

Progressi nella realizzazione e nell'interpretazione delle prove di carico su piastra negli ammassi rocciosi

A. LEMBO-FAZIO *, R. RIBACCHI **

SOMMARIO: Nella nota vengono esaminati i perfezionamenti recentemente apportati alla tecnica di esecuzione della prova di carico su piastra e la possibilità di migliorare l'interpretazione dei dati di misura per la valutazione delle caratteristiche elastiche degli ammassi rocciosi. L'influenza dei vari fattori non considerati nel modello semplificato di semispazio omogeneo ed isotropo è stata analizzata con metodi numerici; per le comuni geometrie di prova, l'errore maggiore nella valutazione del modulo dell'ammasso roccioso indisturbato è da attribuire alla presenza di una fascia allentata ad immediato contatto con la superficie di carico.

Il notevole numero di prove effettuate e la grande varietà degli ammassi rocciosi investigati hanno permesso di identificare alcuni comportamenti tipici. Si è infine cercato di correlare i moduli con vari indici proposti per definire la « qualità » della roccia.

1. Introduzione

La prova di carico su piastra viene correntemente utilizzata nelle indagini in situ per la valutazione delle caratteristiche di deformabilità degli ammassi rocciosi. Negli ultimi 15 anni indagini di questo tipo sono state effettuate per la progettazione e la costruzione di grandi opere di ingegneria civile (in particolare centrali in caverna e grandi dighe), che hanno interessato svariati tipi di ammassi rocciosi con caratteristiche molto diverse tra loro.

L'ampia esperienza acquisita ha consentito di perfezionare gradualmente le tecniche di prova ed i metodi di interpretazione, grazie anche alla collaborazione tra ricercatori dell'Università, l'ISMES (Istituto Sperimentale Modelli e Strutture), il Centro Ricerche Idrauliche e Strutturali ed il Servizio Geotecnico dell'ENEL. Le prospettive di tale processo di evoluzione erano già state individuate in una nota presentata al III Convegno della Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (MANFREDINI *et al.*, 1974).

2. Miglioramenti nelle tecniche di prova

Nella maggior parte dei casi la prova viene effettuata in cunicoli esplorativi di piccolo diametro (1.8 ÷ 3.0 m) applicando il carico, mediante apposite apparecchiature di contrasto, su due superfici diametralmente opposte del

cunicolo stesso (fig. 1). La prova viene realizzata per cicli successivi di carico e scarico (fig. 2), con livello gradualmente crescente del carico massimo, usualmente fino a valori di pressione applicata di 10-12 MPa; il diametro delle superfici di carico varia da 0.5 a 1.0 m.

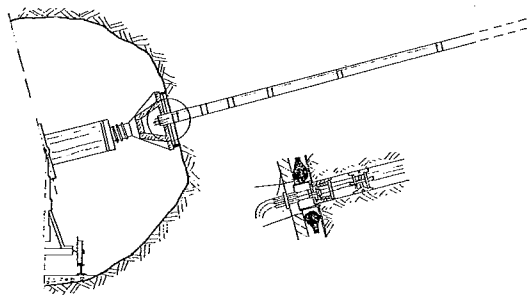


Fig. 1. - Schema di esecuzione della prova in cunicolo e particolare del sistema di misura degli spostamenti all'imbocco del foro di misura.

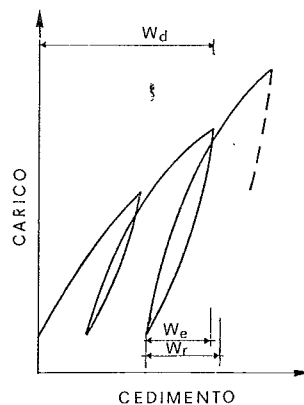


Fig. 2. - Rappresentazione schematica della curva carico-cedimento di una prova di carico su piastra con cicli successivi di carico e scarico.

* Ing. A. LEMBO-FAZIO, collaboratore Cattedra di Meccanica delle Rocce, Facoltà di Ingegneria, Roma.

