Premessa alla traduzione delle Raccomandazioni ISRM per la determinazione in sito della deformabilità della roccia

La conoscenza delle caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso riveste una grande importanza per una razionale progettazione di qualsiasi tipo di galleria o di altra opera sotterranea e diviene un dato fondamentale per una economica progettazione delle strutture di sostegno e di rivestimento. Le due Raccomandazioni dell'ISRM, qui di seguito presentate in versione italiana, offrono una esauriente casistica delle metodologie di prova applicabili nella pratica corrente, la maggior parte delle quali sono in uso da ormai molti anni in Italia. Le prove oggetto delle Raccomandazioni interessano volumi di roccia notevolmente diversi (dell'ordine di 0.10 m^3 per le prove dilatometriche, 5 m^3 per le prove di carico su piastra e fino a 1000 m^3 per le prove di camera idraulica), ma nel contempo comportano costi esecutivi altrettanto differenti.

Anche i rispettivi campi di applicazione sono diversi, ed è facile immaginare come solo la prova dilatometrica possa essere proposta per le indagini preliminari dalla superficie per il progetto di opere a grande profondità (fino a 500 m), mentre le altre prove sono utilizzabili solo per le piccole profondità o per prove da cunicoli esplorativi.

La traduzione non ha comportato problemi particolari, se si esclude la difficoltà di riuscire a rendere in un italiano possibilmente scorrevole un conciso ed essenziale linguaggio tecnico inglese.

La terminologia tecnica italiana relativa alle prove esiste ed è abbastanza consolidata. Si è solo riscontrata una certa confusione, nei testi originali, sull'uso dei termini inglesi «displacement» e «deformation»: pertanto in italiano si è utilizzato il termine «spostamento» per indicare le variazioni di posizione o di lunghezza (ΔL), mentre a «deformazione» si è dato il significato classico della scienza delle costruzioni ($\Delta L/L$).

Il curatore della traduzione
PIERRE DEVIN - ISMES Spa

l'uso di un dilatometro dalle elevate prestazioni per fratturare la roccia dura (metodo della fratturazione radiale, [5]).

Determinazione in laboratorio della resistenza a trazione e del modulo di elasticità a trazione mediante l'uso di un dilatometro per pressurizzare dall'interno cilindri di roccia integra [6]. Queste misure possono servire nella misura dello stato di sollecitazione con metodi di sovracarotaggio.

Determinazione in situ delle proprietà di scorrimento plastico utilizzando un dilatometro dalle prestazioni relativamente elevate in rocce deboli o plastiche, quali le argilliti bituminose o le formazioni saline. In questi casi in fori di sondaggio possono essere eseguite sia prove di deformabilità a vari livelli di carico costante che prove di distensione effettuate a diversi livelli di deformazione [7, 8].

Determinazione in situ delle proprietà di resistenza a breve termine di rocce deboli in base alle curve non lineari pressione-volume ottenute, mediante un dilatometro dalle elevate prestazioni, sottoponendo la roccia ad una sollecitazione superiore al suo limite elastico. I metodi di interpretazione sono simili a quelli utilizzati per l'interpretazione dei risultati delle prove con dilatometro Ménard in terreni rigidi [9-11].

Raccomandazioni per la Determinazione delle Caratteristiche di Deformabilità mediante un Dilatometro Flessibile con la Misura delle Variazioni di Volume

Scopo

1.(a)Per questa prova è utilizzata una sonda dilatabile (dilatometro) per applicare una pressione alla parete di un foro di sondaggio. La corrispondente variazione diametrale del foro (dilatazione) è determinata mediante misure della variazione di volume nella sonda. Le caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso in corrispondenza del dilatometro possono essere calcolate dalla relazione tra pressione e dilatazione.[1]

(b)In commercio esistono vari dilatometri di questo tipo. Questa Raccomandazione è basata principalmente sulla cella della «Colorado School of Mines (CSM)[2] [12, 13], che è una versione modificata della «Cylindrical Pressure Cell» (CPC) originariamente sviluppata da Panek [1] ed attualmente ancora in uso.

(c)I risultati di prove dilatometriche sono utilizzati per la valutazione della qualità della roccia e per il progetto di strutture, quali fondazioni, dighe, gallerie e caverne. La prova è particolarmente indicata per ottenere rapidamente una serie di indici in fori di sondaggio realizzati in rocce fragili, argillose o intensamente fratturate che consentono un limitato recupero di carote dai fori di sondaggio e forniscono carote non idonee alle prove di laboratorio.

(d)Il volume di roccia sottoposto a sollecitazione da una prova dilatometrica è generalmente piccolo in confronto a quello interessato da prove alternative, quali la prova di carico su piastra o di camera idraulica, sebbene esso sia maggiore di quello di un campione privo di giunti di una prova di laboratorio. Pertanto i valori di deformabilità ottenuti mediante dilatometro possono richiedere una correzione per tener conto dell'effetto scala e di quello relativo alla fessurazione [3, 4].

Attrezzatura

Attrezzatura per la perforazione e la preparazione del foro per le prove, comprendente:

2.(a) Una perforatrice o una sonda di perforazione per realizzare un foro per le prove avente il diametro necessario fino alla massima profondità prevista per le prove. Normalmente, perché le pareti del foro di sondaggio risultino lisce, è necessaria una attrezzatura per il carotaggio al diamante.

(b) Un rivestimento, quando necessario, per stabilizzare le pareti del foro di sondaggio al di fuori delle sezioni di prova.

(c) Un'attrezzatura e il materiale necessario per cementare e riperforare il foro di sondaggio in corrispondenza delle sezioni di prova [quando richiesto, vedi paragrafo 8(c)].

(d) Un sistema per la misura del diametro (per es. un cilindro dello stesso diametro della sonda) per controllare che il foro sia libero prima dell'inserimento del dilatometro.

3. *Attrezzatura di calibrazione* - Uno o più tubi di calibrazione dalle caratteristiche elastiche note, con diametro interno uguale a quello del foro per le

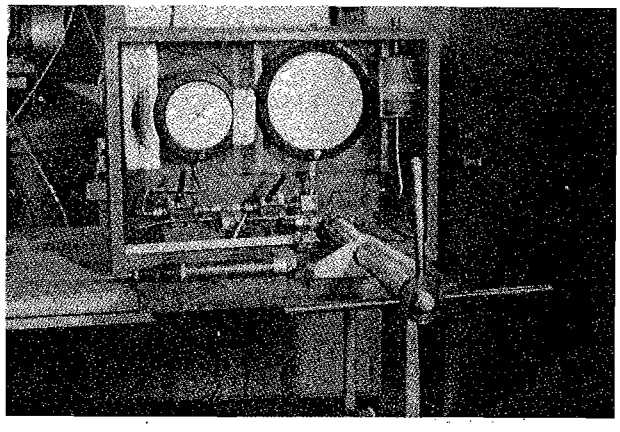

Fig. 1 - Dilatometro flessibile del tipo CSM.

