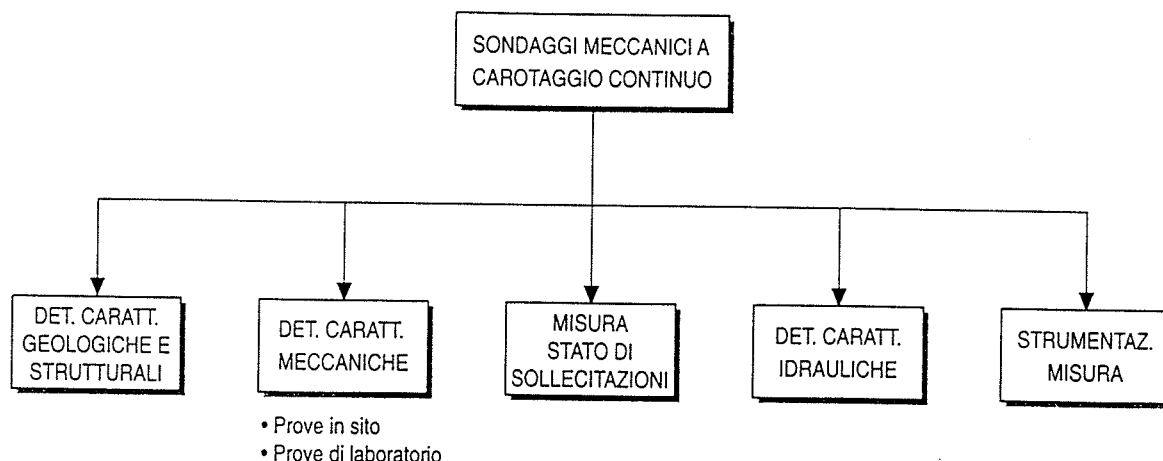


Fig. 1 - Schema tipo delle indagini che possono essere eseguite utilizzando i sondaggi meccanici a carotaggio continuo.

L'ubicazione dei sondaggi deve essere decisa in base ai precedenti rilievi di superficie per andare a "indagare" nelle zone dove sussistano dubbi sulla situazione geologica al livello della galleria, soprattutto dove la geologia possa avere una grande influenza sul processo di scavo (presenza di faglie, rocce deboli, ecc.).

La scelta del tipo di sondaggio e del numero di sondaggi deve inoltre essere tanto più accurata quanto più la profondità aumenta in considerazione dell'elevato costo dei sondaggi stessi.

I fori realizzati a carotaggio continuo consentono di ricavare le carote per le prove di laboratorio. Nel caso i fori siano instabili o realizzati in rocce deboli e/o rigonfianti le indagini geostrukturali e le prove di natura geofisica e geomeccanica in foro sono eseguite in avanzamento per minimizzare il tempo intercorso tra perforazione e prove e per ridurre il rischio di perdere l'attrezzatura. Nel caso di fori stabili le prove possono invece essere eseguite al termine del sondaggio.

Il programma delle indagini e delle prove in foro prevede dapprima prospezioni eseguite mediante sonda televisiva che consente di ottenere un quadro 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.

Negli ammassi rocciosi nei quali si scavano le gallerie profonde le principali cause di instabilità sono infatti dovute a:

- struttura geologica sfavorevole;
- eccessivo valore dello stato di sollecitazione;
- presenza di rocce rigonfianti o degradabili all'acqua;
- presenza di pressioni di falda elevata con associate problematiche di venute di acqua.

Per tali cause, esistenti singolarmente o in forma combinata e che comunque possono portare ad un eventuale dissesto, esistono soluzioni tecniche e tecnologiche differenti che permettono di realizzare opere stabili per tutto il tempo che esse

tanto più potranno essere definite le cause di eventuale instabilità che potrebbero manifestarsi durante lo scavo.

Il problema previsionale, affrontato nel precedente MIR del 1992, rimane invariato e può essere così sintetizzato secondo quanto affermato da T.G. Carter: "In practice, it is difficult, if not impossible, to generate a sufficiently, reliable model of ground conditions that prediction can be carried out with 100 % certainty".

Le indagini preliminari per il progetto e l'esecuzione delle gallerie profonde non differiscono da quelle messe a punto per le opere sotterranee in genere. Tuttavia si può affermare che l'applicazione delle usuali tecniche di prova alle gallerie profonde presenta difficoltà via via crescenti con l'aumentare delle profondità massime di indagine.

Queste difficoltà crescenti sono soprattutto rilevabili nella caratterizzazione dell'ammasso roccioso per mezzo delle prove in sito.

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 e sullo stato di sollecitazione originario.

Nel seguito saranno presentate le tecniche di tipo geofisico e geomeccanico utilizzate per le indagini preliminari evidenziando le loro caratteristiche applicative più significative. Per quanto riguarda invece le indagini geologiche, si rimanda a (B. Pigorini, Mir 1986).

2.1 Indagini in superficie

2.1.1 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 rappresentata dai diversi orizzonti riflettenti. Nella successiva fase di interpretazione si ricava una sezione geologica stratigrafico-strutturale dei terreni indagati (fig. 2).

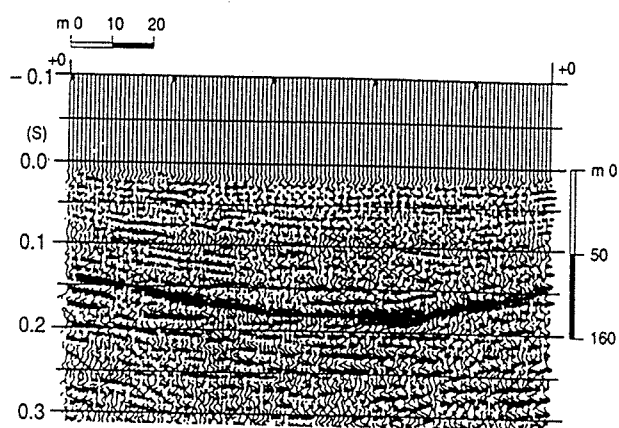


Fig. 2 - Rilevamento sismico a riflessione ad alta risoluzione di un bacino idroelettrico: la fascia scura evidenzia il contatto col substrato roccioso.

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.

2.1.2 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 elastiche più 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.

2.2 Indagini in foro di sondaggio

I sondaggi rappresentano il metodo classico per la determinazione diretta delle successioni stratigrafiche in sito, per il prelievo di campioni da analizzare in laboratorio e per raggiungere le profondità a cui eseguire prove in sito o posare la opportuna

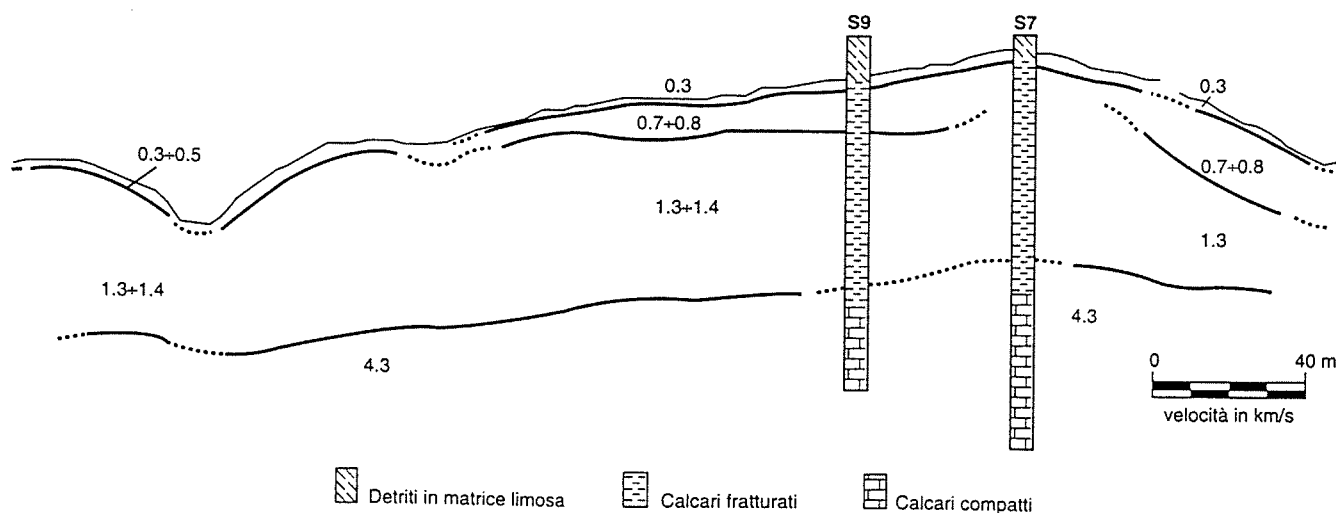


Fig. 3 - Ricostruzione stratigrafica mediante sismica a rifrazione ad alta risoluzione e confronto con i sondaggi meccanici.

strumentazione di monitoraggio geotecnico.

