

# Determinazione della deformabilità degli ammassi rocciosi con prove dilatometriche

R. CRIVELLI\*, P. DEVIN\*, S. GUIDO\*

**SOMMARIO.** Nella meccanica delle rocce si chiama dilatometrica la prova effettuata in un foro con una sonda cilindrica che, pressurizzata internamente, produca l'espansione del foro stesso.

Le prove dilatometriche sono uno dei metodi più versatili per determinare in situ la deformabilità delle rocce. Essendo prove da foro e potendo raggiungere profondità di centinaia di metri possono essere effettuate nelle prime fasi di indagine geognostica sfruttando i sondaggi esplorativi.

Dopo avere preso in esame le attrezzature per prove dilatometriche, con particolare attenzione al metodo di misura delle deformazioni diametrali del foro, l'articolo continua esponendo i criteri di interpretazione delle prove dilatometriche. L'interpretazione è basata su equazioni che derivano dalla teoria dell'elasticità. Poiché le rocce possono avere un modulo a trazione minore di quello a compressione, il modello interpretativo che viene usato normalmente può essere inadeguato se le pareti del foro vengono sottoposte a trazione. Per studiare questo fenomeno viene proposta una soluzione chiusa alternativa a quella classica, fondata sull'ipotesi che la roccia sia un materiale a comportamento bilineare. In ultimo si riporta un caso in cui la bilinearità della roccia potrebbe avere influito sul risultato dilatometrico. Alla luce delle considerazioni teoriche fatte precedentemente, il caso viene reinterpretato.

## 1. Introduzione

In meccanica delle rocce si chiama dilatometrica la prova effettuata in un foro con una sonda cilindrica che, applicando una pressione radiale uniforme alla parete, produca un incremento del diametro del foro stesso misurandolo in funzione della pressione applicata [ISRM, 1987]. Si tratta di una terminologia che può dare adito ad equivoci poiché, per contro, nella meccanica dei suoli questo tipo di prova si chiama pressiometrica [BAGUELIN *et al.*, 1978], mentre per dilatometrica si intende, di solito, quella eseguita col dilatometro piatto di Marchetti [MARCHETTI, 1983].

Le prove dilatometriche hanno la finalità di determinare in situ il modulo di deformabilità statico dell'ammasso roccioso, uno dei parametri più importanti per il progetto delle strutture in roccia.

In genere, le deformazioni che si producono in una prova che applica progressivamente un carico alla roccia sono la somma di contributi elastici ed anelastici. Il ritorno di deformazione che si ottiene a breve termine rimuovendo progressivamente il carico è invece in gran parte elastico. Da questo fatto ha origine la distinzione tra modulo di deformabilità e modulo elastico della roccia. Il primo è il rapporto tra la variazione della sollecitazione applicata e la corrispondente variazione di deformazione indotte in una fase di carico [ISRM, 1975]; il secondo è riferito a fasi di scarico. Quindi, per una roccia il modulo di deformabilità può essere sensibilmente inferiore a quello elastico.

Le prove dilatometriche rappresentano una tecnica di prova in situ particolarmente versatile: avendo un costo relativamente basso e potendo essere eseguite anche a centinaia di metri di profondità (recenti esperienze degli autori dimostrano che si possono raggiungere almeno profondità dell'ordine di 500 m), sono adatte ad essere utilizzate anche nelle prime fasi di indagine sfruttando i sondaggi esplorativi.

## 2. Sonde dilatometriche

Una sonda dilatometrica (Fig. 1) è un elemento cilindrico che viene calato nel foro; essa è collegata alla superficie attraverso un circuito idraulico da alta pressione e attraverso un cavo elettrico. Il circuito idraulico è costituito dalle aste di manovra o da un tubo flessibile e può raggiungere lunghezze di centinaia di metri; per pressurizzarlo e depressurizzarlo possono essere usati una pompa o una serie di bombole di gas provviste di un riduttore di pressione. L'attrezzatura deve includere un sistema di acquisizione e registrazione dei dati di prova che può essere analogico o digitale. In Figura 2 è riportato lo schema di una tipica attrezzatura.

Esistono molte versioni di dilatometro e, secondo la definizione data, sono da considerare dilatometri anche le cosiddette sonde pressiometriche, tra cui il noto pressiometro di Menard.

Alcuni dilatometri applicano un carico radiale uniforme alle pareti del foro attraverso una guaina flessibile pressurizzata internamente; altri, per esempio

\* ISMES S.p.A., Bergamo.

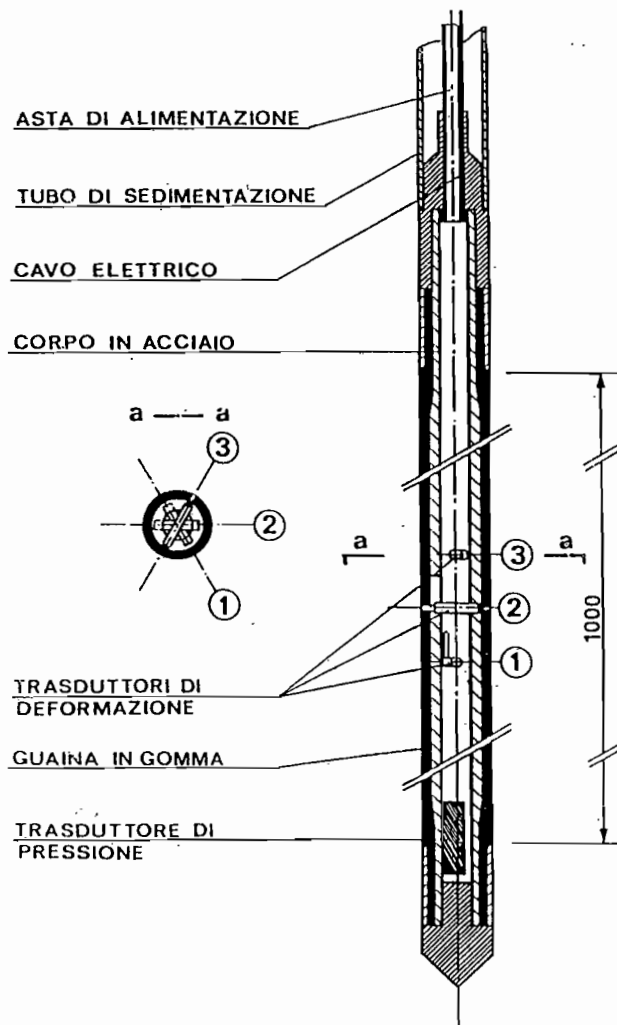


Fig. 1 - Schema di dilatometro da 95 mm con trasduttori di spostamento diametrali.

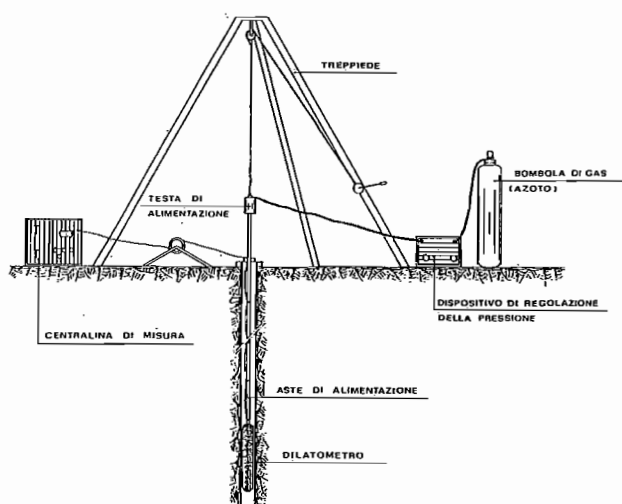


Fig. 2 - Schema di attrezzatura per prove dilatometriche.

il Goodman Jack [HEUZE e AMADEI, 1985], applicano un carico distribuito su settori limitati della parete del foro, attraverso piastre di ripartizione rigide. In questo articolo ci si riferisce a sonde del primo tipo.