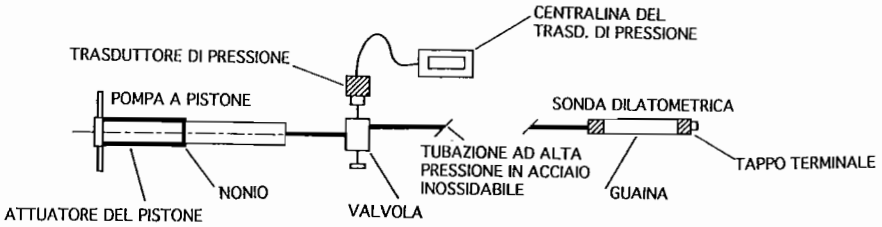

Fig. 2 - Componenti dell'attrezzatura dilatometrica del tipo CSM [13, 14].

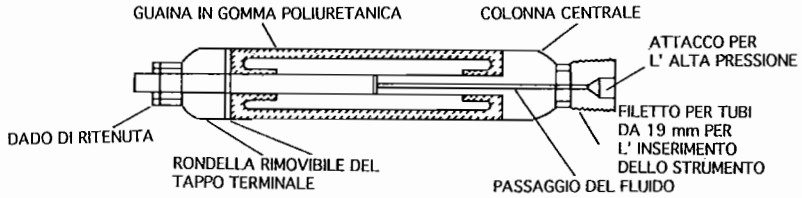

Fig. 3 - Sezione longitudinale di un'attrezzatura dilatometrica del tipo CSM [13, 14].

prove, e con lunghezza simile a quella della lunghezza effettiva della sonda[3].

Sonda dilatometrica (per es. Figg. 1 e 3)

4.(a) Una sonda dilatometrica o «cella» costituita da una guaina flessibile da alta pressione montata su un corpo in maniera che la guaina possa essere gonfiata per applicare una pressione alla parete laterale del foro di sondaggio. La guaina deve essere sufficientemente resistente per non essere danneggiata durante le fasi di calaggio e di estrazione della sonda nel foro di sondaggio, ma sufficientemente flessibile in maniera tale da trasmettere non meno del 90% della pressione idraulica.

(b) Un'attrezzatura per inserire, estrarre e calare la sonda nel foro e per determinarne la posizione con una precisione di ±5cm. Possono essere utilizzate aste di perforazione, speciali aste di manovra o cavi.

Sistema idraulico di pressurizzazione della sonda (per es. Fig. 2)

5.(a) Una pompa e un sistema di tubi per riempire, gonfiare e sgonfiare la sonda e in grado di applicare e di mantenere le pressioni richieste.[4]

(b) Generalmente si usa una pompa manuale a vite (o «generatore di pressione») in quanto essa assolve al duplice scopo di pressurizzare e di misurare la variazione di volume. Lo spostamento del pistone avviene girando la ruota della pompa.

(c) Se la misura della variazione di volume avviene al di fuori del foro di sondaggio, il sistema idraulico deve essere di costruzione rigida per minimizzare gli errori nella determinazione della dilatazione e per facilitare i cicli di carico e le prove di rilascio degli sforzi.[4] In alternativa, si può non tener conto dell'espansione dei tubi se la variazione di volume è misurata direttamente all'interno della sonda, cioè quando è utilizzato un dilatometro del tipo di quello descritto da Bourbonnais [15].

(d) Se si eseguono prove in fori di grandi dimensioni utilizzando sonde di elevato diametro può essere necessario ricorrere a due pompe, di cui una con portata elevata per il riempimento del dilatometro e l'applicazione della pressione iniziale, e una seconda a vite per la pressurizzazione.

Sistemi di misura, quali i seguenti

6.(a) Un sistema per la misura del volume, con una precisione di ±1% del volume della cella, per determinare la quantità di liquido iniettato e estratto dalla cella. Il volume è generalmente misurato in base al numero di giri o frazioni di giro della pompa a vite. Una precisione maggiore, generalmente dell'ordine di ±0.2%, può essere raggiunta utilizzando, per la misura dell'espansione della sonda, una strumentazione elettrica da fondo foro [15].

(b) Un sistema di misura della pressione, quale un manometro o un trasduttore elettrico, avente il necessario campo di misura e una sensibilità migliore di ±2% del campo utilizzato per la prova.

Procedura

Scelta delle sezioni di prova

7.(a) L'ubicazione dei fori e la loro profondità de-

vono essere scelte considerando le previste variazioni della qualità della roccia e la profondità dello strato alterato, nonché tenendo conto delle necessità dei progetti delle strutture per i quali i dati delle prove devono servire.

(b) All'interno di ciascun foro di sondaggio le prove possono essere spaziate ad intervalli regolari o eseguite in corrispondenza di specifiche sezioni localizzate in formazioni o strati geologici scelti a priori. In generale si dovrebbe ottenere l'andamento della deformabilità con continuità lungo tutta la parte del foro per le prove interessata dal progetto. Per esempio un intervallo tra le prove di 1, 2 o 5m dovrebbe essere specificato in funzione della lunghezza del foro e della risoluzione richiesta.

Perforazione e preparazione

8.(a) I fori per le prove devono essere perforati con la massima cura per garantire la loro stabilità, tenendo presente che un cuneo di roccia che si incastri casualmente tra la sonda e la parete del foro può bloccare definitivamente il dilatometro.

(b) Il diametro del foro deve essere superiore di 0.5-3.0mm rispetto a quello della sonda sgonfia.[5]

(c) Si consiglia di eseguire un'ispezione con sonda televisiva nel foro di sondaggio per evitare danni alla guaina flessibile che potrebbero essere causati da fratture aperte o da cavità. Nel caso il foro necessiti una stabilizzazione, questa può essere realizzata mediante rivestimento del foro fino alla sezione di prova superiore e/o mediante cementazione.[6]

(d) Le carote devono essere interamente descritte per definire la percentuale di recupero, per valutare le caratteristiche della roccia e il suo stato di fratturazione. Le carote devono essere disponibili in situ per permetterne l'osservazione da parte della squadra che esegue le prove, se questa non è stata presente durante la fase di perforazione.

Calibrazione [1, 12, 13]

9.(a) Lo scopo della calibrazione è quello di determinare la «rigidezza del sistema M_s'', il valore della quale è necessario per consentire il calcolo della variazione di volume nella sezione di prova in base alla variazione di volume misurata del sistema sonda-circuito idraulico.

(b) Tutta l'attrezzatura dilatometrica deve essere verificata a fondo e calibrata prima di qualsiasi serie di prove, come pure settimanalmente durante una campagna di prove e dopo un'importante riparazione, come la sostituzione di una guaina. Durante la calibrazione deve essere registrata la temperatura ambiente dell'aria e la calibrazione deve essere ripetuta se la temperatura varia di più di 5°C.

(c) La sonda, la pompa e il sistema idraulico che devono essere utilizzati in situ devono essere collegati tra di loro e riempiti con olio idraulico, verificando che non ci siano perdite e effettuando uno spurgo completo per eliminare l'aria intrappolata.

(d) Con la sonda inserita nel tubo di calibrazione la pressione deve essere incrementata per gradini di carico sino a coprire tutto il campo previsto per le prove, effettuando almeno 5 misure della pressione (MPa) e del volume (numero di giri della pompa). Si deve tracciare un diagramma pressione-volume e determinare la sua pendenza M_m (MPa per giro), cioè la rigidezza complessiva del sistema di prova e del tubo di calibrazione. M_s deve essere calcolato in funzione di M_m come descritto nel paragrafo 11(c).