L'esecuzione di indagini a profondità elevata (200 + 1000 m) comporta tuttavia una serie di problematiche tecniche e tecnologiche che in generale comportano:

- utilizzo di macchine e componenti per la movimentazione delle attrezzature di prova di elevata potenza in grado di sopportare sollecitazioni maggiori e quindi aventi anche cavi e/o aste dimensionati per tale maggiore impegno;
- utilizzo di elettronica sofisticata che mantenga la sua operatività anche a temperature elevate, dovendo tenere conto dell'aumento di temperatura con la profondità per il gradiente geotermico naturale ed alla eventuale presenza di gradienti termici anomali;
- aumento del batente idraulico e quindi utilizzo di sonde per le indagini capaci di resistere a pressioni maggiori; inoltre per le prove per le quali si prevede l'utilizzo di un fluido in pressione, questa pressione dovrà essere maggiore sia per annullare il battente sia per annullare le maggiori perdite di carico in una tubazione più lunga, sia per la presenza di sollecitazioni naturali più elevate;
- maggiore sofisticazione dell'elettronica di alimentazione e trasmissione dei segnali;
- necessità di dover raggiungere il sito di indagine con attrezzature voluminose e pesanti che necessitano mezzi di trasporto idonei.

Ciò premesso, si prendono in esame le tecniche di indagine e di prova da utilizzare dei fori.

2.2.1 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;
- determinazione dell'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 con-

sente, mediante una successiva elaborazione dei dati con calcolatore, di ottenere la giacitura delle fratture rilevate, nonché di valutare l'apertura delle discontinuità (figg. 5 e 6).

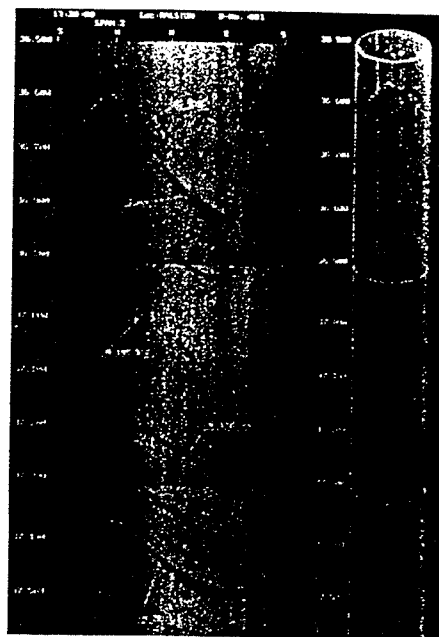


Fig. 4 - Immagine della parete di un foro ottenuta mediante sonda TV a colori ad alta definizione. È visibile a sinistra la sviluppata della superficie del foro e a destra la ricostruzione della carota.

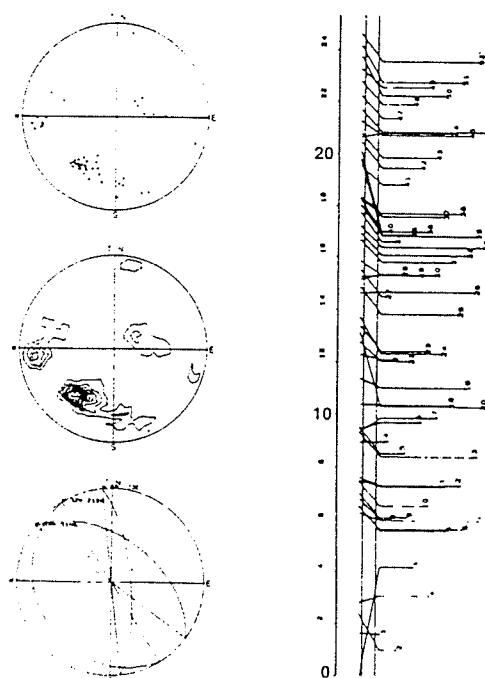


Fig. 5 - Proiezione polare e aree di isodensità delle discontinuità, ciclografiche del sistema di discontinuità su diagrammi equiareali di Schmidt; sezione del foro con tracce delle discontinuità.

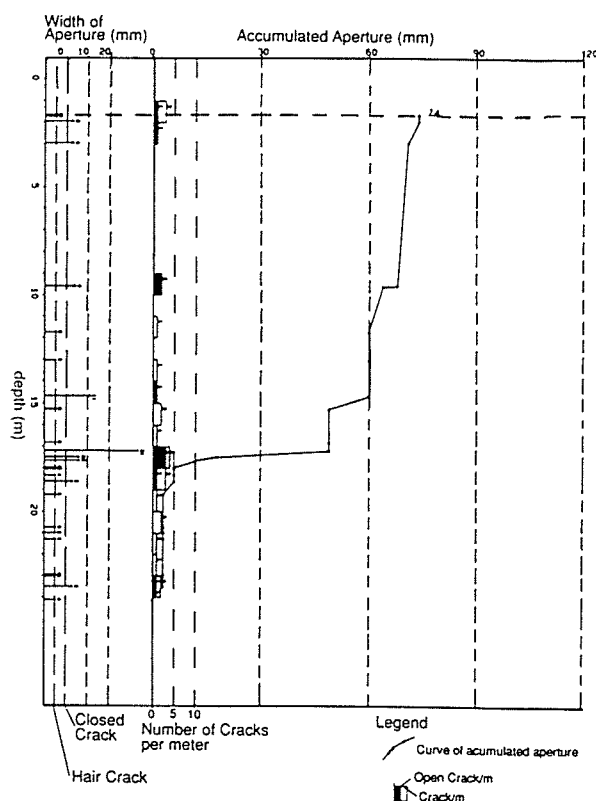


Fig. 6 - Frequenze e curve cumulative delle discontinuità

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.

2.2.2 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.

Con questo metodo si ottengono informazioni dettagliate sulla natura delle rocce, limitate tuttavia ad una zona corticale del foro.

2.2.3 Rilievi geofisici "down-hole" e "up-hole"

Il metodo down-hole viene largamente usato per la determinazione della velocità di propagazione delle onde elastiche sia longitudinali che trasversali allo scopo di caratterizzare terreni e rocce. Il principio consiste nella generazione di onde elastiche in superficie, nelle vicinanze del foro, e nella misura dei tempi di propagazione dei vari tipi di onde ricevuti a diverse profondità all'interno dello stesso. I tempi di percorso vengono quindi rappresentati in funzione della profondità e la pendenza della curva così ottenuta rappresenta la velocità di propagazione.

Per misure relativamente superficiali la sorgente può essere costituita da impattatori meccanici. Per raggiungere elevate profondità è necessario l'uso di esplosivo.

Per la ricezione delle onde vengono usati geofoni tridirezionali.

Un sistema molto simile al metodo down-hole è il metodo up hole. In questo caso la posizione della sorgente e del ricevitore risultano invertite: infatti mentre la prima è situata nel foro, il secondo viene tenuto in superficie. Questo metodo è di più difficile applicazione rispetto al down hole in quanto è più complicato generare onde trasversali ben polarizzate sul fondo di una perforazione.

Queste due tecniche consentono di eseguire indagini in volumi di roccia maggiori rispetto ai rilievi di carotaggio sonico, offrendo tuttavia un dettaglio minore.

2.2.4 Misura dello stato di sollecitazione originario mediante fratturazione idraulica

Le condizioni topografiche variabili, la complessa struttura degli ammassi rocciosi e la presenza di spinte tettoniche spesso non consentono di fare previsioni affidabili in merito allo stato tensionale esistente nell'ammasso roccioso prima dello scavo. In qualche caso (terreni con superficie pianeggiante) è lecito assumere che la componente di tensione verticale sia litostatica, ovvero sia uguale al prodotto della densità media delle rocce di copertura per la profondità. Le componenti di tensione orizzontali, però, sono sempre imprevedibili, potendo avere anche intensità molto maggiore di quella verticale.

Risulta quindi estremamente utile misurare in sito lo stato di sollecitazione originario utilizzando una tecnica che consenta di operare in sondaggi verticali anche a considerevole profondità. Il metodo della fratturazione idraulica è particolarmente adatto per la misura dello stato tensionale originario prima dello scavo di un qualunque accesso al sotterraneo, potendo essere applicato senza particolari complicazioni in sondaggi molto profondi.