Una delle caratteristiche più importanti secondo cui è opportuno classificare le sonde dilatometriche è il metodo adottato per la misura delle variazioni di diametro del foro, fondamentale per definire il campo di applicabilità di un'attrezzatura. In questo senso, tra i dilatometri a guaina flessibile si possono distinguere tre tipologie:

**tipo a):** la variazione di diametro è stimata sulla base del volume di fluido iniettato nel circuito di pressurizzazione; i dilatometri di questa classe sono generalmente usati nei suoli e derivano concettualmente dal Pressiometro di Menard;

**tipo b):** viene misurata la variazione del raggio o del diametro interno della guaina flessibile, per mezzo di trasduttori di spostamento;

**tipo c):** viene misurata direttamente la variazione di diametro del foro con uno o più trasduttori di spostamento posti in contatto con la roccia attraverso inclusioni metalliche inglobate nella gomma della guaina flessibile. La Figura 1 contiene lo schema di un dilatometro da roccia di questo tipo, dotato di trasduttori di spostamento potenziometrici disposti su tre diametri mutuamente orientati a  $120^\circ$ .

Il liquido iniettato nel circuito di un'attrezzatura dilatometrica determina l'aumento del volume del tratto di foro pressurizzato, ma anche la diminuzione di spessore della guaina flessibile e l'aumento del diametro interno degli elementi che compongono il circuito idraulico di pressurizzazione. Inoltre si deve tener conto della comprimibilità del liquido stesso. Quindi, se si usano sonde dilatometriche di tipo a), la valutazione della variazione di diametro della cavità di prova comporta opportune correzioni alla misura del volume di liquido iniettato. Queste vengono di solito definite empiricamente attraverso la calibrazione della sonda pressiométrica in un apposito tubo metallico a parete spessa con caratteristiche elastiche note. Generalmente si assume una legge lineare del tipo [BAGUELIN *et al.*, 1978]:

$$\Delta V_c = K \Delta p$$

A causa della necessità di correzioni empiriche, il campo di applicazione dei pressimetri basati sulla misura del volume di liquido iniettato dovrebbe essere limitato ai materiali con modulo di deformabilità molto basso: in pratica ai soli terreni.

Per chiarire il concetto esposto si consideri il seguente caso tipico.

Caratteristiche elastiche della roccia:  $E = 5000 \text{ MPa}$   
 $\nu = 0.25$   
 Diametro iniziale del foro:  $D_0 = 60 \text{ mm}$   
 Variazione di pressione applicata:  $\Delta p = 5 \text{ MPa}$   
 Lunghezza del pressiometro:  $L = 210 \text{ mm}$

Per un'attrezzatura commerciale per prove a 50 m di profondità, un tipico valore della costante K può essere:

$$K = 4.5 \text{ cm}^3/\text{MPa}$$

Per  $\Delta p = 5 \text{ MPa}$  la variazione di diametro del foro è:

$$\Delta D = 0.075 \text{ mm}$$

e la conseguente variazione di volume del tratto di foro pressurizzato risulta essere quindi:

$$\Delta V = (\pi/4)[(D_0 + \Delta D)^2 - D_0^2]L = 1485 \text{ mm}^3 = 1.485 \text{ cm}^3$$

mentre la correzione di volume da apportare è:

$$\Delta V_c = K\Delta p = 22.5 \text{ cm}^3$$

Nell'esempio, la correzione empirica è di gran lunga superiore alla reale variazione di volume del tratto di foro soggetto alla prova pressiométrica. Piccole imprecisioni nella calibrazione possono quindi determinare grandi imprecisioni nella valutazione del modulo.

L'esempio spiega perché nelle rocce, anche in quelle con bassa rigidità, i dilatometri del tipo a) siano inadeguati per le misure di modulo di deformabilità, in particolar modo se le prove sono realizzate a elevata profondità, dato che il valore di K aumenta con l'allungamento del circuito di pressurizzazione. Spesso l'elaborazione di prove in materiali rigidi con pressimetri del tipo Menard fornisce risultati fisicamente inaccettabili, come per esempio diminuzioni di diametro associate ad incrementi di pressione [BACCIARELLI, 1986].

Il campo di applicazione delle sonde di tipo a) dovrebbe essere quindi ristretto ai terreni e alle rocce molto alterate. Per i materiali lapidei è invece opportuno usare dilatometri del tipo b) o c).

A causa della deformabilità delle guaine di gomma, i dilatometri di tipo b) forniscono risultati meno precisi di quelli di tipo c): essi necessitano infatti di correzioni empiriche sulle misure dei trasduttori. Questi, in un materiale rigido, tendono a misurare la diminuzione di spessore della guaina piuttosto che l'effettiva variazione di diametro del foro.

Generalmente su un dilatometro di tipo c) sono montati 3 o 4 trasduttori di spostamento diametrali o radiali, per consentire di valutare dilatazioni anisotrope del foro [ROCHA et al., 1970] e per conferire ridondanza statistica al risultato di prova.

Oltre alle variazioni di diametro del foro, l'altra grandezza che è necessario registrare durante una

prova dilatometrica è la pressione applicata alla roccia. A tal fine tutti i dilatometri misurano la pressione interna del circuito idraulico con manometri o trasduttori di pressione elettrici.

Se vengono usati trasduttori di pressione, questi possono essere montati nel corpo del dilatometro. La possibilità di usufruire di un trasduttore di pressione di fondo foro permette di eliminare il problema della correzione idrostatica ai valori rilevati in superficie. Alternativamente, la correzione idrostatica diventa trascurabile se si usa gas (per esempio  $N_2$ ) per la pressurizzazione della guaina.

Con qualsiasi tipo di dilatometro, comunque, la pressione misurata deve venire corretta per tener conto della rigidità della guaina attraverso opportune procedure di calibrazione [ISRM, 1987]. Infatti, siccome la guaina ha rigidità non nulla, la pressione al suo interno è maggiore di quella applicata alla parete di roccia del foro.

### 3. Interpretazione convenzionale delle prove dilatometriche

Di solito, una prova dilatometrica consiste nel sottoporre la parete del foro ad una serie di cicli di pressurizzazione radiale misurando, a intervalli di tempo o di pressione prestabiliti, una serie di coppie di valori pressione-variazione diametricale (o radiale), eventualmente su più diametri del foro (Fig. 3).

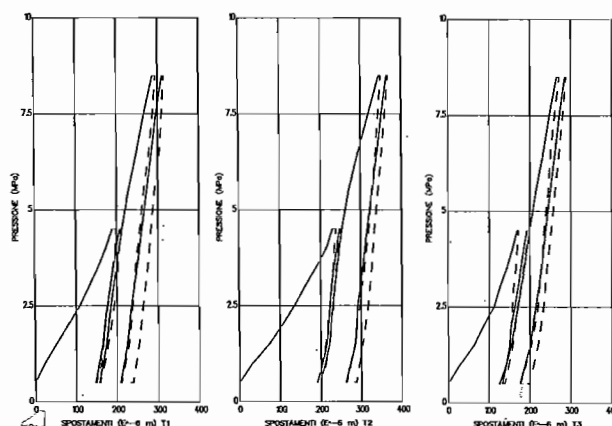


Fig. 3 - Pressione applicata al foro in funzione della variazione diametricale. Le curve sono state ottenute con un dilatometro dotato di tre trasduttori di spostamento diametrali.