(e) La sonda deve essere gonfiata in aria (senza confinamento) per determinare il coefficiente di correzione della rigidezza della guaina *m* (MPa/giro), ottenuto come inclinazione della curva non confinata pressione-dilatazione.

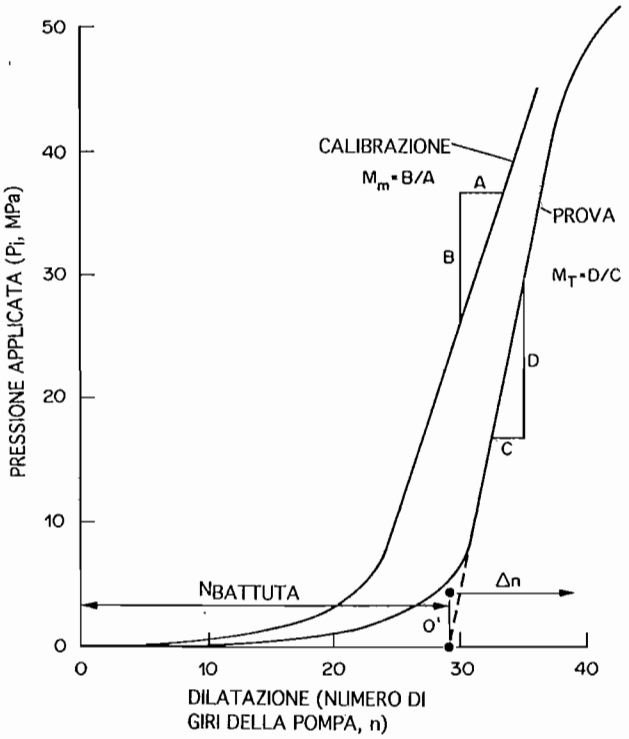

Fig. 4 - Diagrammi pressione-dilatazione per una prova dilatometrica CSM.

Esecuzione delle prove

10.(a) Dopo aver verificato che il foro sia accessibile per tutta la sua lunghezza con l'ausilio del sistema per la misura del diametro, la sonda deve essere inserita e calata o innalzata in corrispondenza della sezione di prova prevista. La posizione deve essere misurata con una precisione di ± 5 cm e registrata.

(b) La sonda deve essere espansa con una pressione appena sufficiente per garantire un contatto perma-

nente e per impedirne lo scivolamento. Questa pressione di contatto dovrà essere la pressione minima durante la prova.

(c) La pressione deve essere incrementata secondo non meno di cinque gradini di carico approssivativamente uguali tra di loro fino al valore massimo, il quale deve essere il più elevato possibile ma non superiore alla pressione di sicurezza dell'attrezzatura, tenendo conto della rugosità e del diametro del foro di sondaggio alla profondità della prova.[5]

(d) Per ciascun gradino di carico la pressione deve essere mantenuta costante mentre si effettuano le misure della pressione (MPa) e del relativo volume (giri della pompa). La dilatazione a carico costante (se ve ne è) deve essere registrata in funzione del tempo per fornire un'indicazione se.la roccia abbia un comportamento dipendente dal tempo. In alternativa, lo stesso scopo può essere raggiunto mantenendo costante il volume nella sonda (senza pompare), e registrando la diminuzione della pressione nel tempo.[7]

(e) In corrispondenza della massima pressione di prova, la pressione applicata deve essere mantenuta costante per un periodo di almeno 10min, o più a lungo se specificato. Le misure della dilatazione in funzione del tempo a pressione costante devono nuovamente essere tabulate per determinare l'ammontare della deformazione viscosa.

(f) Le misure della dilatazione e della pressione possono successivamente essere aquisite durante la fase di scarico, se specificato. Nella maggior parte delle applicazioni sono richiesti tre cicli di carico e scarico.[8]

(g) Deve essere diagrammata una curva pressione-volume e se ne deve determinare la pendenza M_t (MPa per giro), cioè la rigidezza complessiva dell'attrezzatura e della roccia (per es. Fig. 4).

(h) La pressione deve quindi essere azzerata e la sonda riposizionata per la prova successiva.

Calcoli

Calcolo delle costanti di calibrazione

11.(a) Il modulo di taglio G_c del materiale di un tubo di calibrazione avente modulo di Young E_c e coefficiente di Poisson ν_c è dato da:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\nu_c)} \text{ (MPa)} \qquad (1)$$

(b) La rigidezza M_c del tubo di calibrazione è calcolata come:
in cui:

$$M_c = \frac{\alpha G_c}{\pi L a^2 \left[\frac{1+B_c(1-2\nu_c)}{1-B_c}\right]} \text{ (MPa/giro)} \qquad (2)$$

in cui:
α = costante della pompa (volume di fluido spostato per giro della vite della pompa),
L = lunghezza della guaina della cella (m),
a = diametro interno e b diametro esterno del tubo di calibrazione (m),
$B_c = (a/b)^2$.

(c) La rigidezza M_s del sistema idraulico è calcolato come:

$$M_s = \frac{M_c M_m}{M_c - M_m} \text{ (MPa/giro)} \qquad (3)$$

dove M_m è la rigidezza del sistema con il tubo di calibrazione, misurato come descritto nel paragrafo 9 (c).

Correzioni per le perdite di pressione e di volume

12.(a) Perdite di pressione - Le pressioni misurate p_i (quelle rilevate dal manometro o dal trasduttore di pressione) sono uguali a quelle agenti sulla roccia solo se la guaina è molto flessibile o le dilatazioni molto limitate. Generalmente le pressioni rilevate richiedono una correzione che tenga conto della rigidezza della membrana come segue:

$$p_{i,corr} = p_i - nm \text{ (MPa)} \qquad (4)$$

dove $p_{i,corr}$ è la pressione corretta, n è il numero totale di giri necessari per raggiungere p_i, e m (MPa/giro) è il fattore di correzione della rigidezza della membrana [paragrafo 9 (e)].

(b) *Perdite di volume* - Queste sono conseguenza della messa in opera della sonda e del gonfiaggio del sistema di carico. Utilizzando le misure definite in Fig.4, il numero corretto netto di giri Δn_{corr} è calcolato mediante:

$$\Delta n_{corr} = n - n_{batt} - p_i/M_s \text{(giri)}. \qquad (5)$$

Calcolo dei parametri elastici lineari della roccia

13.(a) La rigidezza M_R per la sezione di prova in roccia è calcolata come:

$$M_R = \frac{M_s M_T}{M_s - M_T} \text{ (MPa/giro)}. \qquad (6)$$

(b) Il modulo di taglio dilatometrico G_d per una sezione di prova del foro di sondaggio è calcolato come:

$$G_d = M_R \frac{\pi L a^2}{\alpha} \text{ (MPa)} \qquad (7)$$

dove L e a sono rispettivamente la lunghezza e il diametro della sezione di prova del foro di sondaggio e α è la costante della pompa [vedi paragrafo 11(b)].