** Ing. R. RIBACCHI, Professore Ordinario, Cattedra di Meccanica delle Rocce, Facoltà di Ingegneria, Roma.

I valori dei moduli possono essere calcolati:

— sulla base dei cedimenti totali, w_d , dall'inizio della prova;

— sulla base dei cedimenti, w_s , rilevati in fase di scarico;

— sulla base dei cedimenti rilevati in successivi cicli di carico, con valori inferiori alla pressione massima precedentemente raggiunta.

Il modulo ottenuto sulla base dei cedimenti totali è comunemente indicato come « modulo di deformabilità, E_d »; quelli ottenuti con i cedimenti w_s o w_r , in genere poco diversi tra loro, sono indicati come moduli elastici, E_e , anche se quest'ultima dizione non è del tutto corretta.

Tra i più significativi perfezionamenti, introdotti nella tecnica di prove, si possono citare i seguenti:

a) Gli spostamenti vengono rilevati sia lungo l'asse di carico, in un foro da sonda predisposto, sia sulla superficie del terreno a due diverse distanze dal bordo del carico. Gli spostamenti vengono misurati mediante trasduttori induttivi, con precisione di 0.01 mm. Gli spostamenti in profondità lungo l'asse di carico vengono riportati in superficie mediante estensimetri a barra ancorati con sistemi meccanici ad espansione; ciò che si rileva è pertanto lo spostamento relativo tra le varie ancorette ed un punto situato in superficie (più precisamente qualche centimetro sotto la superficie). Usualmente i punti di misura sono ubicati a profondità variabili da 0.25 a 3.5 m.

b) La preparazione delle superfici di carico è effettuata mediante fresa frontale montata sulle aste della sonda con cui viene perforato il foro in asse al carico. Si ottiene così un piano liscio e regolare che consente di applicare il carico alla roccia senza l'interposizione di materiali di ripartizione.

c) Il carico viene applicato mediante martinetti piatti così che la distribuzione delle pressioni sulla roccia è perfettamente nota (in questo caso uniforme) e non influenzata dalla rigidità relativa tra piastra e terreno. Data la presenza del foro verticale sull'asse di carico i martinetti debbono avere una forma anulare.

d) I carichi e gli spostamenti rilevati sulle due posizioni opposte del cunicolo (26 in tutto per ogni prova) vengono registrati su centralina automatica.

3. Interpretazione delle prove

3.1 Analisi preliminari

Una interpretazione preliminare dei dati di misura viene generalmente effettuata assumendo per la roccia un modello semplificato di un semispazio elastico omogeneo ed isotropo applicando le note relazioni di Boussinesq.

Lo spostamento verticale $w_z(r)$ di un punto sulla superficie a distanza r dal centro della zona di carico (fig. 3) è dato da:

$$w_z(r) = \frac{pa(1-\nu^2)}{E} \left[K_r(a/r) - \frac{a'}{a} K_r(a'/r) \right] \quad (1)$$

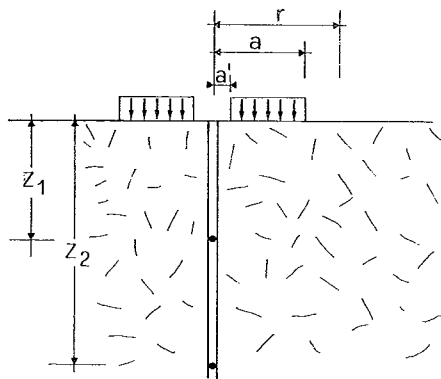


Fig. 3. - Modello geometrico adottato per l'interpretazione dei dati di misura nel caso di semispazio omogeneo ed isotropo.

in cui p è la pressione applicata, a ed a' i raggi rispettivamente esterno ed interno della piastra, E il modulo elastico incognito e ν il coefficiente di Poisson (generalmente assunto a stima).

Il parametro adimensionale K_r è dato da (STAGG, 1968):

$$K_r(\rho) = \frac{4}{\pi\rho} E(\rho) - (1-\rho^2) F(\rho) \quad (2)$$

in cui E e F sono gli integrali ellittici di prima e seconda specie.