Nel calcolo convenzionale del modulo E si ipotizza che la roccia sia omogenea, isotropa, lineare elastica; se il rapporto tra lunghezza e diametro del tratto di foro pressurizzato è sufficientemente elevato, durante la prova la sua zona centrale si mantiene in stato di deformazione piano. È allora possibile applicare alle

prove dilatometriche la soluzione elastica, dovuta a Lamé, del problema di una piastra di estensione infinita con un foro circolare pressurizzato internamente in stato di deformazione piano [ROCHA *et al.*, 1966] (Fig. 4).

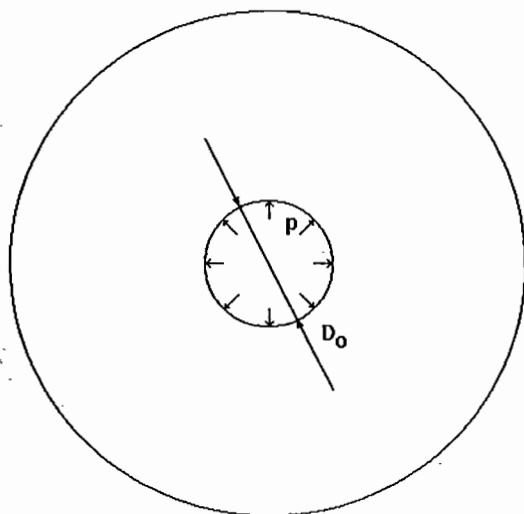


Fig. 4 - Schema del modello di piastra indefinita con foro circolare pressurizzato internamente adottato nell'interpretazione convenzionale.

Variando la pressione nel foro da un valore  $p_0$  a un valore  $p_1$ , il suo diametro varierà di conseguenza da  $D_0$  a  $D_1$ . Con queste ipotesi la relazione tra variazione diametrale e corrispondente variazione di pressione è fornita dalla teoria dell'elasticità e contiene i parametri elastici della roccia:

$$\Delta D = \frac{(1 + \nu) D_0 \Delta p}{E} \quad (1)$$

con:

$\Delta p = p_1 - p_0$  variazione di pressione

$\Delta D = D_1 - D_0$  variazione di diametro dovuta a  $\Delta p$

$E, \nu$  modulo di Young e coefficiente di Poisson della roccia

Se si misurano la variazione di pressione e la corrispondente variazione di diametro, il modulo della roccia può essere calcolato invertendo l'equazione (1). Al coefficiente di Poisson, se non è disponibile una valutazione sperimentale ottenuta, per esempio, con prove di laboratorio sulle carote estratte dal foro, di solito è attribuito il valore  $\nu = 0.25$ : infatti, nella maggior parte dei casi, il coefficiente di Poisson delle rocce varia in un campo piuttosto ristretto (è compreso tra 0.15 e 0.35) e un'imprecisione su  $\nu$  influisce minimamente sul valore di  $E$  calcolato con la (1).

Un'importante considerazione sull'interpretazione delle prove dilatometriche riguarda il volume di roc-

cia coinvolto. Per valutarlo in prima approssimazione si può, per esempio, considerare la pressurizzazione di un cilindro cavo a parete spessa con raggio interno  $a$  e raggio esterno  $b$ , soggetto a stato di deformazione piano.

Applicando internamente una pressione  $p$ , lo spostamento radiale  $u$  della parete del foro è dato dall'equazione [TIMOSHENKO e GOODIER, 1982]:

$$u = \frac{ap}{E} \cdot \frac{1 + c^2 + \nu - \nu c^2 - 2\nu^2 c^2}{1 - c^2} \quad (2)$$

con:

$$c = a/b$$

Usando l'equazione (2) è stato tracciato il grafico di Figura 5, che rappresenta lo spostamento radiale normalizzato  $uE/ap$  in funzione del rapporto  $b/a$ .

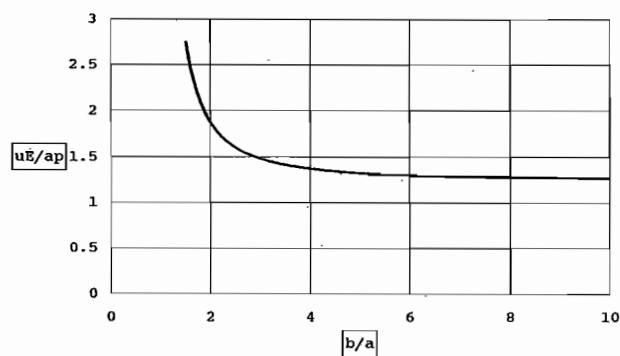


Fig. 5 - Grafico dello spostamento radiale normalizzato  $uE/ap$  in funzione del rapporto  $b/a$ , per un cilindro a parete spessa pressurizzato internamente.

Si nota che per  $b/a$  tendente a infinito,  $uE/ap$  tende asintoticamente al valore  $(1 + \nu)$ ; l'asintoto viene praticamente raggiunto per un rapporto  $b/a = 5$ . Nello schema elastico si può ritenere pertanto che, in prima approssimazione, detti  $L$  la lunghezza della sonda dilatometrica e  $a$  il raggio del foro, il volume di roccia coinvolto da una prova dilatometrica sia pari a:

$$V = \pi(5a)^2 L$$

Nel caso tipico in cui sia  $L = 1\text{m}$ ,  $a = 0.05\text{m}$ , il volume coinvolto dalla prova può essere ritenuto uguale a circa  $0.2\text{ m}^3$ .

Si tratta di un volume molto maggiore di quello di un provino da laboratorio, anche se non sempre può essere considerato rappresentativo dell'ammasso roccioso [EGGER, 1992].

#### 4. Interpretazione bilineare delle prove dilatometriche

L'equazione (1) presume che la roccia sia un mezzo continuo, omogeneo, lineare elastico, isotropo; implicitamente presuppone anche che la roccia abbia modulo a trazione  $E_t$  uguale a quello a compressione  $E_c$ . Nella realtà, però, si verifica sempre uno scostamento più o meno marcato da queste idealizzazioni: il parametro  $E$  valutato con l'equazione (1) va allora inteso come «modulo di deformabilità apparente» o «modulo secante dilatometrico» della roccia, piuttosto che come modulo di Young.

È possibile migliorare il modello interpretativo convenzionale, introducendo equazioni costitutive più complesse che tengano conto, per esempio, dell'anisotropia delle costanti elastiche della roccia [AMADEI, 1985], o del fatto che in molti casi le rocce abbiano modulo a trazione  $E_t$  minore di quello a compressione  $E_c$  [BRIAUD et al., 1986; ROEGIER, 1975].

Per studiare la prova con quest'ultima ipotesi si può assumere, in prima approssimazione, che la legge costitutiva della roccia sia bilineare (Fig. 6). Allora, non essendo più applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti, è necessario tener conto del fatto che la roccia intorno al foro, in generale, è sede di uno stato di sollecitazione originario compressivo  $S_0$ , che per il momento viene ipotizzato isotropo.

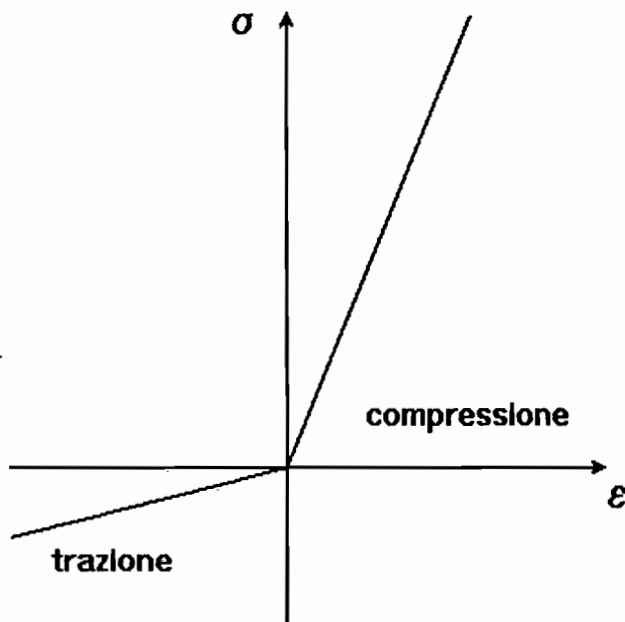


Fig. 6 - Grafico sforzo-deformazione idealizzato per un materiale bilineare.