La profondità alla quale si vuole misurare lo stato tensionale viene raggiunta attraverso un sondaggio meccanico verticale. Nel tratto prescelto si eseguono poi alcune prove di fratturazione idraulica: mediante un'apposita sonda costituita da un doppio packer gonfiabile (fig. 7) si isola un tratto di foro nel quale viene iniettato un fluido a portata costante. Avvalendosi di trasduttori di pressione di fondo foro e di un'unità di acquisizione e registrazione dati, si traccia in tempo reale il grafico della pressione nella cavità di prova. L'andamento di tale grafico (fig. 8) evidenzia un picco di pressione P_c richiesto per provocare la rottura a trazione della roccia intorno al foro, la pressione P_s necessaria a mantenere la frattura aperta in condizione di equilibrio con lo stato tensionale originario e la pressione P_r necessaria a riaprire la frattura con successivi cicli di pressurizzazione.

Al termine delle prove, dopo avere estratto la sonda di fratturazione, viene calata un'attrezzatura costituita da una guaina di gomma munita di una bussola elettronica (packer ad impressio-

ne) che permette di rilevare l'orientazione della frattura prodotta.
A partire dai dati così ottenuti (valori di pressione caratteristici ed orientazioni delle fratture) viene calcolato lo stato tensionale originario.

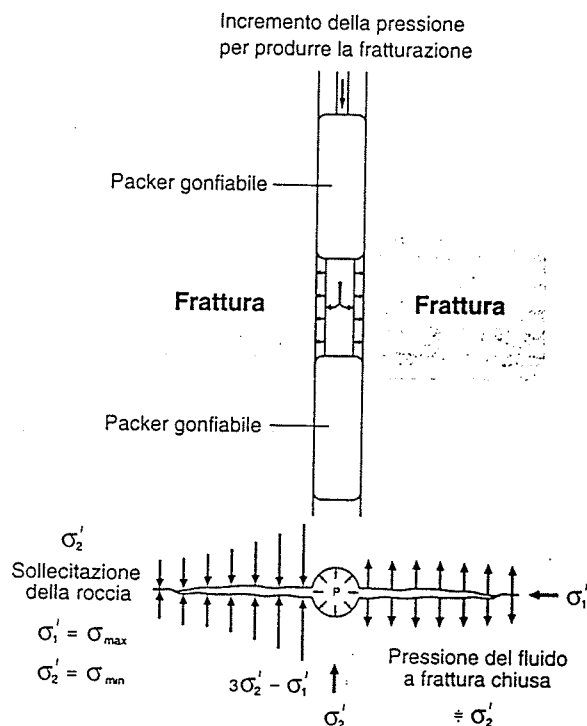


Fig. 7 - Schema della prova di fratturazione idraulica per la misura dello stato di sollecitazione originario.

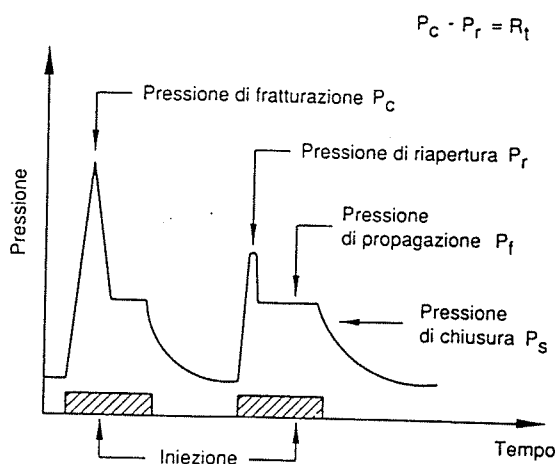


Fig. 8 - Diagramma tipo pressione-tempo rilevato nel corso di una prova di fratturazione idraulica.

Recenti esperienze dell'ISMES indicano che è possibile effettuare una determinazione di stato tensionale originario con sufficiente accuratezza anche in condizioni di roccia fratturata e con un numero esiguo di prove a notevole profondità. La fig. 9 mostra il risultato di una misura effettuata in un sondaggio verticale, in una formazione appenninica di calcari e marne fratturati, alla profondità di 500 m: per ottenere tale risultato sono state sufficienti 5 prove di fratturazione idraulica.

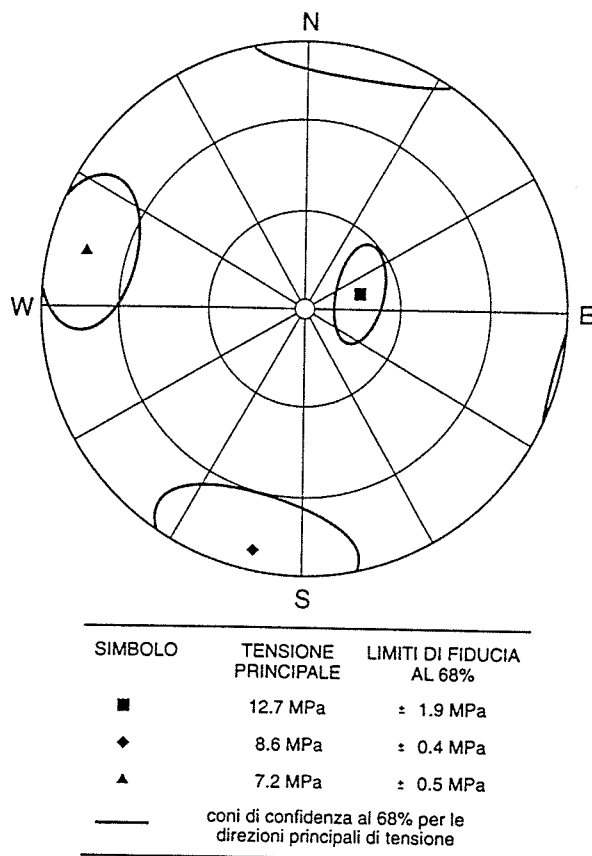
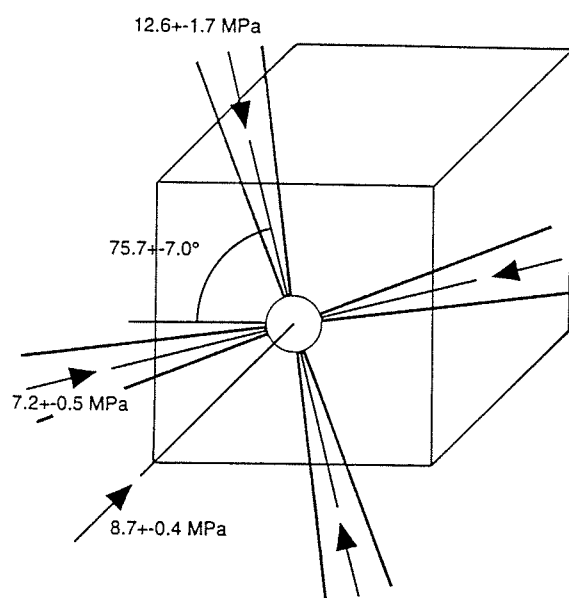


Fig. 9 - Risultato di una determinazione di stato tensionale originario effettuata in un sondaggio verticale a 500 m di profondità. Sulla proiezione di Schmidt sono rappresentate le direzioni principali di tensione ed i relativi coni di confidenza. Per ottenere il tensore degli sforzi sono state sufficienti 5 prove.

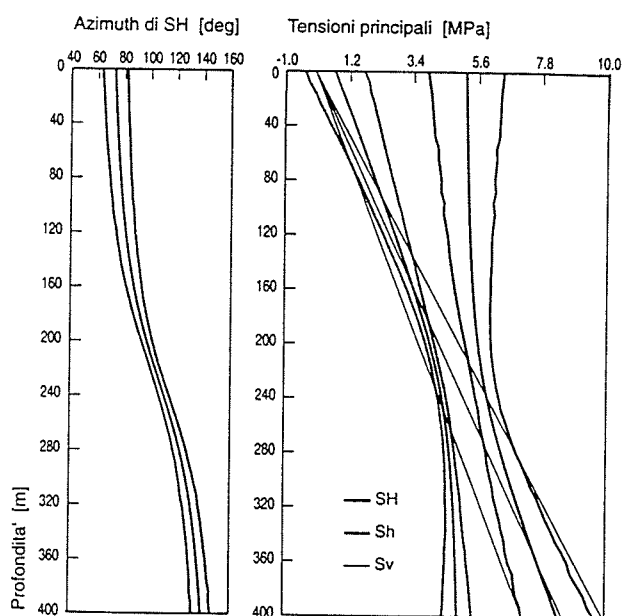
Nel caso delle gallerie la misura di stato tensionale originario può essere poi elaborata per ottenere il tensore degli sforzi in un sistema di riferimento solidale con lo scavo (fig. 10), permettendo così di utilizzare il risultato per eseguire calcoli statici che adottano la consueta schematizzazione piana.