(c)Il modulo di taglio dilatometrico G_d per una prova dilatometrica in un cilindro di roccia è calcolato come:

$$G_d = M_R \frac{\Pi L a^2}{\alpha} \left[\frac{1 + B_c(1 - 2\nu_R)}{1 - B_c}\right] \text{(MPa)} \quad (8)$$

dove la simbologia ha lo stesso significato della precedente, ma con B_c riferito al cilindro di roccia sottoposto a prova

(d)Il modulo di elasticità dilatometrico E_d per una prova in un foro di sondaggio o in un cilindro di roccia può essere ottenuto da:

$$E_d = 2(1 + \nu_R)\ G_d \text{ (Mpa)} \quad (9)$$

dove il coefficiente di Poisson ν_R per la roccia può essere noto o stimato.

Calcoli per comportamento non lineare

14.(a) Se il foro di sondaggio è ubicato in roccia molto fratturata, la relazione tra pressione e volume misurati potrebbe diventare non lineare quando la pressione applicata supera circa due volte la sollecitazione media nel terreno. In questo caso, assumendo che il materiale abbia resistenza a trazione nulla [16], G_d può essere calcolato da:

$$G_d = p_{i,corr} \frac{\pi L a^2}{\alpha \Delta n_{corr}} \left[(1 - \nu_R) \ln\left(\frac{p_{i,corr}}{2p_0}\right) + 1\right] \text{(MPa)} \quad (10)$$

dove $p_{i,corr}$ e Δn_{corr} sono i valori corretti per la pressione applicata e il numero di giri (paragrafo 12), e p_o è lo stato di sollecitazione medio intorno al foro di sondaggio (MPa), che deve essere misurato o stimato in maniera indipendente.

(b) In alternativa si può ottenere un diagramma che riporti la pressione in funzione della dilatazione (Fig. 4), riportando $p_{i,corr}$ in ordinata e V_m in ascissa, dove

$$V_m = \alpha(n - p_i/M_s) \text{ (m}^3\text{)} \quad (11)$$

Il diagramma può quindi essere utilizzato nella stessa maniera con la quale è utilizzato in una prova con pressiometro di Ménard [9-11, 17].

Presentazione dei risultati

15. Quanto segue deve essere indicato per il sito nel suo insieme:

(a) Dettagli del programma di perforazione comprendente il nome dell'impresa di perforazione, il metodo e l'attrezzatura utilizzati.

(b) Una planimetria con l'ubicazione dei fori di sondaggio e una tabella con riportati lunghezza, diametro inclinazione e direzione dei fori.

(c) Una descrizione geotecnica delle carote, con indicate l'ubicazione delle sezioni rivestite o cementate, se ve ne sono; livelli della falda, litotipi e caratteristiche della roccia; ubicazione delle sezioni di prova.

(d) Caratteristiche di tutte le discontinuità all'interno di ciascuna sezione di prova e per 0,5m al di sopra e al di sotto di esse. Devono essere utilizzate le raccomandazioni dell'ISRM relative alla descrizione quantitativa delle discontinuità negli ammassi rocciosi (*ISRM Suggested Methods for Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*).

(e) Dettagli sul metodo e sulle attrezzature per la calibrazione e per le prove. Possono essere effettuati riferimenti a queste Raccomandazioni evidenziando solo gli scostamenti dalle procedure qui presentate.

(f) Tutti i risultati delle calibrazioni.

16. Quanto segue deve essere indicato per ciascuna prova:

(a) Tabelle con i dati di prova comprendente sia i valori originali che quelli corretti in funzione delle profondità di prova e diagrammi come in Fig.4.

(b) I valori calcolati dei parametri di deformabilità, insieme ai dettagli sui metodi e sulle assunzioni effettuate per il loro calcolo. I parametri di deformabilità dovrebbero essere tabulati e rappresentati graficamente in funzione della pressione applicata.

(c) Rappresentazioni della variazione della deformabilità in funzione della profondità (o distanza dalla boccaforo nel caso di fori non verticali).

Raccomandazione per la Determinazione delle Caratteristiche di Deformabilità mediante un Dilatometro Flessibile con Misura degli Spostamenti Radiali

Scopo

1.(a) Questa prova utilizza una sonda dilatabile (dilatometro) per applicare una pressione alla parete di un foro di sondaggio. La corrispondente variazione diametrale del foro (dilatazione) è determinata direttamente per mezzo di un trasduttore di spostamento installato nella sonda. Le caratteristiche di deformabilità della roccia in corrispondenza del dila-

tometro possono essere calcolate in base alla relazione tra la pressione e la dilatazione.[1] Può essere determinata anche l'anisotropia della deformabilità nel piano normale all'asse del foro di sondaggio.

(b) Questa Raccomandazione è basata principalmente sul metodo dilatometrico originale del LNEC sviluppato in Portogallo. Sono disponibili vari altri dilatometri del tipo simile a questo [2, 12, 15, 18-22] che possono soddisfare le specifiche di prova.

(c) I risultati di prove dilatometriche sono generalmente utilizzati in indagini esplorative su fondazioni, dighe, gallerie, caverne, ecc. Le prove sono particolarmente indicate per ottenere rapidamente una serie di indici in fori di sondaggio realizzati in rocce fragili, argillose o intensamente fratturate che consentono un limitato recupero di carote dai fori di sondaggio e forniscono carote non idonee alle prove di laboratorio.

(d) Il volume di roccia sollecitato da una prova dilatometrica è generalmente piccolo in confronto a quello interessato da prove alternative, quali la prova di carico su piastra o di camera idraulica, sebbene esso sia maggiore di quello di un campione privo di giunti per una prova di laboratorio. Pertanto i valori di deformabilità ottenuti mediante dilatometro possono richiedere una correzione per tener conto dell'effetto scala e di quello relativo alla fessurazione.

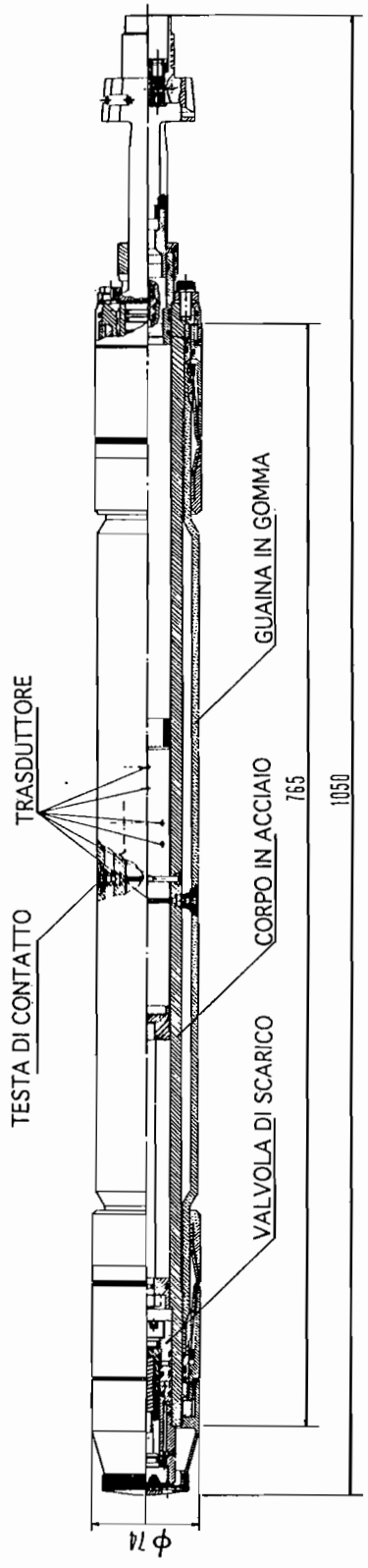

Fig. 5 - Dilatometro del tipo LNEC.