L'esecuzione del foro ridistribuisce gli sforzi nella roccia circostante, senza però indurre sollecitazioni di trazione. Applicando una pressione  $p$  alla parete del foro, il nuovo campo di sollecitazioni può essere

descritto dalle seguenti equazioni riferite ad un sistema di coordinate cilindriche  $r\theta z$ , dove  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  rappresentano rispettivamente la sollecitazione radiale e quella circonferenziale [TIMOSHENKO e GOODIER, 1982]:

$$\sigma_r = (a^2/r^2) (p - S_0) + S_0 \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = -(a^2/r^2) (p - S_0) + S_0 \quad (4)$$

Esaminando le equazioni (3) e (4) si può osservare che la sollecitazione radiale  $\sigma_r$ , si mantiene sempre di compressione per qualsiasi valore di  $p$ , essendo tutt'al più nulla per  $p=0$ . Invece, per  $p > 2S_0$  si forma una corona di roccia in cui la componente circonferenziale  $\sigma_\theta$  diventa di trazione e, se si ipotizza che il materiale sia bilineare, le equazioni (3) e (4) non sono perciò più valide.

Nello schema adottato quindi, finché la pressione applicata alla parete del foro è inferiore a  $2S_0$ , il materiale si comporta isotropicamente ed è valida anche l'equazione (1) che fornisce il modulo a compressione  $E_c$  della roccia. Quando la pressione applicata supera la soglia  $2S_0$  si forma una corona di roccia soggetta a trazione. Da questo punto in poi, per la definizione dell'estensione della corona di roccia in trazione circonferenziale, del campo di sollecitazioni prodotto nella roccia dalla prova e dell'andamento degli spostamenti radiali della parete del foro in funzione della pressione applicata, occorre riformulare il problema in altri termini.

Il problema può venire risolto suddividendo la roccia in due zone in contatto tra loro (Fig. 7):

- una corona bilineare, di raggio esterno  $b$  e raggio interno  $a$ , dotata di anisotropia cilindrica, in cui la componente di sollecitazione circonferenziale è mi-

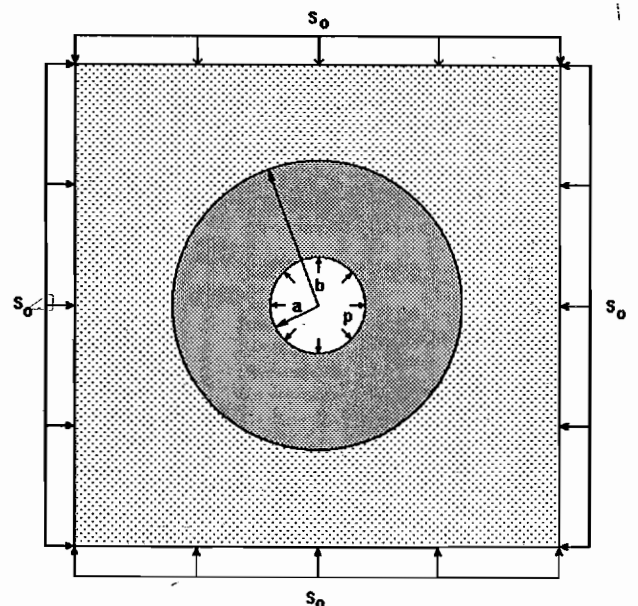


Fig. 7 - Schema del modello di piastra indefinita con foro circolare e corona di materiale con anisotropia cilindrica.

nore o uguale a zero (si considerano negative le trazioni);

- la restante roccia, isotropa, in cui la sollecitazione circonferenziale è maggiore o uguale a zero.

Infatti nella corona bilineare, in seguito alla simmetria cilindrica del problema rispetto all'asse del foro  $z$ , tutte le direzioni radiali sono soggette a compressione e quindi elasticamente equivalenti, e tutte le direzioni circonferenziali sono soggette a trazione ed elasticamente equivalenti tra loro. Inoltre, in ogni punto la direzione radiale è elasticamente equivalente a quella assiale  $z$ , anch'essa in compressione.

Il materiale della corona bilineare è quindi cilindricamente anisotropo [ЛЕКНИТСКИЙ, 1981], con asse di simmetria elastica coincidente con l'asse del foro. Punto per punto il materiale è trasversalmente isotropo nel piano  $rz$ .

In ogni punto, inoltre,  $r$ ,  $\theta$  e  $z$  sono direzioni principali di sollecitazione.

Per  $p > 2S_0$  sono quindi verificate le seguenti condizioni:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r > 0 \quad E_r = E_c \\ \sigma_\theta < 0 \quad E_\theta = E_t \\ \sigma_z > 0 \quad E_z = E_c \end{array} \right\} \text{ per } a < r < b$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r > 0 \quad E_r = E_c \\ \sigma_\theta < 0 \quad E_\theta = E_t \\ \sigma_z > 0 \quad E_z = E_c \end{array} \right\} \text{ per } r > b$$

Le equazioni costitutive della roccia nell'anello bilineare possono essere scritte nella forma:

$$\{\varepsilon\} = [\alpha] \{\sigma\} \quad (5)$$

dove è:

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad \{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \end{bmatrix}$$

e, ponendo:

$$E_r = E_1 = E_c$$

$$E_\theta = E_2 = E_t$$

$$E_z = E_1 = E_c$$

$$\nu_{rz} = \nu_{zr} = \nu_1$$

$$\nu_{\theta r} = \nu_{\theta z} = \nu_2$$

i coefficienti della matrice  $[\alpha]$  sono dati da:

$$\begin{array}{lll} \alpha_{11} = 1/E_1 & \alpha_{12} = -\nu_2/E_2 & \alpha_{13} = -\nu_1/E_1 \\ \alpha_{21} = -\nu_2/E_2 & \alpha_{22} = 1/E_2 & \alpha_{23} = -\nu_2/E_2 \\ \alpha_{31} = -\nu_1/E_1 & \alpha_{32} = -\nu_2/E_2 & \alpha_{33} = 1/E_1 \end{array}$$

Siano inoltre:

$$\beta_{11} = \alpha_{11} - \alpha_{13} \alpha_{13}/\alpha_{33}$$

$$\beta_{22} = \alpha_{22} - \alpha_{23} \alpha_{23}/\alpha_{33}$$

$$k = (\beta_{11}/\beta_{22})^{0.5}$$

$$\rho = r/b$$

$$c = a/b$$

Se  $q = \sigma_r|_{r=b}$  è la pressione di contatto tra anello bilineare e resto della roccia, lo stato di sforzo nella corona bilineare è espresso dalle equazioni [ЛЕКНИТСКИЙ, 1981]:

$$\sigma_r = -\frac{pc^{k+1}-q}{1-c^{2k}}\rho^{k-1} - \frac{qc^{k-1}-p}{1-c^{2k}}c^{k+1}\rho^{-k-1} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{pc^{k+1}-q}{1-c^{2k}}k\rho^{k-1} + \frac{qc^{k-1}-p}{1-c^{2k}}kc^{k+1}\rho^{-k-1} \quad (7)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\alpha_{33}} (\alpha_{31}\sigma_r + \alpha_{32}\sigma_\theta) \quad (8)$$

dove  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\sigma_z$  rappresentano rispettivamente la componente di tensione radiale, quella circonferenziale e quella assiale.