Lo spostamento verticale $w_z(z)$ dei punti situati sull'asse di carico alla profondità z è dato da:

$$w_z(z) = \frac{pa(1-\nu^2)}{E} \left[K_z(z/a) - \frac{a'}{a} K_z(z/a') \right] \quad (3)$$

in cui

$$K_z(\zeta) = 2(\sqrt{1+\zeta^2} - \zeta) \cdot \{1 + \zeta[2(1-\nu)\sqrt{1+\zeta^2}]^{-1}\} \quad (4)$$

La misura degli spostamenti di due punti situati rispettivamente alle profondità z_1 e z_2 permette quindi di valutare un modulo elastico « medio » dell'ammasso roccioso nel tratto $z_1 - z_2$ mediante la relazione seguente:

$$E = pa(1-\nu^2) \left[\frac{K'_{z_1} - K'_{z_2}}{w_{z_1} - w_{z_2}} \right] \quad (5)$$

in cui

$$K'_{z_i} = \left[K_z(z_i/a) - \frac{a_i}{a} K_z(z_i/a') \right] \quad (6)$$

È da notare che l'applicazione delle relazioni (5) e (6) anche alle condizioni di mezzo disomogeneo, quando cioè i moduli variano in funzione della profondità, equivale in sostanza a ritenere sufficientemente approssimata l'ipotesi di STEINBRENNER (1934) secondo cui lo stato di sforzo indotto da un carico superficiale nell'interno di un semispazio è poco influenzato dalla presenza di eventuali disomogeneità del materiale.

Il procedimento di calcolo precedentemente esposto, largamente utilizzato per la semplicità delle relazioni analitiche e, per tale motivo, suggerito anche dalle raccomandazioni della ISRM (1979) può determinare talora errori sensibili nella valutazione del modulo elastico dell'ammasso roccioso; alcuni dei fattori di errore sono schematizzati nella fig. 4.

Per valutare l'influenza di questi fattori e per determinare eventualmente i coefficienti correttivi da applicare alle relazioni (1) ÷ (6) sono in corso indagini mediante modelli numerici (BORSETTO e LEMBO-FAZIO, 1983); qui di seguito vengono brevemente illustrati alcuni risultati preliminari di tale indagine.

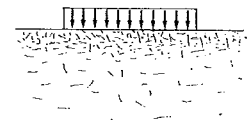
3.2 Fascia allentata

Il fattore più importante è probabilmente la presenza di una fascia allentata sulla parete

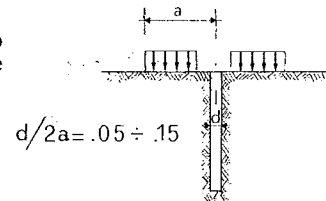
della galleria dove sono eseguite le misure. La presenza di tale fascia deriva dal disturbo causato dalle operazioni di scavo (particolarmente sensibile quando si procede ad abbattimento con esplosivo) ed eventualmente anche dalle deformazioni « plastiche » indotte dal superamento della resistenza dell'ammasso roccioso.

Lo spessore di tale fascia ed il suo grado di allentamento possono essere determinate mediante rilievi geofisici in situ basati sia su metodi a rifrazione (BERNABINI e BORELLI, 1974; BRIZZOLARI, 1981), sia su carotaggio sonico in foro (CARABELLI, 1978). Indagini di questo tipo sono state sistematicamente effettuate in quasi tutte le campagne di misure delle caratteristiche di deformabilità in situ.

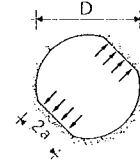
- 1) Presenza di uno strato allentato in superficie



- 2) Presenza di un foro centrale lungo l'asse di carico



- 3) Diametro della piastra non trascurabile rispetto al diametro della galleria



- 4) Anisotropia della roccia

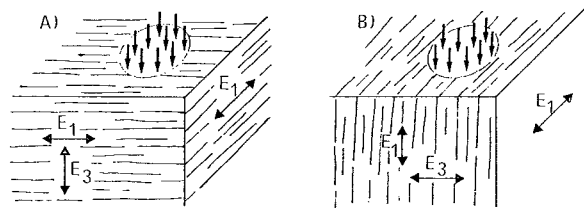


Fig. 4. - Fattori da considerare per una più precisa interpretazione della prova di carico su piastra.

È sempre conveniente ridurre l'estensione ed il grado di disturbo di tale fascia allentata, adottando ad esempio tecniche di scavo di tipo « controlled blasting »; è però praticamente impossibile eliminarla completamente.