Attrezzatura

Attrezzatura per la perforazione e la preparazione del foro per le prove

2. (a)Una perforatrice o una sonda di perforazione

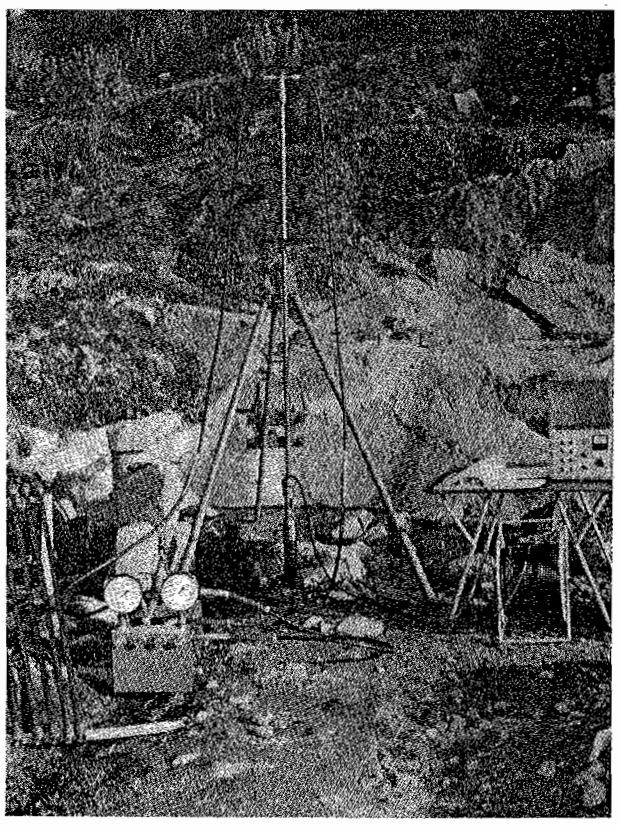

Fig. 6 - Dilatometro del tipo LNEC con sonda, pompa, attrezzatura di installazione e di lettura.

per realizzare un foro per le prove avente il diametro necessario fino alla massima profondità prevista per le prove.

(b) Un rivestimento, quando necessario, per stabilizzare le pareti del foro di sondaggio al di fuori delle sezioni di prova.

(c) Un'attrezzatura e il materiale necessario per cementare e riperforare il foro di sondaggio in corrispondenza delle sezioni di prova [quando richiesto, vedi paragrafo 8(c)].

(d) Un sistema per la misura al diametro (per es. un cilindro dello stesso diametro della sonda) per controllare che il foro sia libero prima dell'inserimento del dilatometro.

Attrezzatura di calibrazione

3.(a) Un tubo di calibrazione dalle caratteristiche elastiche note, con diametro interno uguale a quello del foro per le prove, e con lunghezza simile a quella della lunghezza effettiva della sonda.[3]

(b) Un calibro per misurare il diametro esterno della sonda con una precisione di ± 0.02mm.

Sonda dilatometrica (per es. Figg. 5 e 6)

4.(a) Una sonda dilatometrica comprendente una guaina flessibile da alta pressione montata su un corpo in maniera che la guaina possa essere gonfiata per applicare una pressione alla parete laterale del foro di sondaggio. La guaina deve essere sufficientemente resistente per non essere danneggiata durante le fasi di calaggio e di estrazione della sonda nel foro di sondaggio, ma sufficientemente flessibile in maniera tale da trasmettere non meno del 90% della pressione idraulica. Una sonda dilatometrica tipica ha un diametro di 76-116 mm ed una lunghezza efficace di 5-15 volte il diametro.

(b) Un'attrezzatura per inserire, estrarre e calare la sonda nel foro e per determinare la sua posizione con una precisione di ± 5cm e e la sua orientazione entro $\pm 5°$. Possono essere utilizzate aste di perforazione, speciali aste di manovra o cavi.

Un sistema idraulico di pressurizzazione della sonda (per es. Fig.6)

5.(a) Una pompa e un sistema di tubi per riempire, gonfiare e sgonfiare la sonda e in grado di mantenere le pressioni richieste[4].

(b) La pompa è generalmente elettrica con un regolatore di pressione in grado di mantenere i carichi o di applicare una velocità di carico costante.

(c) Se si eseguono prove in fori di grande dimensione utilizzando sonde di notevole diametro può essere necessario ricorrere a due pompe, o almeno ad una pompa a due velocità, con una portata elevata per il riempimento del dilatometro e l'applicazione della pressione iniziale ed un'altra per la pressurizzazione.

Sistemi di misura quali i seguenti

6.(a) Uno o più sistemi per la misura degli spostamenti per determinare il diametro del foro con una precisione di ± 0.02mm o più elevata. Possono essere installati, per esempio, tre trasduttori di spostamento elettrico del tipo LVDT (trasformatore differenziale a variazione lineare) per effettuare misure in corrispondenza di tre diametri orientati a 120 l'uno rispetto all'altro. I trasduttori sono collegati mediante cavi elettrici ad un'unità di lettura situata in superficie.

(b) Un sistema di misura della pressione, quale un manometro o un trasduttore di pressione elettrico, con il necessario campo di misura e una sensibilità migliore di $\pm 2\%$ del campo utilizzato per ciascuna prova

Procedura

Scelta delle sezioni di prova

7.(a) L'ubicazione dei fori di sondaggio e la loro profondità devono essere scelte considerando le previste variazione della qualità della roccia e la profondità dello strato alterato, nonché la natura dei calcoli di progetto per il quale i dati delle prove devono servire.

(b) All'interno di ciascun foro di sondaggio le prove devono essere spaziate ad intervalli regolari o eseguite in corrispondenza di specifiche sezioni locatizzate in formazioni o strati geologici scelti a priori. In generale si dovrebbe ottenere l'andamento della deformabilità con continuità lungo tutta la parte del foro per le prove interessato dal progetto. Per esempio un intervallo tra le prove di 1,2 o 5m dovrebbe essere specificato in funzione della lunghezza del foro e della risoluzione richiesta.

Perforazione e preparazione

8.(a) I fori per le prove devono essere perforati con la massima cura per garantire la loro stabilità, tenendo presente che un cuneo di roccia che si incastri casualmente tra la sonda e la parete del foro può bloccare definitivamente il dilatometro.