Nel resto della roccia le tensioni sono date dalle seguenti equazioni, ottenute dalle (3) e (4) ponendo  $a = b$  e  $p = q$ :

$$\sigma_r = (b^2/r^2)(q - S_0) + S_0 \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = -(b^2/r^2)(q - S_0) + S_0 \quad (10)$$

Imponendo che la tensione  $\sigma_\theta$  data dalla (10) sia nulla per  $r = b$  si ottiene la pressione di contatto  $q$  tra le due zone anulari:

$$q = 2S_0 \quad (11)$$

Sostituendo la (11) nella (7) e imponendo che  $\sigma_\theta$  sia nulla per  $r = b$  ( $\rho = 1$ ), si ottiene il raggio esterno  $b$  della zona bilineare; a tal fine occorre risolvere l'equazione in  $c$ :

$$pc^{k+1} - S_0c^{2k} - S_0 = 0 \quad (12)$$

Determinati  $q$  e  $b$ , la deformazione  $\varepsilon_\theta$  della parete del foro si calcola con la:

$$\varepsilon_\theta = \alpha_{21}\sigma_r + \alpha_{22}\sigma_\theta + \alpha_{23}\sigma_z \quad (13)$$

dove  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\sigma_z$  sono valutate con le equazioni (6), (7) ed (8), ponendo  $r = a$  ovvero  $\rho = c$ .

Siccome il problema è indipendente dalla coordinata angolare  $\Theta$  si può porre:

$$\epsilon_{\Theta} = -u/r \tag{14}$$

e quindi, se  $p > 2S_0$ , lo spostamento radiale  $u$  di un punto della parete del foro prodotto dalla pressione  $p$  applicata dal dilatometro è pertanto dato da:

$$u = -a\epsilon_{\Theta} - u_0 \tag{15}$$

con  $\epsilon_{\Theta}$  dato dall'equazione (13) e con  $u_0$  che rappresenta la convergenza radiale della parete del foro, che si sviluppa immediatamente dopo la sua perforazione a causa della sollecitazione originaria  $S_0$ :

$$u_0 = -2aS_0(1 + \nu_1^2)/E_1 \tag{16}$$

Questa soluzione è congruente solo se è  $\nu_1/E_1 = \nu_2/E_2$ ; infatti si può verificare che solo in questo caso lo spostamento radiale del confine esterno della zona bilineare è uguale a quello del confine interno della zona soggetta a compressione pura.

L'equazione (15) associa lo spostamento radiale  $u$  alla pressione applicata alla parete  $p$ , allo stato di sollecitazione originario  $S_0$ , al modulo a compressione della roccia  $E_c$ , al coefficiente di Poisson  $\nu_1$  e al rapporto di bilinearità  $E_c/E_t$ .

Misurando  $p$  e  $u$  e assumendo un valore plausibile per  $\nu_1$  e  $S_0$ , è quindi possibile determinare il modulo della roccia valutando nel contempo il rapporto  $E_t/E_c$ .

Per il caso:

$$\begin{aligned} E_c &= 10000 \text{ MPa} \\ \nu_1 &= 0.25 \\ a &= 50 \text{ mm} \\ S_0 &= 2 \text{ MPa} \end{aligned}$$

utilizzando la soluzione rappresentata dall'equazione (15) e risolvendo numericamente l'equazione (12), sono state prodotte, per rapporti  $E_c/E_t$  variabili tra 1 e 1000, le curve  $p$ - $u$  rappresentate in Figura 8.

Per  $E_c/E_t = 1$  il risultato coincide con quello della soluzione di Lamé espressa dall'equazione (1), mentre l'effetto di un rapporto  $E_c/E_t$  maggiore di 1 è quello di produrre la diminuzione del modulo secante dilatometrico. Con  $E_c/E_t = 1000$  la roccia è praticamente un materiale *no tension* [ZIEKIEWICZ, 1983], schematizzazione che è spesso adottata per rappresentare il comportamento delle rocce molto fratturate.

La soluzione chiusa proposta è ristretta al caso in cui lo stato di sollecitazione naturale sia isotropo nel

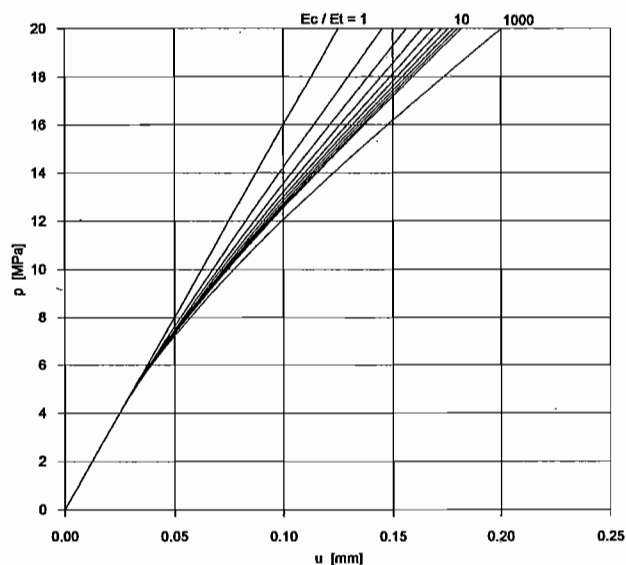


Fig. 8 - Curve pressione-spostamento radiale per una prova dilatometrica in materiale bilineare, ottenute applicando l'equazione 15. Le curve sono riferite, da sinistra verso destra, a rapporti di bilinearità:  $E_c/E_t = 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-1000$ .

piano trasversale all'asse del foro. L'effetto dell'anisotropia dello stato di sollecitazione originario è stato studiato ricorrendo a simulazioni di prova dilatometrica con elementi finiti. L'analisi è stata condotta su una discretizzazione costituita da 288 elementi quadrangolari a 8 nodi (Fig.9), implementando il modello costitutivo bilineare con la tecnica iterativa dello stato di sollecitazione iniziale, tipicamente usata per modellare un comportamento «no tension» [ZIEKIEWICZ, 1983].

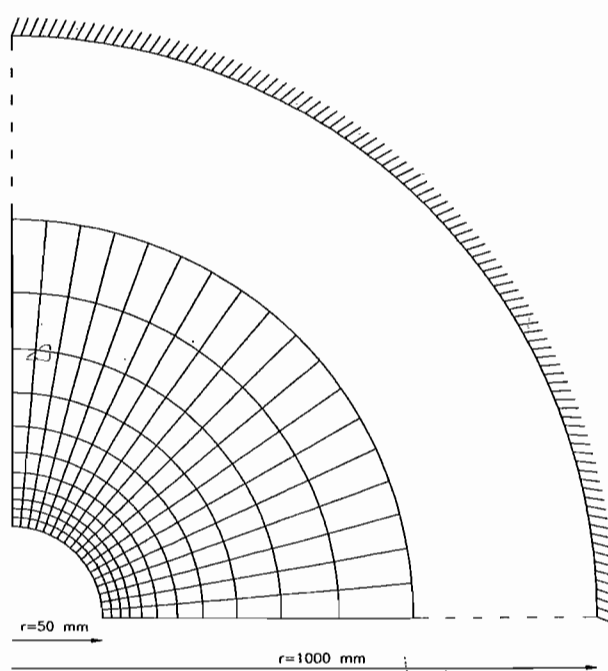


Fig. 9 - Schema della maglia adottata per l'analisi a elementi finiti.