Per una valutazione orientativa delle caratteristiche della fascia allentata si può fare riferimento alla fig. 5, in cui sono riportati, per diversi tipi di ammassi rocciosi, i valori (approssimati) del rapporto tra modulo elastico della zona allentata e modulo dell'ammasso roccioso indisturbato sottostante. Il tipico campo di riduzione del modulo risulta compreso fra il 30 e il 70%.

La fig. 6 mette in evidenza che una interpretazione basata sugli spostamenti dei punti in su-

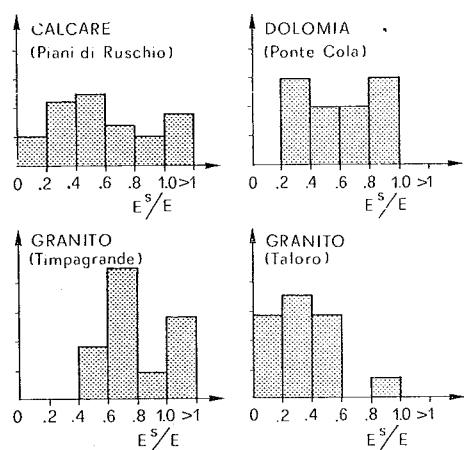


Fig. 5. - Rapporti fra i moduli elastici della fascia allentata E^s e quelli dell'ammasso roccioso indisturbato E per alcuni siti investigati.

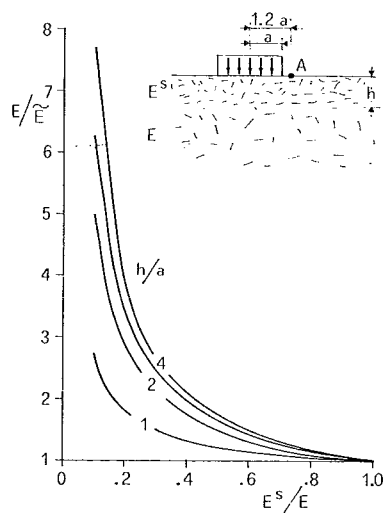


Fig. 6. - Influenza del grado di allentamento della fascia superficiale e dello spessore di tale fascia sulla valutazione del modulo elastico con misure in superficie (punto A).

perficie porterebbe ad una notevole sottostima dei moduli dell'ammasso roccioso indisturbato. Alcuni anni fa, quando le misure degli spostamenti venivano effettuate solo in superficie, era stato proposto (MANFREDINI *et al.*, 1974) di ottenere una stima delle caratteristiche elastiche dell'ammasso roccioso indisturbato e della fascia allentata sovrastante mediante il confronto dei cedimenti verticali misurati a varie distanze dal centro della piastra. Il metodo si è però rivelato delicato e molto sensibile all'influenza di altri fattori di disturbo, come ad esempio la curvatura delle pareti della galleria di prova.

Un notevole contributo alla soluzione del problema è stato naturalmente fornito dall'adozione delle misure in profondità lungo l'asse di carico. L'applicazione delle relazioni (5) e (6) tra varie ancore adiacenti consentirebbe in teoria di determinare una eventuale graduale variazione del modulo con la profondità; tuttavia per le ancore più profonde gli spostamenti relativi tra punti adiacenti sono piccoli e la stima del modulo è molto influenzata da errori di misura. In pratica viene perciò molto spesso adottato per l'interpretazione un modello a due strati, ciascuno con caratteristiche elastiche omogenee.

Si sta indagando sugli errori introdotti dall'applicazione delle relazioni (5) e (6) nella situazione di un mezzo a due strati (BORSETTO e LEMBO-FAZIO, 1983); si è utilizzato allo scopo un modello numerico per elementi finiti in condizioni di simmetria assiale. A titolo di esempio nella fig. 7 sono riportati i coefficienti correttivi η ed η^s per ottenere i valori veri dei moduli rispettivamente della zona profonda e della fascia superficiale sulla base dei moduli apparenti determinati con l'applicazione delle relazioni (5) e (6). La figura indica che il metodo approssimato tende a sottostimare sia il modulo vero dell'ammasso roccioso indisturbato, sia quello della fascia allentata. L'errore è però importante solo quando la fascia superficiale è molto allentata o presenta notevoli spessori.