(b) Il diametro del foro deve essere superiore di 0.5-3.0mm rispetto a quello della sonda sgonfia.[5]

(c) Si consiglia di eseguire un'ispezione con sonda

televisiva nel foro di sondaggio per evitare danni alla guaina flessibile che potrebbero essere causati da fratture aperte o da cavità. Nel caso il foro necessiti una stabilizzazione, questa può essere realizzata mediante rivestimento del foro fino alla sezione di prova superiore e/o mediante cementazione.[6]

(d) Le carote devono essere interamente descritte per definirne la percentuale di recupero, la frequenza delle fratture, le caratteristiche della roccia, l'alterazione e le caratteristiche strutturali, quali la scistosità, la foliazione, la stratificazione e la fratturazione. Le carote devono essere disponibili in situ per permetterne l'osservazione da parte della squadra che esegue le prove, se questa non è stata presente durante la fase di perforazione.

Calibrazione

9.(a) Tutta l'attrezzatura dilatometrica deve essere verificata a fondo e calibrata prima di ciascuna serie di prove, come pure almeno settimanalmente durante una campagna di prove e dopo un'importante riparazione, come la sostituzione di una guaina.

(b) Con la sonda inserita nel tubo di calibrazione si deve applicare la massima pressione prevista per le prove e verificare che si riesca a mantenere la pressione e non si verifichino perdite.

(c) La pressione deve quindi essere rilasciata e incrementata per gradini di carico sino a coprire tutto il campo previsto per le prove, effettuando almeno cinque misure della pressione (MPa) e della relativa dilatazione. Se la cella contiene più di un trasduttore di spostamento, le misure devono essere confrontate e mediate. Si deve tracciare un diagramma della pressione in funzione della dilatazione media e confrontare la sua pendenza M_m (MPa per mm) con l'espansione teorica del tubo ottenuta con la teoria dell'elasticità[9].

(d) La sonda deve essere gonfiata in aria (senza confinamento) per determinare il fattore di correzione della rigidezza della guaina m (MPa/mm) ottenuto come pendenza della curva pressione non confinata-dilatazione.

(e) Il sistema di misura degli spostamenti dovrebbe anche essere verificato separatamente mediante un micrometro, preferibilmente del tipo che consenta una misura diretta della distanza tra gli inserti sulla guaina della sonda. All'interno del campo di misura la sensibilità complessiva dell'attrezzatura dovrebbe essere costante, per es. una divisione del quadrante del voltmetro per un millimetro di dilatazione.

Esecuzione delle prove

10.(a) Dopo aver verificato che il foro sia accessibile per tutta la sua lunghezza con l'ausilio del sistema per la misura del diametro, la sonda deve essere inserita e calata o innalzata in corrispondenza della sezione di prova prevista. La posizione deve essere misurata con una precisione di ± 5cm e registrata.

(b) La sonda deve essere espansa con una pressione appena sufficiente per garantire un contatto permanente e per impedirne lo scivolamento. Questa pressione di contatto dovrà essere la pressione minima durante la prova.

(c) La pressione deve essere incrementata secondo non meno di cinque gradini di carico approssimativamente uguali tra di loro fino al valore massimo, il quale deve essere il più elevato possibile ma non superiore alla pressione di sicurezza dell'attrezzatura, tenendo conto della rugosità e del diametro del foro di sondaggio alla profondità della prova.

(d) Per ciascun gradino di carico la pressione deve essere mantenuta costante mentre si effettuano le misure della pressione (MPa) e la relativa dilatazione

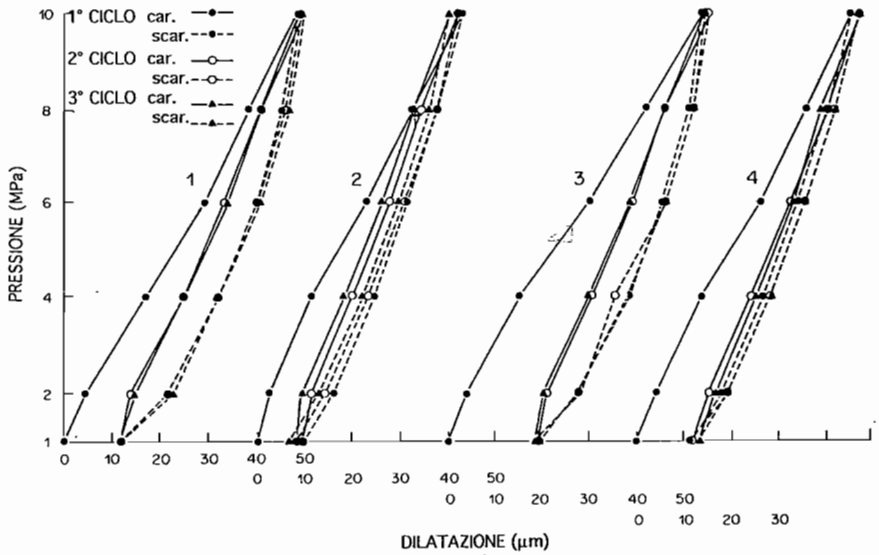

Fig. 7 - Diagrammi pressione-dilatazione, con rappresentate separatamente le curve relative a ciascuno dei quattro trasduttori di spostamento installati nella stessa sonda (dilatometro INEC, [2, 20].

del foro (mm). Se nella sonda ci sono più di un trasduttore di spostamento, devono essere registrate misure diametrali individuali per consentire il calcolo dei valori di deformabilità in funzione della direzione. La dilatazione a carico costante (se ve ne è) deve essere registrata in funzione del tempo per fornire un'indicazione se la roccia abbia un comportamento dipendente dal tempo. In alternativa, lo stesso scopo può essere raggiunto mantenendo costante il diametro della sonda e registrando la diminuzione della pressione nel tempo.[7]

(e) In corrispondenza della massima pressione di prova, la pressione applicata deve essere mantenuta costante per un periodo di almeno 10min, o più a lungo se specificato. Le misure della dilatazione in funzione del tempo a pressione costante devono nuovamente essere tabulate per determinare l'ammontare della deformazione viscosa.

(f) Le misure della dilatazione e della pressione possono successivamente essere acquisite durante la fase di scarico, se specificato. Nella maggior parte delle applicazioni sono richiesti tre cicli di carico e scarico[8].

(g) Durante i cicli di prova deve essere diagrammata una curva pressione-dilatazione come illustrato in Fig.7.

(h) La pressione è azzerata. Se la sonda misura lo spostamento lungo una sola direzione essa può essere ruotata alla stessa profondità nel foro di sondaggio e la prova ripetuta per misurare la deformabilità lungo un'altra direzione. La sonda è quindi riposizionata per la prova successiva.

Calcoli

Calcolo delle costanti di calibrazione

11.(a) Il modulo di taglio G_c del materiale di un tubo di calibrazione avente modulo di Young E_c e coefficiente di Poisson ν_c è dato da:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\nu_{vc})} \text{ (MPa)} \qquad (12)$$

Calcolo dei parametri di deformabilità della roccia

12.(a) Per ciascun intervallo del diagramma pressione-spostamento (per es. Fig.7) e in roccia con giunti molto distanziati [vedi 12(b) più sotto] il relativo modulo dilatometrico secante E_c può essere calcolato come segue:

$$E_d = (1+\nu_R)\, D\, \frac{\Delta p_i}{\Delta D} \text{ (MPa)} \qquad (13)$$

dove:

Δp_i = incremento di pressione all'interno dell'intervallo considerato (MPa);
ΔD = corrispondente variazione media del diametro D del foro di sondaggio (m);
ν_R = coefficiente di Poisson dell'ammasso roccioso.