Assumendo i seguenti valori per parametri elastici del materiale e per il raggio del foro:

$$\begin{aligned}
 E_c &= 10000 \text{ MPa} \\
 E_t &= 1000 \text{ MPa} \\
 \nu &= 0.25 \\
 a &= 50 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

sono stati analizzati con il metodo degli elementi finiti tre casi (Fig.10):

- caso A:  $S_1=2 \text{ MPa}$   $S_2=2 \text{ MPa}$   $S_3=2 \text{ MPa}$
- caso B:  $S_1=2 \text{ MPa}$   $S_2=1.5 \text{ MPa}$   $S_3=2 \text{ MPa}$
- caso C:  $S_1=2 \text{ MPa}$   $S_2=1 \text{ MPa}$   $S_3=2 \text{ MPa}$

Gli spostamenti radiali dei punti  $P_1$  e  $P_2$  (Fig. 10), ottenuti dall'analisi dei tre casi considerati, sono rappresentati nella Tabella I.

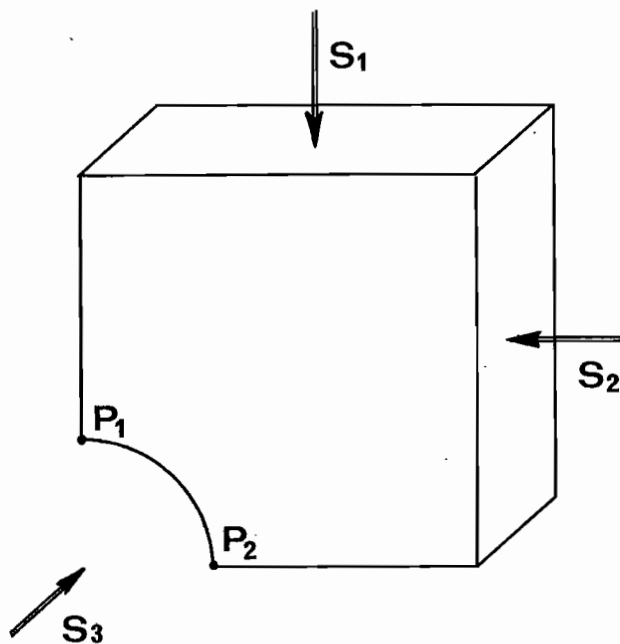


Fig. 10 - Orientazione delle tensioni principali originarie assunte per l'analisi a elementi finiti.

Tab. I - Spostamenti radiali dei punti  $P_1$  e  $P_2$  calcolati con l'analisi parametrica a elementi finiti.

caso A		caso B			caso C		
p [MPa]	u [mm]	p [MPa]	u(P1)[mm]	u(P2)[mm]	p [MPa]	u(P1)[mm]	u(P2)[mm]
0.0	0.00000	0.0	0.00000	0.00000	0.0	0.00000	0.00000
4.0	0.02448	2.5	0.01551	0.01551	1.0	0.00621	0.00621
6.0	0.03906	5.0	0.03105	0.03375	2.0	0.01217	0.01258
8.0	0.05629	7.5	0.05178	0.05625	5.0	0.03101	0.03772
10.0	0.07490	10.0	0.07515	0.08050	7.5	0.05205	0.06219
					10.0	0.07573	0.08771

Nella Figura 11 vengono comparati il risultato della soluzione chiusa con quello dell'analisi a elementi finiti per il caso di sollecitazione originaria isotropa (caso A), mentre nelle Figure 12 e 13 sono rappresentati i risultati dei casi B e C. Nella Figura 14 sono rappresentati gli spostamenti radiali della parete del foro ottenuti nel caso C prodotti da una pressione  $p = 10 \text{ MPa}$ .

I risultati ottenuti mostrano che, se la roccia è soggetta ad uno stato di sollecitazione originario anisotropo, lo spostamento radiale non è uniforme ma dipende dalla coordinata angolare  $\Theta$ . Lo spostamento radiale minimo si sviluppa parallelamente alla sollecitazione originaria massima. Inoltre, in entrambi i casi B e C, il grafico della pressione in funzione dello spostamento radiale minimo è molto simile a quello che si otterrebbe con la soluzione chiusa rappresentata dall'equazione (15) ponendo  $S_0 = S_1$ .

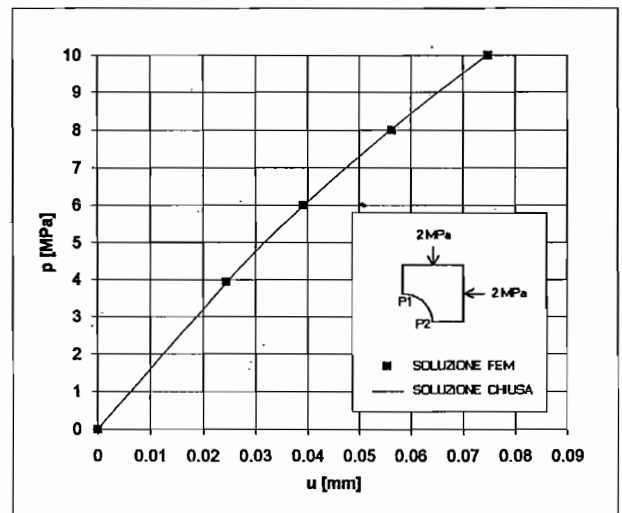


Fig. 11 - Comparazione tra la curva p-t ottenuta con la soluzione chiusa e quella ottenuta con elementi finiti per il caso di sollecitazione originaria isotropa.

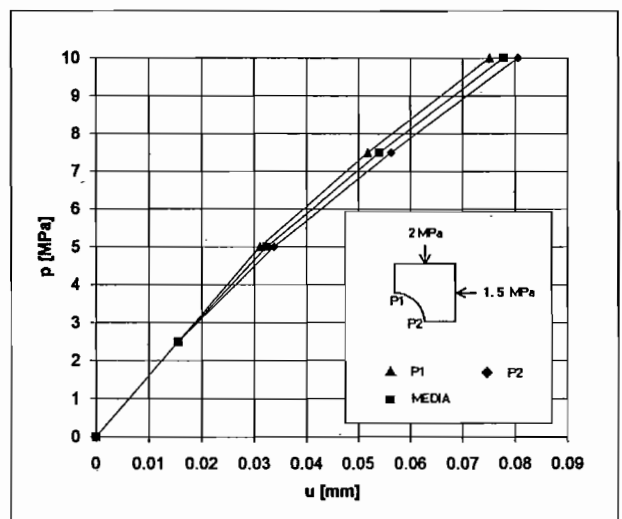


Fig. 12 - Curva p-u ottenuta con l'analisi a elementi finiti per il caso B.



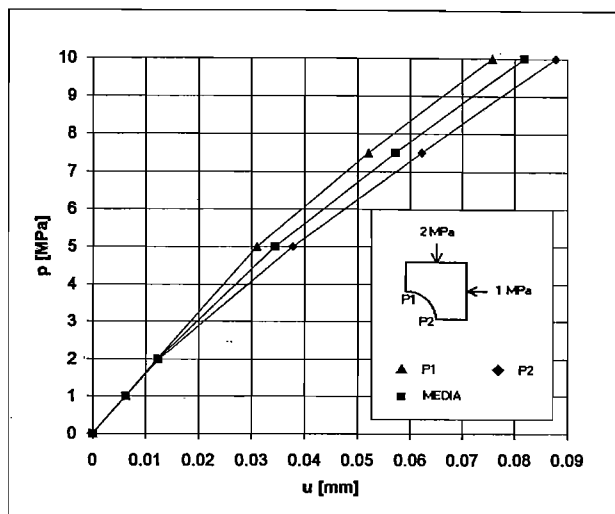


Fig. 13 - Curva p-u ottenuta con l'analisi a elementi finiti per il caso C.