3.3 Influenza del foro centrale

Le indagini numeriche effettuate hanno messo in evidenza che l'effetto del foro è sensibile solo nei riguardi degli spostamenti dei punti situati a profondità minori di circa due volte il diametro del foro. In conseguenza di ciò il foro non influenza significativamente la stima del modulo dell'ammasso roccioso indisturbato, che è basata sugli spostamenti di ancore più profonde.

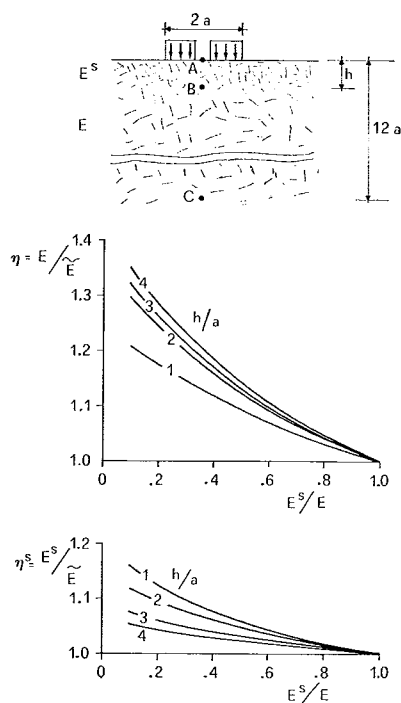


Fig. 7. - Coefficienti correttivi per la valutazione dei moduli elastici veri dell'ammasso roccioso indisturbato (E) e della fascia allentata (E^s) sulla base dei valori apparenti E ed E^s calcolati con l'ipotesi di Steinbrenner; il modulo E^s è determinato sulla base della differenza dei cedimenti tra due punti situati rispettivamente in superficie (A) e alla base della fascia allentata (B); il modulo E sulla base della differenza di spostamento tra la base della fascia allentata ed un punto profondo (C).

3.4 Influenza della curvatura della galleria

Le relazioni (1) ÷ (6) sono basate sull'ipotesi che il carico sia applicato sulla superficie di un semispazio; pertanto, quando le misure sono effettuate entro cunicoli, esse introducono errori nell'interpretazione tanto maggiori quanto minore è il rapporto tra il diametro della galleria e quello della piastra. Per indagare su tale fattore è stato necessario ricorrere a modelli numerici tridimensionali; alcuni risultati preliminari hanno indicato che, con le geometrie di prova più comunemente adottate, l'applicazione delle relazioni (1)-(6) può portare ad una sovrastima dei moduli dell'ordine del 15%.

3.5 Anisotropia dell'ammasso roccioso

In molti casi le prove di carico su piastra sono state effettuate in formazioni rocciose caratterizzate da una accentuata tessitura orientata o una vera e propria scistosità. Il comportamento di queste rocce può essere spesso assimilato a quello di un mezzo con anisotropia polare (detto anche trasversalmente isotropo), caratterizzato da 5 parametri elastici indipen-

denti (fig. 4,4): due moduli di Young E_1 e E_3 , un modulo di taglio G_{13} e due coefficienti di Poisson ν_{31} e ν_{21} . In pratica i valori dei coefficienti di Poisson vengono spesso assunti a stima in quanto la loro influenza per i problemi geomeccanici è meno rilevante.

In formazioni di questo tipo le prove vengono usualmente realizzate entro cunicoli tracciati in direzione, eseguendo in ciascuna sezione due coppie di prove con assi di carico rispettivamente normali e paralleli al piano di scistosità (fig. 8). In prima approssimazione si applicano ancora le relazioni (1) ÷ (6) e si ipotizza che le prove tipo A forniscano il modulo principale minore E_3 e le prove tipo B il modulo principale maggiore E_1 .

Per una valutazione più precisa, nel caso A delle figg. 4 e 8 (carico normale al piano di scistosità) si può ricorrere a soluzioni analitiche in forma chiusa (POULOS e DAVIS, 1974), valide però solo nell'ipotesi di carico sulla superficie di un semispazio omogeneo.

Nel caso B delle figg. 4 e 8 (carico parallelo al piano di scistosità) è necessario invece ricorrere a modelli numerici tridimensionali in quanto l'asse di simmetria del mezzo non coincide con quello del carico (BORSETTO e LEMBO-FAZIO, 1983).