(b) Se la prova è eseguita in roccia fratturata e se p_i supera circa due volte la sollecitazione media p_o nel terreno nell'intorno del foro di sondaggio, tutte le fratture radiali si apriranno e l'equazione del paragrafo 12(a) dovrà essere sostituita con la seguente:

$$E_d = D\,\frac{p_i}{\Delta D}(1+\nu_R)\left[(1-\nu_R)\,\ln\left(\frac{p_i}{2p_0}\right)+1\right] \text{(MPa)} \qquad (14)$$

dove:

p_i = pressione applicata (MPa),
ΔD = incremento medio del diametro del foro di sondaggio (m) per un incremento di pressione da zero a p_i

Si noti che le equazioni dei paragrafi 12(a) e (b) sono rigorosamente valide solo per una roccia lineare-elastica, omogenea e isotropa.

(c) Qualora la cella contenga più di un trasduttore per la misura della variazione diametrale o qualora una cella con singolo trasduttore sia stata ruotata per misurare l'anisotropia della deformabilita, le dilatazioni misurate lungo le varie direzioni di misura sono rappresentate graficamente come in Fig.8 [19]. I valori di deformabilità devono quindi essere calcolati secondo ciascuna direzione di misura. Ulteriori dettagli per l'interpretazione di prove effettuate in roccia fratturata e anisotropica sono riportati in [3, 4, 6, 21, 22].

(d) Dal diagramma pressione-dilatazione può essere determinata sia la risposta a breve termine che quella in funzione del tempo.

Presentazione dei risultati

13. Quanto segue deve essere indicato per il sito nel suo insieme:

(a) Dettagli del programma di perforazione comprendente il nome dell'impresa di perforazione, il metodo e l'attrezzatura utilizzati.

(b) Una planimetria con l'ubicazione dei fori di sondaggio e una tabella con riportati lunghezza, diametro, inclinazione e direzione dei fori.

(c) Una descrizione geotecnica delle carote, con indicate l'ubicazione delle sezioni rivestite o cementate, se ve ne sono; livelli della falda, litotipi e caratteristiche della roccia; ubicazione delle sezioni di prova.

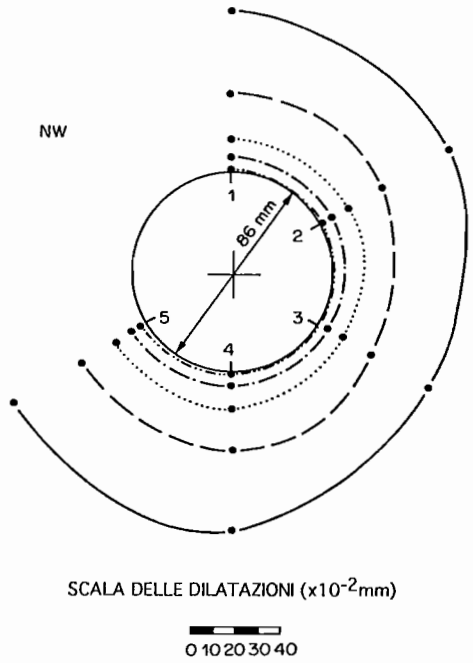

Fig. 8 - Dilatazioni della parete di un foro di sondaggio, misurate mediante un dilatometro munito di tre trasduttori di spostamento, alle pressioni di 1, 2, 5, 10, 20 e 40 MPa [19].

(d) Caratteristiche di tutte le discontinuità all'interno di ciascuna sezione di prova e per 0,5m al di sopra e al di sotto di esse. Devono essere utilizzate le raccomandazioni dell'ISRM relative alla descrizione quantitativa delle discontinuità negli ammassi rocciosi («*ISRM Suggested Methods for Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*»).

(e) Dettagli sul metodo e sulle attrezzature per la calibrazione e per le prove. Possono essere effettuati riferimenti a queste Raccomandazioni evidenziando solo gli scostamenti dalle procedure qui presentate.

(f) Tutti i risultati delle calibrazioni.

14.Quanto segue deve essere indicato per ciascuna prova:

(a) Tabelle con i dati di prova comprendente sia i valori originali che quelli corretti in funzione delle profondità di prova e diagrammi come in Fig.7.

(b) I valori calcolati dei parametri di deformabilità, insieme ai dettagli sui metodi e sulle assunzioni effettuate per il loro calcolo. I parametri di deformabilità dovrebbero essere tabulati e rappresentati graficamente in funzione della pressione applicata.

(c) Rappresentazioni della variazione della deformabilità in funzione della profondità (o distanza dalla boccaforo nel caso di fori non verticali).

(d) Rappresentazioni nel piano normale all'asse del foro di sondaggio che illustrino l'anisotropia delle dilatazioni misurate e i valori di deformabilità.

Note

[1] Se la massima pressione applicata è minore di quella necessaria per provocare la rottura della roccia, possono essere determinati solo i parametri elastici. Tuttavia mediante l'uso di un dilatometro dalle elevate prestazioni in una roccia debole o plastica come l'argillite o il carbonato di potassio, anche la resistenza a breve termine e le proprietà viscose della roccia possono essere dedotte in base all'andamento delle curve pressione-spostamento-tempo. Allo stesso modo se è usato un dilatometro dalle elevate prestazioni per provocare fratture in una roccia dura, come il granito, si possono effettuare considerazioni sulla resistenza a trazione e sullo stato di sollecitazione della roccia.

[2] Nell'attrezzatura CSM la sonda o «cella» è costituita da una guaina in gomma poliuretanica montata su un corpo in accaio. La sonda (Fig.3) ha un diametro 37.5mm e lunghezza 165mm. Essa è pressurizzata mediante una pompa a vita manuale avente un serbatoio della capacità di 30 cm^3 e un campo di utilizzo fino a 100 MPa. È utilizzata una tubazione in acciaio inossidabile avente diametro esterno 3.2mm e diametro interno 1mm. L'iniezione di 30 cm^3 di fluido produce un incremento di diametro del 7.8%.

Nell'originale modello alternativo tuttora in uso (CPC), la guaina è in rame di spessore 0.6mm. I vari dilatometri flessibili che si trovano in commercio, sebbene basati sullo stesso principio, differiscono tra di loro per dimensione, capacità, costruzione e sistema di controllo. A volte, per determinare la deformabilità in rocce deboli come quelle che hanno Modulo di Deformabilità minore di 500 MPa, sono usati i pressiometri per terreni del tipo Ménard, che sono dilatometri tuttavia progettati per operare a pressioni più basse [9, 10].

[3] Sebbene un tubo di calibrazione possa essere sufficiente, spesso ne sono utilizzati due o più di differente rigidezza per aumentare la precisione della determinazione. Non ci sono particolari esigenze per quanto riguarda il materiale o il diametro esterno dei tubi di calibrazione; essi dovrebbero tuttavia avere una rigidezza simile a quella dell'ammasso roccioso e dovrebbero consentire una calibrazione in tutto il campo di pressioni che saranno applicate nel foro di sondaggio.