Se più prove sono eseguite a diversa profondità è possibile determinare l'andamento dello stato tensionale originario in funzione della profondità, ovvero il campo tensionale originario (Cornet e Valette, 1984). La fig. 11 illustra il risultato di una determinazione del campo tensionale originario effettuata dall'ISMES in una zona dell'Appennino Tosco-Emiliano. Per ottenere tale risultato sono state effettuate 13 prove a profondità variabile tra 150 m e 300 m.



ORIENTAZIONE GALLERIA: 25°

Fig. 10 - Proiezione del tensore degli sforzi originario rappresentato in figura 9 sul sistema di riferimento solidale con la galleria.



Sv : componente verticale
SH : componente orizzontale massima
Sh : componente orizzontale minima
L'azimuth di SH e' riferito al NORD

Sono rappresentati l'andamento medio e i limiti di fiducia al 68%

Fig. 11 - Risultato di una determinazione di campo tensionale originario. Il grafico è stato ottenuto con l'interpretazione di 13 prove di fratturazione idraulica effettuate a profondità variabile tra 150 m e 350 m.

Poiché la presenza di giunti naturali preesistenti può diventare spesso utile ai fini della prova, la fratturazione idraulica si sta rivelando un metodo molto versatile per la misura dello stato tensionale in situ, essendo adatto anche a rocce deboli, fratturate e di scadente qualità meccanica (Crivelli e al. 1993a, Devin e al. 1993).

Il principale inconveniente di questa tecnica sta nella necessità di calare e riestrarre dal foro il packer ad impressione per ciascuna prova di fratturazione eseguita. Se la roccia è debole ed il foro instabile può accadere 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 è destinata ad innovare la tecnica rendendola ancora più economica ed ampliandone ulteriormente il campo di applicabilità.

2.2.5 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. 12 sono illustrati i due schemi di prova.

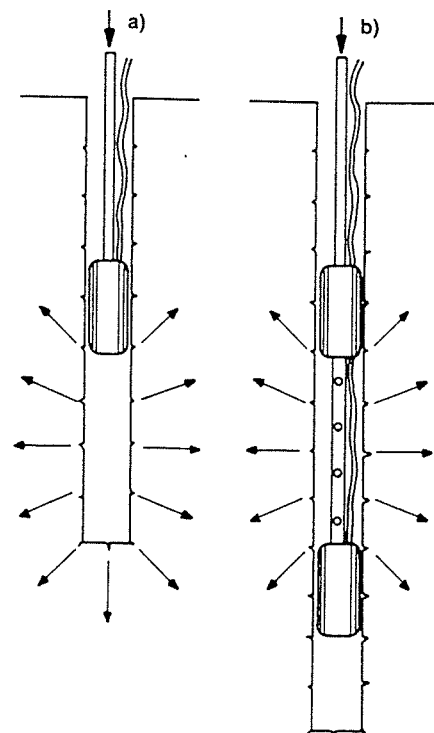


Fig. 12 - Prova di permeabilità in foro di sondaggio:
a) prova a fondo foro b) prova con doppio packer.

Una variante più 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. 13). 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.

2.2.6 Determinazione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso

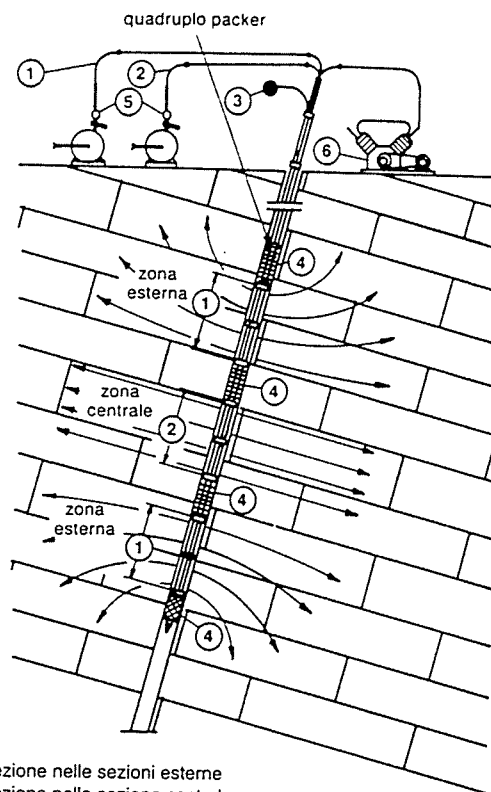
2.2.6.1 Prove in sito

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. 14), 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.

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.



1. iniezione nelle sezioni esterne
2. iniezione nella sezione centrale
3. rilevamento della pressione nella zona centrale
4. packers
5. flussometro
6. compressore

Fig. 13 - Prova di permeabilità in foro con quattro packers.

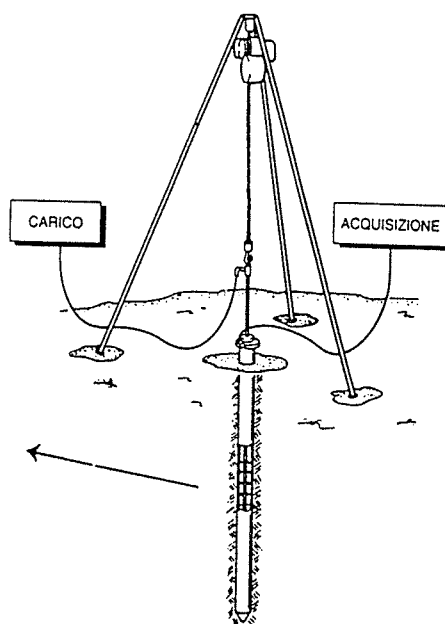
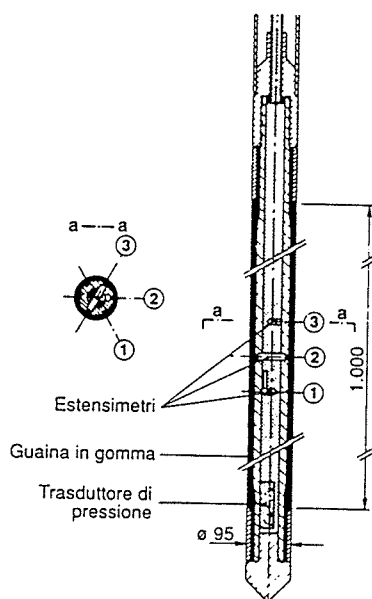


Fig. 14 - Schema della sonda dilatometrica per fori di diametro 75 mm o 100 mm.

I valori dei moduli rilevati con il dilatometro possono risultare di conseguenza superiori a quelli effettivi della massa rocciosa ed essere invece più prossimi a quelli corrispondenti alla matrice rocciosa.

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.

In fig. 15 è riportato un esempio di rappresentazione dei risultati di varie indagini effettuate in un foro di sondaggio dalla profondità di 150 m fino a circa 200 m.

2.2.6.2 Prove di laboratorio

Le prove di laboratorio sono eseguite su campioni di roccia singolarmente "omogenei". Per quanto ne riguarda l'importanza giova citare (Hoek - Brown, 1980) "..., it must be remembered that the quantity and quality of experimental data decrease rapidly as one moves from the intact rock sample to the rock mass. ... small sample of intact rock are easy to collect and to test under a variety of laboratory conditions, ...".

L'obiettivo immediato dell'esecuzione di prove di laboratorio è quello di fornire la caratterizzazione fisico-meccanica della roccia intatta. Tale caratterizzazione del materiale roccioso intatto sarà necessaria al fine di ottenere la caratterizzazione fisico-meccanica dell'ammasso roccioso unitamente alla esecuzione delle altre caratterizzazioni ed indagini di tipo geologico e geomeccanico effettuate in situ.