I risultati di un'indagine parametrica hanno mostrato che gli spostamenti lungo l'asse di carico sono influenzati principalmente dal modulo di Young secondo la direzione dell'asse stesso (rispettivamente E_3 o E_1 nei casi A e B) e dal modulo di taglio G_{13} ; l'influenza del rapporto di anisotropia $R_E = E_1/E_3$ è invece subordinata, come è messo in evidenza nella fig. 9. Ciò consente di semplificare in una certa misura l'interpretazione della prova; tuttavia il cedimento misurato dipende adesso non più da un

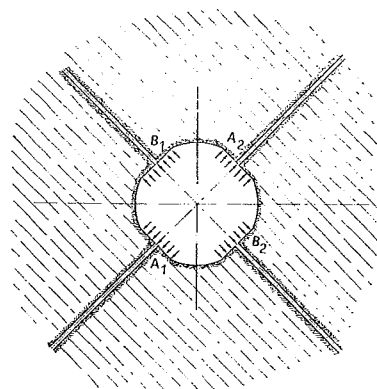


Fig. 8. - Schema di esecuzione delle prove di carico su piastra in formazioni rocciose con una accentuata scistosità o con tessitura orientata.

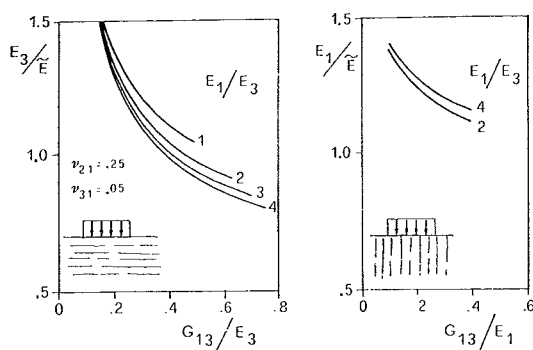


Fig. 9. - Rapporti tra i moduli veri lungo l'asse di carico e i moduli apparenti determinati con l'applicazione delle relazioni valide per un semispazio isotropo, in funzione del rapporto di anisotropia e del modulo di taglio. Le curve sono basate sugli spostamenti in superficie al centro della piastra.

solo parametro principale, come per le rocce isotrope, ma da due parametri indipendenti principali, cioè il modulo di Young lungo l'asse di carico e il modulo di taglio; quindi il complesso di misure illustrato nella fig. 8 non consente di determinare univocamente i parametri elastici della roccia.

È stato proposto (OBERTI *et al.*, 1979) di utilizzare l'andamento della curva dei cedimenti lungo l'asse di carico in funzione della profondità per ricavare le informazioni supplementari richieste per risolvere il problema. Anche se il procedimento è teoricamente valido, vari fattori di disturbo, quali ad esempio l'influenza della fascia allentata sulla distribuzione degli sforzi, ne rendono dubbia l'utilizzazione pratica.

Per risolvere il problema, in molte applicazioni si ricorre ad ipotesi a priori sulla dipendenza del modulo di taglio G_{13} dalle altre costanti elastiche. Due di queste ipotesi sono rappresentate dalle relazioni:

$$\frac{1}{G_{13}} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} + \frac{2\nu_{31}}{E_3} \quad (7)$$

$$G_{13} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{31})} \quad (8)$$

Il primo modello (ipotesi isoG) che risale a Saint-Venant, fornisce una rappresentazione corretta del tipo di anisotropia derivante solo dalla presenza di microfessure aperte nell'ammasso roccioso, come in realtà spesso si verifica (CREA *et al.*, 1981).

Il secondo modello è invece valido con buona approssimazione quando l'anisotropia deriva dall'alternanza di livelli di materiali isotropi con caratteristiche elastiche diverse, come si

verifica in molte rocce stratificate (BORSETTO *et al.*, 1980).

A titolo di esempio nella fig. 10 i coefficienti correttivi che permettono di passare dai valori apparenti \tilde{E} dei moduli (calcolati cioè con le relazioni valide per materiali isotropi) ai moduli veri, secondo la direzione dell'asse di carico, sono riportati in funzione del rapporto di anisotropia e di un parametro R_G che indica quanto il comportamento delle rocce si discosta dal modello isoG di Saint-Venant; esso è definito dalla relazione:

$$\frac{1}{R_G} = G_{13} \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} + \frac{2\nu_{23}}{E_3} \quad (9)$$

e risulta per le rocce sempre maggiore dell'unità.