[4] Per misure in rocce dure si consiglia un campo di pressioni di almeno 20MPa. I fluidi di pressurizzazione che sono stati utilizzati includono glicerina, glicole etilenico, acqua o olio idraulico.

Per l'esecuzione di prove in roccia molto rigida è generalmente necessario un sistema di pressurizzazione ad elevata rigidezza [2]. Le tubazioni in gomma sono da evitare e si devono utilizzare aste in acciaio, a meno che la variazione di volume nella sonda sia misurata direttamente nella sonda stessa [15].

[5] In un foro di sondaggio irregolare o scalibrato sarà necessario un campo di misura più ridotto, con una pressione massima di prova notevolmente minore della massima pressione nominale di lavoro del dilatometro. Una perforazione di alta qualità è essenziale per evitare danni alle guaine e per consentire di operare alla massima pressione di prova possibile.

[6] La pressione del fluido di iniezione non deve mai superare 3m per evitare di iniettare in pressione l'ammasso roccioso interessato dalla prova. Il foro cementato deve essere riperforato con le tollerranze specificate. Lo spessore del rivestimento in cemento deve essere minore di 1mm. Il ricorso alla cementazione deve essere documentato e l'effetto che essa può produrre valutato nel rapporto.

[7] In una prova con pressiometro di Ménard, così come essa è normalmente effettuata nei terreni, la pressione è normalmente incrementata per gradini di carico e mantenuta costante, per ciascun livello, per un periodo prestabilito di tempo, durante il quale si registra l'incremento di volume del foro di sondaggio.

[8] La massima pressione di prova dovrebbe essere il più elevata possibile in maniera da interessare il più grande volume di roccia possibile durante la prova. In una prova con vari cicli, la pressione massima in ciascun ciclo successivo dovrebbe essere progressivamente incrementa in maniera da ottenere informazioni utili già dai primi cicli anche se successivamente la guaina dovesse rompersi.

[9] Alcune sonde misurano la dilatazione sulla parete interna della guaina e non direttamente sulla roccia, e richiedono una calibrazione per determinare la variazione di spessore della guaina in funzione della pressione interna.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1) PANEK L.A., HORNSEY E.E. and LAPPI R.L. (1964) - *Determination of the modulus of rigidity of rock by expanding a cylindrical pressure cell in a drillhole.* Proc. 6th Symp. on Rock Mechanics. Rolla, Missouri, pp. 427-449.
2) ROCHA M., DA SILVEIRA A., GROSSMAN N. and DE OLIVIERA E. (1966) - *Determination of the deformability of rock masses along boreholes.* Proc. 1st ISRM Congr. Lisbon, vol. I, pp. 697-704.
3) PANEK L.A. (1970) - *Effect of rock fracturing on the modulus determined by borehole dilation tests.* Proc. 2nd ISRM Congr., Paper n. 2-16, Belgrade, 5 pp.
4) AMADEI B. (1985) - *The influence of rock mass fracturing on the measurement of deformability by borehole expansion tests.* Proc. 26th U.S. Symp. on Rock Mechanics, vol. II, Rapid City, SD., pp. 859-862.
5) STEPHANSSON O. (1983) - *Rock stress measurement by sleeve fracturing.* Proc. 5th ISRM Cong., Melbourne, pp. F129-F137.
6) SINGH B. (1974) - *Reliability of dilatometer tests in the determination of the modulus of deformation of a jointed rock mass.* ASTM, STP 554-Field Testing and Instrumentation of Rock, ASTM, Philadelphia, PA., pp. 52072.
7) LADANYI B. and GILL D.E. (1981) - *Determination of creep parameters of rock salt by means of a borehole dilatometer.* Proc. Ist Conf. on Mechanical Behaviour of Salt, Pennsylvania State University, Trans. Tech., Clausthal, F.R. Germany, pp. 473-491.
8) LADANYI B. and GILL D.E. (1983) - *In-situ determination of creep properties of rock salt.* Proc. 5th ISRM Congr., Melbourne, pp. A219-A225.
9) ASTM (1985) - *Suggested practice for pressure-meter testing in soils.* (Draft by Ernest Winter, Chairman AST D-18.02.07.).
10) BAGUELIN F., JEZEQUEL F.F. and SHIELDS D.H. (1978) - *The Pressuremeter and Foundation Engineering.* Trans. Tech., Clausthal, F.R. Germany.
11) HUGHES J.M.O. and ERVIN M.C. (1980) - *Development of a high pressure pressuremeter of determining the engineering properties of soft to medium strength rocks.* Proc. 3rd Australia, New Zealand Conf. on Geomechanics, vol. I, Wellington, pp. 243-247.
12) CHARRAUA-GRAÇA J.G. (1979) - *Dilatometer tests in the study of the deformability of rock masses.* Proc. 4th ISRM Congr. vol. II, Montreux, pp. 73-76.
13) HUSTRULID W.A. and SCHRAUF R.W. (1979) - *Borehole modulus measurements with the CSM cell in Swedish granite.* Proc. 20th Symp. on Rock Mechanics, Austin, Texas, pp. 509-515.
14) HUSTRULID W. and HUSTRULID A. (1975) - *The CSM cell-a borehole device for determining the modulus of rigidity of rock.* Proc. 15th U.S. Rock Mechanics Symp., Rapid City, SD (1973). ASCE, New York, pp. 181-225.
15) BOURBONNAIS J. (1985) - *New developments in rock testing and monitoring equipment for tunneling projects.* Proc. 5th Annual Canadian Tunneling Conf., Montreal, Canada, pp. 106-125.
16) LADANYI B. (1976) - *Quasi-static expansion of a cylindrical cavity in rock.* In *Engineering Application of Solid Mechanics* (Edited by B. Tabarrok), Univ. of Toronto, vol. II, pp. 219-240.
17) LADANYI B. - In situ *determination of undrained stress-strain behaviour of sensitive clays with the pressuremeter.* Can. Geotech. J., pp. 313-319.
18) CHARRUA-GRAÇA J.G. (1974) - *Estudo da deformabilidade dos macicos rochosos com dilatometro.* Thesis. LNEC, Lisbon.
19) PAHL A. (Ed.) (1984) - *Empfehlung Nr. 8 des Arbeitskreises 19 – Veruchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft fur Erd – und Grundbau e.V. Dilatometerversuche in Felsbohrungen.* Bautechnik 61(4), pp. 109-111.
20) ROCHA M., SILVEIRA A., PERES-RODRIGUES F., SILVEIRO A. and FERREIRA A. (1970) - *Characterization of the deformability of rock masses by dilatometer tests.* Proc. 2nd ISRM, Congr. vol. I, Belgrade, pp. 2-32.
21) KIEHL J.R. and WITTKE W. (1983) - *Ermittlung der Verformbarkeit von anisotropem Fels aus den Ergebnissen von Feldversuchen.* Proc. 5th ISRM Cong., Melbourne, pp. A75-A85.
22) PFISTER P. (1980) - *Essais au dilatomètre dans les sols raides et les roches.* Bull. IAEG 21, Krefeld, pp. 53-57.