La stabilità dell'ammasso roccioso sovrastante la galleria è valutabile per mezzo di differenti tecniche utilizzando il metodo delle linee caratteristiche, o meglio, per mezzo di modelli numerici agli elementi finiti o discreti bi- e tridimensionali. Tuttavia,

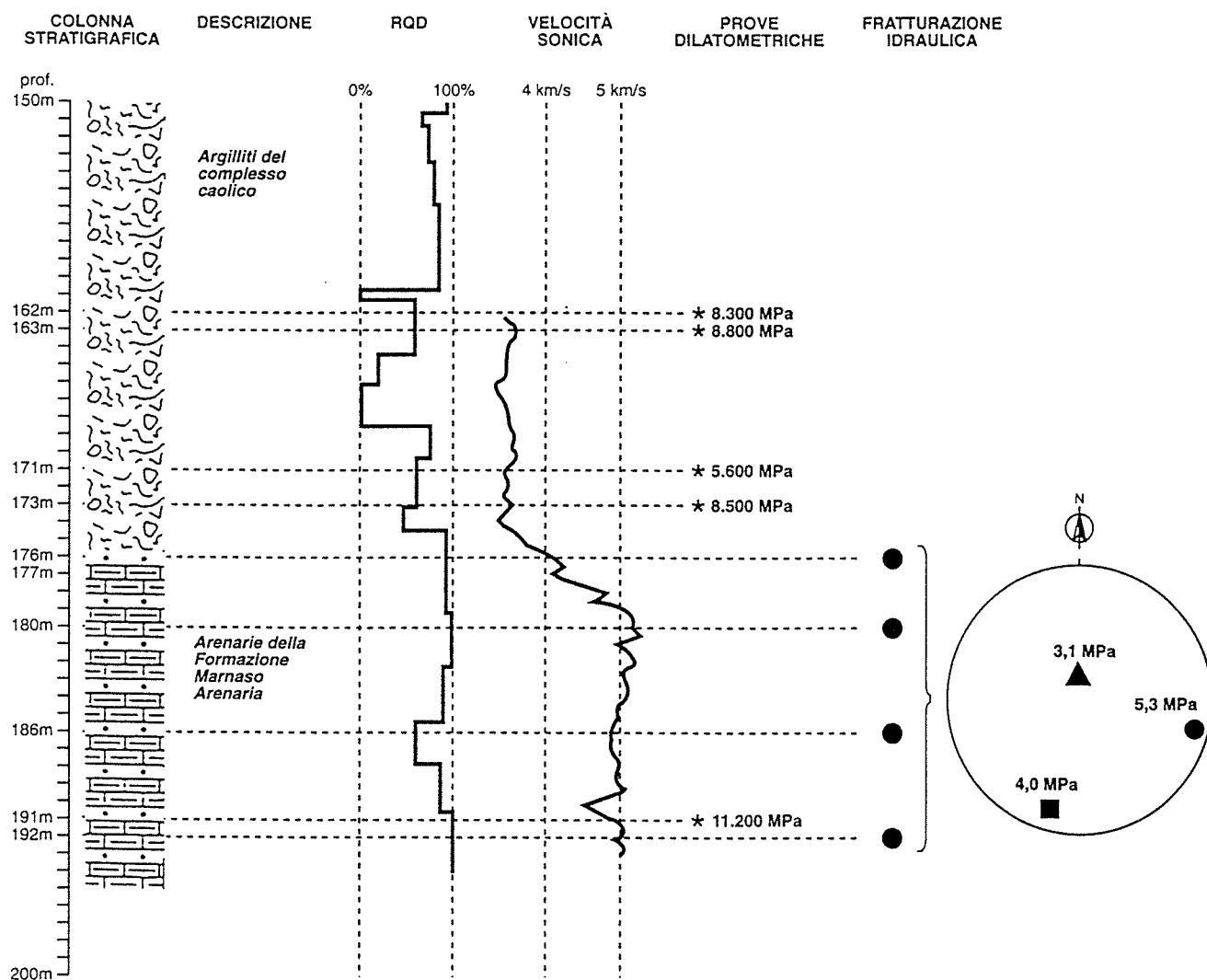


Fig. 15 - Quadro riassuntivo dei risultati delle prove in un foro.

come si è evidenziato, i parametri che sono utilizzati dai diversi metodi di calcolo derivano da una caratterizzazione dell'ammasso che può essere eseguita a seguito di una caratterizzazione del materiale intatto e dell'analisi stratigrafica e geostrutturale dell'ammasso. Tale approccio osservazionale ed empirico necessita di validazione ed affinamento immediati, da eseguirsi mediante la caratterizzazione meccanica in sito dell'ammasso, e successivi, durante la fase di scavo che possono essere eseguiti con la tecnica della back analysis alla quale si accenna al cap. 5.

Sarebbe tuttavia riduttivo evidenziare l'importanza delle prove in laboratorio solo come mezzo per arrivare ad una caratterizzazione fisico-meccanica dell'ammasso. Infatti le prove di laboratorio hanno una loro ulteriore necessità previsionale per quanto riguarda lo scavo sia con macchine, dal martello demolitore alla fresa a piena sezione (Innaurato et al., 1990), sia per quanto riguarda lo scavo con esplosivo (Berta, 1989); esse tuttavia non possono essere considerate, tranne in rari casi, esauritive della fase di indagine.

Finora è stata evidenziata l'importanza e la necessità di eseguire una caratterizzazione di laboratorio per mezzo di prove soprattutto di tipo fisico-meccanico; una particolare attenzione deve però essere dedicata alla caratterizzazione mineralogica e meccanica per quanto riguarda le rocce rigonfianti e facilmente alterabili per esposizione all'aria e all'acqua. Talvolta la classificazione mineralogica del campione può non essere sufficiente a giustificare un comportamento rigonfiante del materiale. A titolo di esempio si considerino rocce marnoso-calcaree tipiche dell'Appennino Abruzzese che possono presentare talvolta strutture tipo "en-échelon" con microlithons di argilla il cui riconoscimento può avvenire per mezzo di analisi mineralogiche eseguite con microscopio ottico tradizionale ed elettronico a scansione, mentre la presenza quantitativa dei minerali argillosi può essere determinata per mezzo di diffrattometria ai raggi X. Tali presenze di minerali argillosi possono manifestare fenomeni di rigonfiamento che in taluni casi portano i campioni ad avere una pressione di rigonfiamento, misurata per mezzo di apparecchiatura edometrica, fino a 3 MPa per contenuti di argilla variabili tra il 10 e il 15 %.

In fig. 16 è rappresentata l'attrezzatura per eseguire prove di rigonfiamento. In fig. 17 è riportata una tabella nella quale, per le varie prove di laboratorio, sono indicate le differenti utilità.

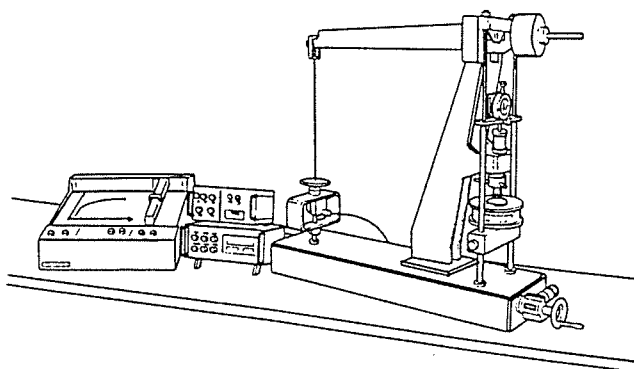


Fig. 16 - Attrezzatura per prova di rigonfiamento (Swelling Test).

Tipo di prova	Caratterizzazione dell'ammasso	Escavabilità	Studio del comportamento rigonfiante
descrizione petrografica macroscopica e di sezioni sottili	●	● ●	● ●
analisi spettrofotometrica all'infrarosso	●	○	● ●
analisi diffrattometrica ai raggi x	○	○	● ●
analisi modale di sezione sottile e coefficiente di tessitura	●	●	○
analisi calcimetrica	●	●	●
analisi al microscopio elettronico a scansione ed analisi chimica con microsonda a dispersione	○	○	● ●
analisi granulometrica di riempimenti	●	○	● ●
massa volumica apparente	●	●	●
massa volumica reale e porosità	●	●	●
contenuto d'acqua	●	●	● ●
edometriche per il rigonfiamento	●	● ●	● ● ●
slake-durability	○	●	● ●
point load	●	●	○
durezza mediante scleroscopi e martello di Schmidt	●	● ●	○
resistenza all'abrasione	○	● ●	○
velocità sonica	●	●	○
compressione monoassiale in controllo di carico o di deformazione	● ● ●	● ●	●
compressione triassiale in controllo di carico o di deformazione	● ● ●	●	●
trazione diretta	● ●	●	○
trazione indiretta	● ● ●	●	○
taglio diretto su giunto	● ● ●	●	○
tenacità della frattura metodo chevron bend e short rod	●	● ●	○
saggi di perforabilità (es. NCB cone indenter)	○	● ●	○
microdurezza knoop	○	● ●	○
saggi di abrasività (abrasività Cerchar ed usura Goodrich)	○	● ●	○

- marginale
 ● utile
 ● ● consigliato
 ● ● ● notevole

Fig. 17 - Prove di laboratorio finalizzate all'utilizzo secondo esigenze previsionali differenti e classificate secondo un criterio di utilità crescente.