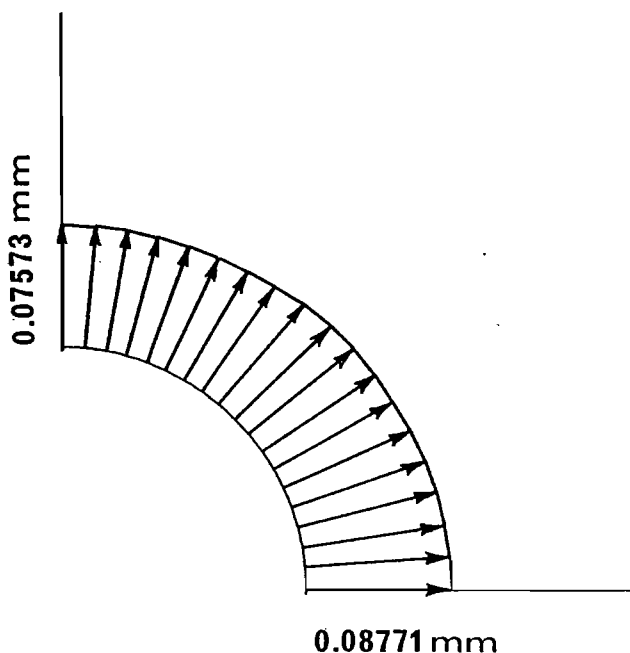


Fig. 14 - Spostamenti radiali della parete del foro, ottenuti con l'analisi a elementi finiti del caso C, con una pressione sulla parete  $p = 10$  MPa.

La soluzione chiusa rappresentata dell'equazione (15) risulta quindi utilizzabile anche quando lo stato di sollecitazione è anisotropo, soprattutto se l'attrezzatura di prova permette di evidenziare lo spostamento radiale minimo della parete del foro.

### 5. Esempio applicativo

Come esempio applicativo delle considerazioni teoriche presentate precedentemente, si prende in esame il caso di una campagna di caratterizzazione dell'ammasso roccioso, intrapresa nel cunicolo esplorativo per lo scavo di una caverna sotterranea destinata ad

alloggiare la sala macchine di una centrale idroelettrica. In tale occasione è stata eseguita una massiccia serie di prove geomeccaniche in situ e in laboratorio. Tra queste, per la valutazione del modulo dell'ammasso, sono state effettuate 31 prove dilatometriche in 7 sondaggi variamente orientati, perforati dal cunicolo esplorativo. Le prove dilatometriche sono state ubicate a profondità variabile tra 2 e 35 m.

Nello stesso cunicolo sono inoltre state effettuate 6 prove di carico su piastra, che hanno determinato un modulo di deformabilità medio  $E_d = 8416$  MPa.

L'ammasso roccioso, costituito da filladi scistose, è probabilmente caratterizzato da anisotropia delle costanti elastiche. Il risultato delle misure del modulo con prove di carico su piastra dipende quindi dalla direzione di carico, mentre quello delle prove dilatometriche è funzione delle orientazioni del sondaggio e dei tre trasduttori di spostamento del dilatometro. Al di là di questo, risulta interessante anche un'analisi globale di tutti i dati disponibili in questo caso, che può essere affrontata sulla base delle medie dei valori di modulo misurati con le due tecniche di prova.

Nella Tabella II vengono riassunti i valori del modulo ottenuti dalle prove dilatometriche applicando l'equazione (1).

Tab. II - Risultati delle prove dilatometriche eseguite per la caratterizzazione geomeccanica relativa allo scavo di una centrale idroelettrica in caverna. I moduli  $E_d$  sono calcolati con l'equazione (1).

PROVA	$E_d$ [MPa] [1]	$E_d$ [MPa] [2]	$E_d$ [MPa] [3]
1	5350	9400	20200
2	6450	6850	9320
3	1290	6667	12540
4	8140	10980	18180
5	7900	10253	16530
6	5070	7053	11730
7	3100	3156	3710
8	3460	3953	5640
9	13810	18183	24240
10	9920	10256	12990
11	9090	10136	12990
12	7900	8040	9570
13	4760	5473	7570
14	5270	5770	8260
15	4000	4153	5350
16	7850	8527	11730
17	3850	4970	7570
18	6770	7463	9830
19	12390	13196	18180
20	8080	8843	11370
21	11240	11410	12540
22	13980	14153	15800
23	14940	16527	24240
24	4470	4613	5770
25	14740	15340	19140
MEDIA	7753	9015	12600

[1] media armonica dei moduli ottenuti dai tre trasduttori.  
 [2] media aritmetica dei moduli ottenuti dai tre trasduttori.  
 [3] modulo ottenuto dal trasduttore che ha registrato la deformazione minima.

Con riferimento alla Tabella II, è opportuno fare una prima considerazione. Usando una sonda dilatometrica con tre trasduttori di spostamento diametrali, applicando l'equazione (1) a ciascuno dei tre trasduttori, si ottengono da un'unica prova tre valori del modulo  $E_d$ . Generalmente come risultato medio della prova si assume la loro media armonica. Volendo confrontare il risultato delle prove dilatometriche con quello delle prove di carico su piastra è però più opportuno riferirsi alla media aritmetica dei moduli determinati con i tre trasduttori: usare le medie armoniche significherebbe infatti dare più peso ai valori di  $E_d$  relativi a direzioni ortogonali alla scistosità ( $E_{d\perp} < E_{d\parallel}$ ), mentre nella media dei risultati delle prove di carico su piastra si tiene conto ugualmente delle due direzioni.

Il modulo di deformabilità dilatometrico, determinato sulla base delle medie aritmetiche dei tre trasduttori ( $E_d = 9015$  MPa) è molto simile a quello calcolato con prove di carico su piastra. Poiché le prove di carico su piastra coinvolgono volumi di roccia maggiori rispetto a quelle dilatometriche (indicativamente si può ritenere che il volume coinvolto sia dell'ordine di  $1 \text{ m}^3$ ), ci si aspetterebbe qualche effetto di scala: i moduli misurati con le prove di carico su piastra dovrebbero quindi essere minori di quelli dilatometrici.

Il fatto che in questo caso i risultati dei due metodi siano sostanzialmente uguali potrebbe essere spiegato in due modi: il volume di roccia coinvolto dalle prove dilatometriche era sufficientemente rappresentativo dell'ammasso roccioso, oppure l'effetto di scala è stato bilanciato da altri fenomeni.

Probabilmente è più corretta la seconda spiegazione: se da un lato la scala minore avrebbe dato luogo a valori di modulo maggiori, il comportamento bilineare della roccia potrebbe aver prodotto un contemporaneo abbassamento del modulo dilatometrico apparente. A proposito, si noti che nella campagna di prove in situ in questione è stato misurato anche lo stato di sollecitazione originario, le cui tensioni principali sono risultate essere 1.9 MPa, 2.3 MPa, 5.2 MPa. Quindi, le prove dilatometriche (i moduli della Tabella II sono stati calcolati su cicli di carico da 3.5 a 6.5 MPa) potrebbero avere indotto sforzi di trazione nella parete del foro: alla luce di quanto visto precedentemente, il comportamento bilineare della roccia potrebbe avere influito abbassando i valori del modulo dilatometrico valutati con la (1). L'effetto di scala potrebbe quindi essere stato compensato.

Per eliminare, in prima approssimazione, l'influenza di un'eventuale bilinearità della roccia senza entrare nei dettagli delle singole prove, tenendo conto delle considerazioni teoriche esposte precedentemente

si può ipotizzare che il comportamento dei trasduttori che hanno registrato maggiori deformazioni diametrali sia stato influenzato dalla bilinearità della roccia più che dalla sua anisotropia; per ogni prova si può allora selezionare il risultato del trasduttore di spostamento che ha fornito la variazione di diametro minima.