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 o cella CSIRO) 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 coinvolgano 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

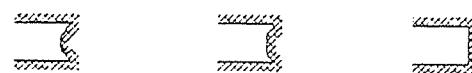
Le tecniche di sovracarotaggio comportano l'esecuzione di un foro a carotaggio continuo fino a raggiungere il punto della roccia dove si vuole effettuare la misura. Sul fondo del foro viene applicata una cella estensimetrica, incollata per mezzo di resine epossidiche. In un secondo tempo la cella viene 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.

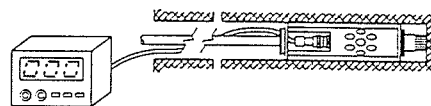
I metodi di sovracarotaggio (in Italia vengono usate principalmente la tecnica Doorstopper, fig. 18, e la Cella CSIRO, fig. 19) sono caratterizzati da sofisticate e laboriose procedure sperimentali. Affinchè forniscano risultati affidabili è inoltre necessario che il comportamento della roccia sia con 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 numero-

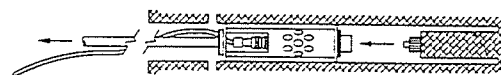
se prove al fine di ottenere un tensore degli sforzi originario rappresentativo alla scala dell'opera in progetto.



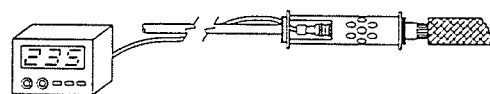
Spianatura del fondo del foro



Incollaggio della cella di misura e lettura di zero

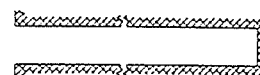


Rilascio delle sollecitazioni mediante sovracarotaggio

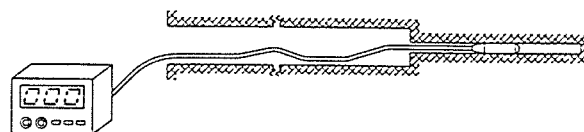


Incollaggio della cella di misura e lettura di zero

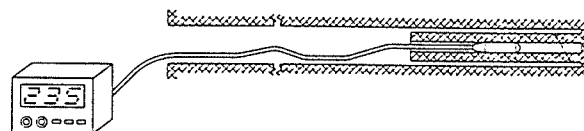
Fig. 18 - Fasi di prova per la misura dello stato di sollecitazione mediante tecnica "doorstopper".



Esecuzione foro iniziale e spianatura del fondo foro



Esecuzione foro minore, inserimento e incollaggio cella C.S.I.R.O.



Sovracarotaggio e lettura del rilascio delle tensioni



Estrazione del campione e prova dello stesso nella cella biassiale

Fig. 19 - Fasi di prova per la misura dello stato di sollecitazione mediante "cella CSIRO"

3.1.2 Tecnica di fratturazione idraulica

La tecnica della fratturazione idraulica è frequentemente applicata anche a partire da cunicoli sotterranei. Le differenze principali rispetto al caso dei sondaggi verticali profondi sono le seguenti:

- è possibile eseguire più sondaggi con orientazione anche diversa dalla verticale;
- i sondaggi hanno lunghezza limitata (tipicamente 15-25 m).

Effettuando più prove in sondaggi con diversa orientazione è allora possibile ottenere determinazioni dello stato tensionale originario molto accurate. La fig. 20 mostra il risultato di una campagna eseguita da un cunicolo prove (Crivelli et al, 1993a). Per conseguire tale risultato sono state utilizzate 15 prove in 4 sondaggi con diversa orientazione. L'accuratezza del risultato può essere messa in luce comparando i limiti di fiducia rappresentati nella fig. 9 con quelli di fig. 20.

Operando da aditi sotterranei, per diminuire il costo della determinazione, può essere adottata un'attrezzatura particolarmente leggera e maneggevole recentemente sviluppata (MINI-FRAC), che opera in fori di piccolo diametro (38 mm), i quali possono essere anche eseguiti a distruzione. I risultati ottenuti sono del tutto raffrontabili con quelli delle attrezzature convenzionali più pesanti.

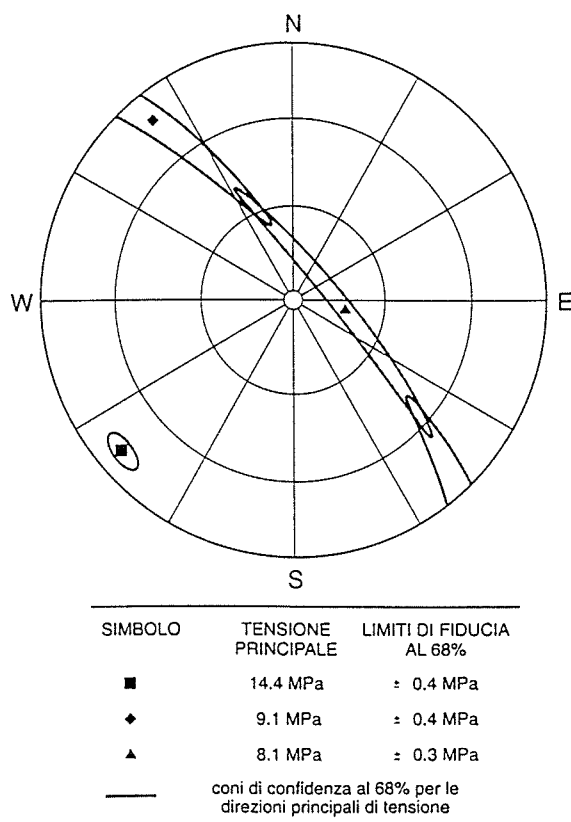


Fig. 20 - Risultato di una determinazione di stato tensionale originaria effettuata a partire da un cunicolo sotterraneo. Sulla proiezione di Schmidt sono rappresentate le direzioni principali di tensione ed i relativi coni di confidenza. Il risultato si riferisce all'elaborazione di 15 prove effettuate in 4 diversi sondaggi.

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.

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.

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. 21, che è realizzata in parti componibili e permette l'adattamento a cunicoli di diverso diametro.

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 multibase. 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. 22 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.

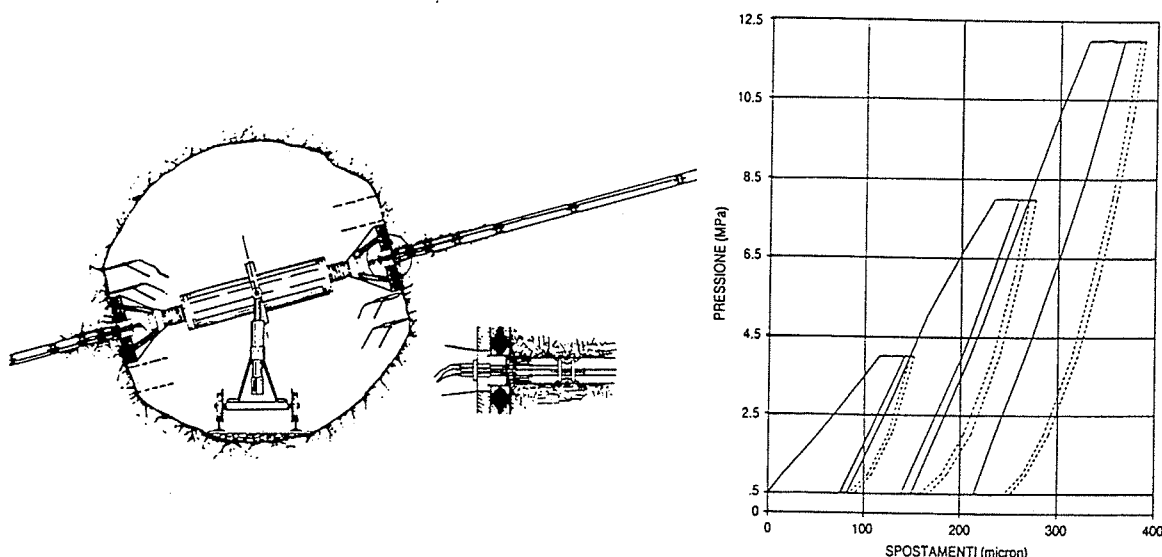


Fig. 21 - Schema della prova di carico su piastra eseguita all'interno di un cunicolo esplorativo e diagramma tipo carichi-deformazioni rilevato al centro di una piastra di carico di diametro 50 cm su un ammasso roccioso calcareo.

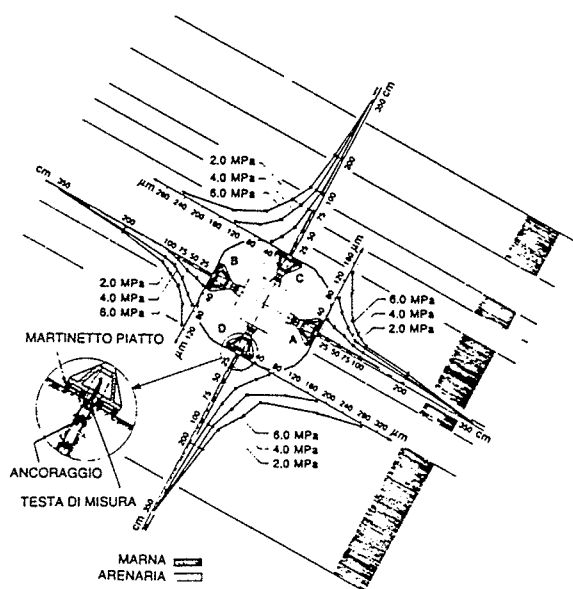


Fig. 22 - Diagrammi delle deformazioni in funzione della profondità rilevate su un ammasso roccioso anisotropo mediante prove di carico su piastra (formazione marnoso-arenacea).

3.3 Rilievi di tipo geofisico

3.3.1 Rilievi di microrifrazione ad alta risoluzione in parete

Scopo di questi rilievi, tecnicamente simili a quelli di rifrazione ad alta risoluzione dalla superficie ma interessanti una scala diversa, è quello di valutare lo spessore di roccia interessato da fenomeni di rilascio causati dallo scavo del cunicolo e di valutare le caratteristiche elastiche delle rocce in termini di velocità di propagazione delle onde longitudinali.

3.3.2 Rilievi di tomografia sonora

Questi rilievi costituiscono un'evoluzione delle misure di cross-hole sonico, che consiste nelle misure della velocità di propagazione delle onde elastiche tipicamente tra due fori.

La tomografia sonora richiede l'esecuzione di un elevato numero di misure del tempo di propagazione delle onde soniche (onde P) lungo percorsi a diversa inclinazione che mutualmente si incrociano su sezioni piane. Scopo di questa fitta rete di misure è quello di ottenere la distribuzione della velocità sonica (campo di velocità) in tali sezioni. Il campo di velocità è ricavato per mezzo di procedimenti di calcolo analoghi a quelli utilizzati nella diagnosi medica con la tecnica della T.A.C. (Tomografia Assiale Computerizzata), che utilizza i raggi X e ne calcola il campo di attenuazione.

Noti tutti i tempi di percorso, per la determinazione del campo di velocità nelle sezioni indagate viene utilizzato un programma di calcolo che, partendo da un modello iniziale, ricostruisce iterativamente il campo di velocità con un procedimento S.I.R.T. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique), riducendo progressivamente lo scarto fra i tempi misurati lungo i diversi percorsi e quelli calcolati, questi ultimi ottenuti considerando il campo di velocità del modello determinato ad ogni iterazione.

La rappresentazione finale dei dati è generalmente costituita da mappe che riportano, per esempio con colori diversi, campi di velocità differenti.

Questa tecnica di prova è applicata per ottenere un'informazione qualitativa delle caratteristiche elastiche dell'ammasso roccioso.

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 costi-

tuito 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 e assoluti

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. 23 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 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. Con tale strumentazione sono generalmente eseguite solo misure relative (con precisione che, a seconda dello strumento, vanno da $1 \cdot 10^{-6}$ a $1 \cdot 10^{-5}$ volte la lunghezza misurata, che può raggiungere 30 ± 50 m).

Per la misura delle deformazioni radiali e assiali sulla superficie laterale della galleria sono oggi disponibili anche interessanti tecniche di misura di tipo ottico "senza contatto" che con-

sentono di raggiungere precisioni dell'ordine di $0,3-0,5$ mm.

In pratica le misure di convergenza sono effettuate mediante un teodolite elettronico munito di distanziometro. Per il calcolo del punto della stazione libera è necessario disporre da 6 a 10 riferimenti fissi che possono essere situati fino a 250 m di distanza (fig. 24). Il metodo consente di determinare la posizione assoluta nello spazio di nuovi punti di riferimento (situati per esempio nella zona del fronte di scavo) e di misurarne le componenti di spostamento secondo tre direzioni tra loro ortogonali. Con tale metodo si riescono ad effettuare misure di convergenza senza interferire con le operazioni di scavo.

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 tuttavia 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. 25.

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". Lo strumento, illustrato nello schema di fig. 26, prevede l'installazione di una catena di basi estensimetriche della lunghezza di 1 m ciascuna realizzate in PVC con ancoraggi metallici cementati entro un foro di diametro non inferiore a 100 mm.

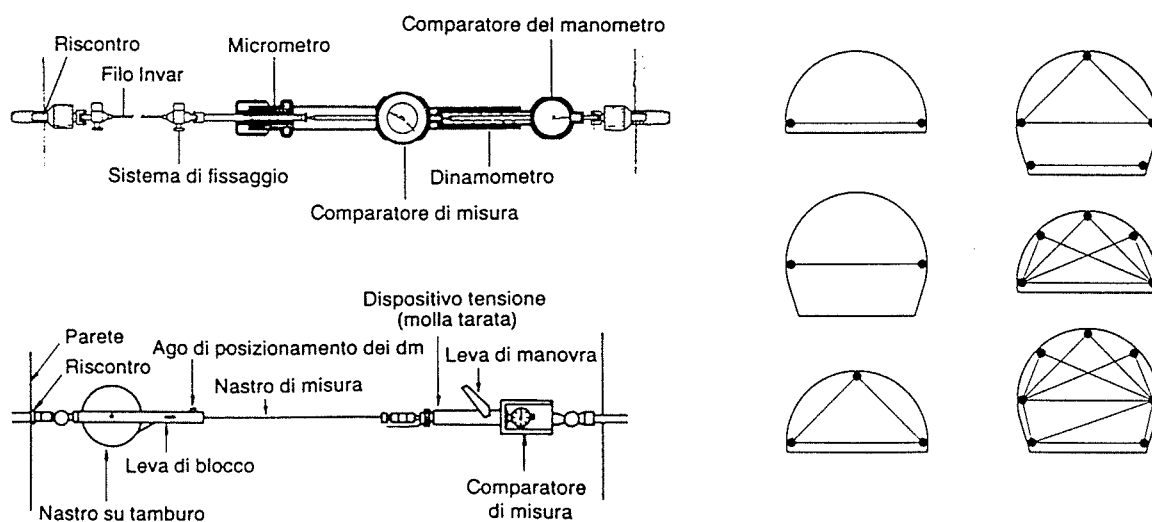


Fig. 23 - Distometro per misure di convergenza e schemi tipo delle basi di misura.