Osservato che, probabilmente, nel piano trasversale ai fori usati per le prove almeno un componente di tensione era superiore a 3 MPa (la tensione originaria massima è 5.2 MPa) e poiché la Tabella II è riferita a una pressione massima poco superiore a 6 MPa, la variazione di diametro minima può essere interpretata con l'equazione (1). Infatti (Fig. 12 e 13), finché la pressione di prova non supera il doppio della sollecitazione trasversale massima, il trasduttore che registra la variazione diametrale minima non risente della bilinearità della roccia. Si ottiene quindi un modulo dilatometrico medio di 12600 MPa (Tab. II). Il risultato così ottenuto è rappresentato nella Figura 15, dove viene evidenziato l'effetto di scala sul modulo di deformabilità della roccia, comparando la media dei moduli dilatometrici così valutati con quella ottenuta dalle prove di carico su piastra e con il valore medio di  $E$  misurato in 30 prove di compressione in laboratorio, su provini cilindrici con diametro 83 mm e altezza 170 mm.

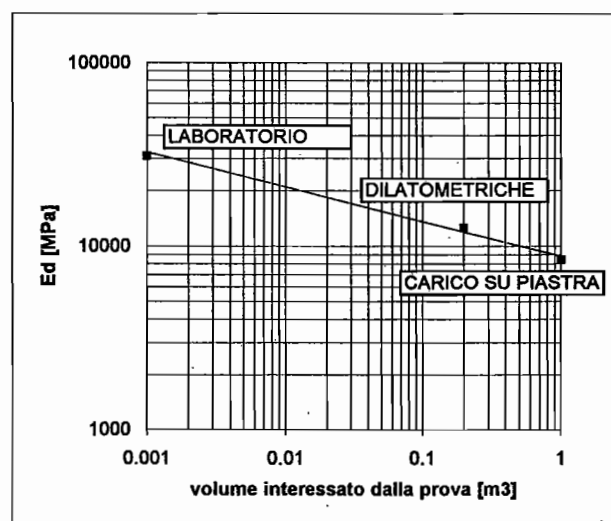


Fig. 15 - Effetto di scala sul modulo di deformabilità di una fillade.

## 6. Conclusioni

Attualmente le prove dilatometriche sono uno dei mezzi più versatili per determinare in situ il modulo di deformabilità statico degli ammassi rocciosi. Recenti esperienze dimostrano che con questa tecnica di prova si possono raggiungere almeno profondità nel foro dell'ordine di 500 m: ciò fa delle prove dilatometriche l'unico metodo per la misura del mo-

dulo di deformabilità che può essere usato nei sondaggi esplorativi profondi, eseguiti nelle prime fasi di indagine di un progetto geomeccanico.

Se il materiale indagato è lapideo, è necessario usare dilatometri sviluppati specificamente per la roccia, che misurino direttamente la variazione del diametro del foro con trasduttori di spostamento, in special modo se la profondità di prova rende necessaria l'adozione di un circuito di pressurizzazione lungo.

Dal punto di vista interpretativo, l'analisi dei dati dilatometrici è generalmente abbastanza semplice: le difficoltà maggiori stanno forse nel valutare la possibilità di scostamenti dalle idealizzazioni teoriche, che possono influire sulla determinazione del modulo dilatometrico. In particolare è stata presa in esame l'eventualità che la roccia esibisca un comportamento bilineare, ovvero che abbia moduli elastici diversi a trazione e compressione. A tal fine è stata proposta una soluzione chiusa che permette di analizzare prove dilatometriche in una situazione di sollecitazione originaria idrostatica nel piano trasversale all'asse del foro. Un'analisi ad elementi finiti ha permesso di verificare l'applicabilità di tale soluzione al caso di sollecitazione originaria anisotropa.

### Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ing. Massimo Borsetto dell'ISMES e l'Ing. Carlo Bardani per la collaborazione prestata nell'analisi a elementi finiti.

### BIBLIOGRAFIA

- AMADEI B. (1985) - *The influence of rock mass fracturing on the measurement of deformability by borehole expansion tests*. 26th US Symp. on Rock Mech., Rapid City, Sd.
- BACCIARELLI R.E. (1986). - *The calibration and use of high capacity pressuremeter to determine rock stiffness*. The Pressuremeter and its Marine Application 2nd Int. Symp., ASTM.
- BAGUELIN F., JEZEQUEL J.F., SHIELDS D.H. (1978) - *The pressuremeter and foundation engineering*. Trans Tech Publications, 1st Edition.
- BRIAUD J.L., TUCKER L.M., MAKARIM C.A. (1986) - *Pressuremeter standard and pressuremeter parameters*. The Pressuremeter and its Marine Application 2nd Int. Symp., ASTM.

EGGER P. (1992) - *Role of laboratory and in situ testing for design in rock engineering applications*. Atti del Quarto Ciclo di Conferenze di Meccanica delle Rocce, Torino.

HEUZE F.E., AMADEI B. (1985) - *The NX-Borehole Jack: a lesson in trials and errors*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, vol. XXII, n. 2.

ISRM COMMISSION ON TERMINOLOGY, SYMBOLS AND GRAPHIC REPRESENTATION (1975) - *Terminology*. (English, French, German).

ISRM COMMISSION ON TESTING METHODS (1987) - *Suggested methods for deformability determination using a flexible dilatometer*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. e Geomech. Abstr, vol. XXIV, n. 2.

LEKHNITSKII S.G. (1981) - *Theory of elasticity of an anisotropic body*. MIR Publishers, Mosca.

MARCHETTI S. (1983) - *Il dilatometro piatto*. Atti dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni del Politecnico di Torino, n. 609.

ROCHA M., SILVEIRA A., GROSSMAN N.F., OLIVEIRA R. (1966) - *Determination of the deformability of rock masses along boreholes*. Proc. 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbona.

ROCHA M., SILVEIRA A., RODRIGUES J.D., SILVEIRO A., FERREIRA M.J.E. (1970) - *Characterization of the deformability of rock masses by dilatometer tests*. Proc. 2nd Congress of the International Society of Rock Mechanics, Belgrado.

ROGIER J.C. (1975) - *The development and evaluation of a field method for in situ stress determination using hydraulic fracturing*. University of Minnesota, Technical Report MRD, 1, 75.

TIMOSHENKO S.P., GOODIER J.N. (1982) - *Theory of elasticity*. Mc. Graw-Hill.

ZIENKIEWICZ O.C. (1983) - *The finite element method*. McGraw-Hill Book Company.

### ABSTRACT

In rock mechanics, the test where a cylindrical probe exerts a pressure on the borehole walls producing a borehole dilation, is called dilatometric.

The dilatometric tests are one of the most versatile methods to determine in situ rock deformability. They are borehole tests that can reach depths of hundreds of meters. Thus it is possible to carry out dilatometric tests in the initial investigation phase of a geomechanics project, exploiting the exploratory boreholes.

The paper examines the dilatometric equipments for rock, with particular attention to the method used for the borehole diametral strain measurement.

Then, the method to interpret the dilatometric tests is explained. The interpretation is based on equations resulting from the theory of elasticity. Due to the bilinear behaviour of rocks (the modulus in tension is lower than the modulus in compression), the interpretative model usually used can be inadequate if the borehole walls are subjected to tension. In order to study the effect of rock bilinearity an alternate closed solution is proposed.

Finally, a case study in which dilatometric tests were performed and interpreted, is expounded. The previous theoretical considerations allowed to reinterpret the case taking into account the rock bilinearity.