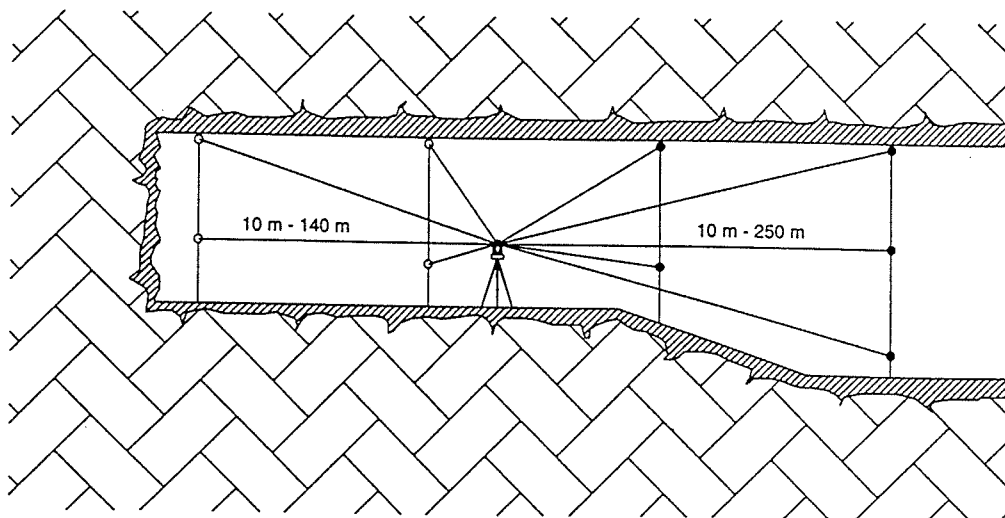


Fig. 24 - Schema di utilizzo di un teodolite con distanziometro per eseguire misure di convergenza; a destra dello strumento sono schematizzati i punti fissi di riferimento, a sinistra quelli monitorati durante le fasi di scavo.

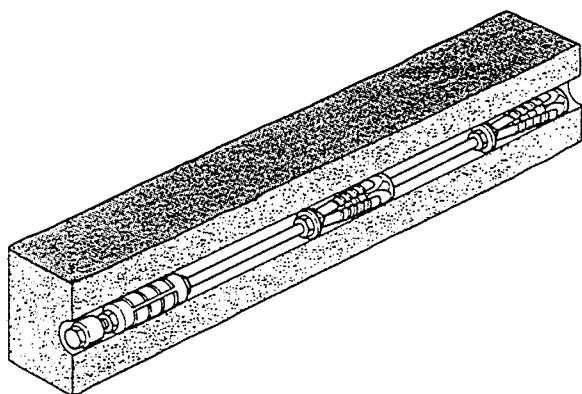


Fig. 25 - Estensimetro meccanico a due basi di misura.

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 (0,003 mm/m).

Una versione più recente e più economica di questo strumento (Sliding Deformeter) 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.

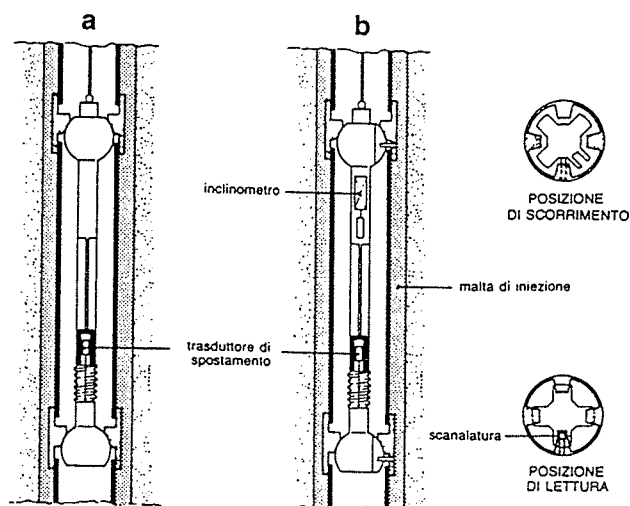


Fig. 26 - a) Estensimetro rimovibile (Sliding Micrometer - ISETH)

b) Estenso-inclinometro rimovibile (TRIVEC) per la misura delle 3 componenti di spostamento.

In fig. 27 sono illustrati alcuni schemi tipo di misure con sonde estensimetriche. A questi schemi si possono aggiungere anche le misure eseguite parallelamente all'asse della galleria a partire dal fronte di scavo. Queste misure risultano particolarmente indicate nel caso di fronti instabili, e consentono la continuità delle misure nella fase di avanzamento dello scavo, avendo cura di ripristinare dopo ciascun abbattimento la funzionalità della tratta restante della linea di misura.

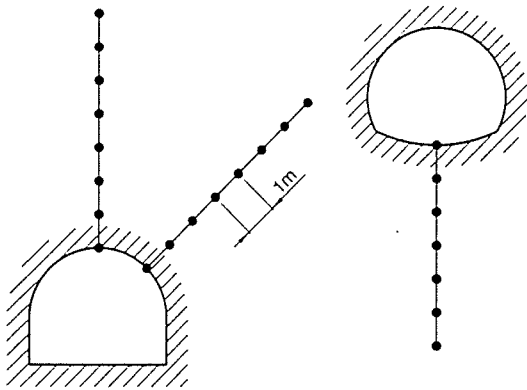


Fig. 27 - Schemi tipo di misura delle deformazioni nell'intorno dello scavo mediante estensimetro rimovibile (ISETH).

4.2 Controllo del comportamento del rivestimento definitivo

Le misure di controllo di cui al precedente punto 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 agli elementi finiti e agli 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 Deformometer di piccolo diametro) e basi di misura distometriche e viene valutato lo stato di sollecitazione originario. Poiché 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. 28, consente quindi di valutare i parametri meccanici globali all'ammasso roccioso attraverso una operazione di back-analysis che risulta di elevata affidabilità.

A) Fratturazione idraulica ($\varnothing$ 38 mm)

B) Sliding deformometer ($\varnothing$ 56 mm)

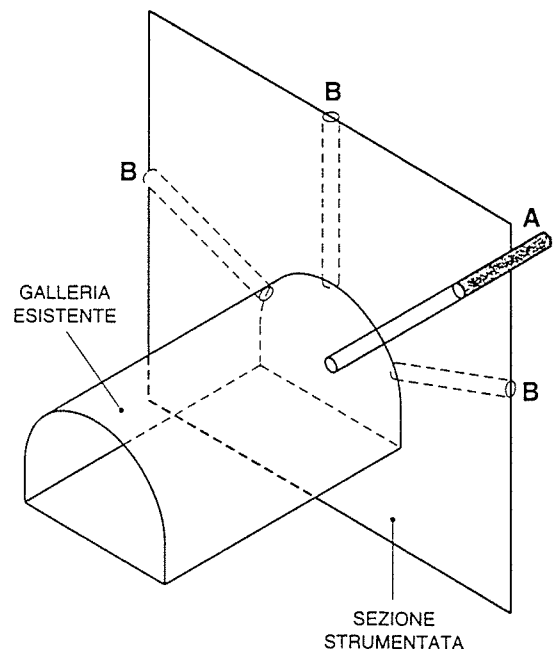


Fig. 28 - Sezione tipo di misura per back-analysis con l'indicazione delle perforazioni per l'installazione degli estensimetri multibase (Sliding Deformometer) e per l'esecuzione delle prove di fratturazione idraulica con MINIFRAC.

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. Zürich.
- BERTA G. (1989). L'esplosivo strumento di lavoro, Italesplosivi, Milano.
- BROWN E.T. (1981). ISRM - Suggested Methods Rock Characterisation, Testing and Monitoring, Pergamon Press, Oxford
- CARTER T.G. (1992). Prediction in geological engineering and rock mass characterisation assessments. MIR '92, n.1.
- 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., ROSSI P.P., SUPERBO S. (1990). Prove e misure in sito su rocce tenere, MIR '90, n. 5.
- 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. (1993b) Determinazione della deformabilità degli ammassi rocciosi con prove dilatometriche. Rivista Italiana di Geotecnica. Anno XXVII, n. 2.
- DEVIN P. (1986). Strumentazione speciale per la misura degli spostamenti all'interno di un foro di sondaggio. XVI CNG, Bologna.
- 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. MIR '86, n. 7
- HOEK E., BROWN E.T. (1980). Underground Excavations in Rock, Institution of mining and Metallurgy, London.
- 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.
- INNAURATO N., MANCINI R., RONDENA E., ZANINETTI A. (1990). Una applicazione alla classificazione delle rocce alla fresabilità delle stesse. Boll. Ass. MIN. Subalp., 13, pp. 73 - 98.
- 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.
- PIGORINI B. (1986). Studio geologico per l'esecuzione di gallerie, MIR '86, n. 1.
- ROSSI P.P. (1990). Le indagini sperimentali per le caratterizzazioni degli ammassi rocciosi. Bollettino ISMES n. 277.

SUMMARY

In this paper the most important in situ techniques and laboratory tests performed for both characterisation of rock and rock mass, involved by deep tunnel projects and excavation, are described.

Useful information can be given by geophysical methods and geological surveys not only during preliminary studies but also during the excavation works.

Most attention is given for in situ techniques utilised in boreholes for the measurement of the natural state of stress, its variation in function of depth and the determination of deformability characteristics of rock masses.

At last the measurements and monitoring techniques as useful tools for back analysis calculations during excavations are presented.