L'andamento delle curve indica che nelle prove con carico parallelo alla scistosità le formule convenzionali portano sempre ad una sottostima del vero modulo della roccia, mentre nelle prove con asse di carico perpendicolare alla scistosità il modulo può essere sia sovrastimato che sottostimato a seconda del valore del modulo di taglio. Nella maggior parte dei casi pratici l'errore risulta tuttavia inferiore al 20-25%.

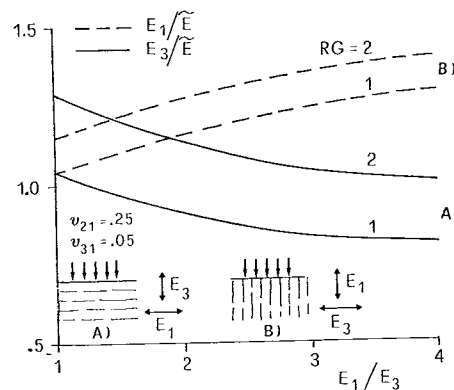


Fig. 10. - Rapporto tra i moduli elastici effettivi e quelli apparenti in funzione del grado di anisotropia e del parametro R_G .

4. Caratteristiche di deformabilità degli ammassi rocciosi

Le accurate tecniche di prova e la varietà degli ammassi rocciosi investigati hanno consentito di mettere in evidenza alcuni tipici comportamenti degli ammassi rocciosi, i quali sono sintetizzati nella Tab. 1 e descritti più ampiamente qui di seguito.

TABELLA I

Indicazioni generali sulle caratteristiche di deformabilità degli ammassi rocciosi investigati.

- A - Diminuzione dei moduli all'aumentare del carico applicato
- B - Anisotropia spesso meno accentuata nell'ammasso roccioso che nel materiale roccioso da cui esso è costituito.
- C - Moduli dell'ammasso roccioso spesso più elevati che nel materiale roccioso da cui esso è costituito
- D - Esistenza di correlazioni tra i moduli e gli indici di qualità dell'ammasso roccioso, ma con notevole dispersione e forte variabilità.

4.1 Andamento delle curve carichi-cedimenti

Le curve carichi-cedimenti relative all'ammasso roccioso indisturbato, cioè quelle basate sulle ancore situate al disotto della fascia allentata, hanno sempre mostrato una curvatura rivolta verso il basso, cioè moduli di deformabilità E_d decrescenti con l'aumentare del carico (fig. 11). Anche il modulo elastico E_e presenta un'analogia diminuzione all'aumentare del massimo valore della pressione applicata prima della fase di scarico.

Questo comportamento è evidenziato sia dall'andamento del valore medio del modulo in funzione del carico per un dato ammasso roccioso (fig. 12), sia dai valori ottenuti nelle singole prove. Ad esempio nella fig. 13 i risultati di prove su piastra a tre livelli di carico (4, 8 e 12 MPa) su una formazione granitica fratturata, sono stati rappresentati riportando per ciascuna prova i valori dei moduli a 4 e 12 MPa scalati rispetto a quelli rilevati a 8 MPa. La figura mette in evidenza che i moduli a 8 MPa sono in media più bassi del 10-15% rispetto ai moduli valutati a 8 MPa.

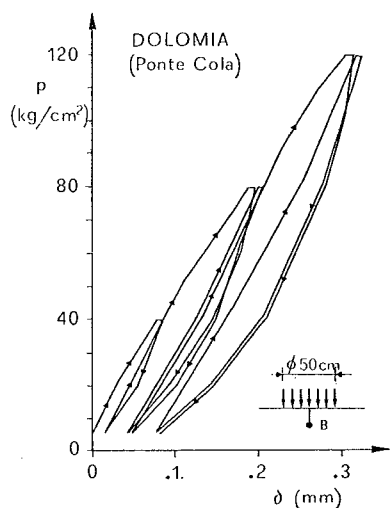


Fig. 11. - Tipico andamento della curva carico-cedimento per un ammasso roccioso indisturbato.

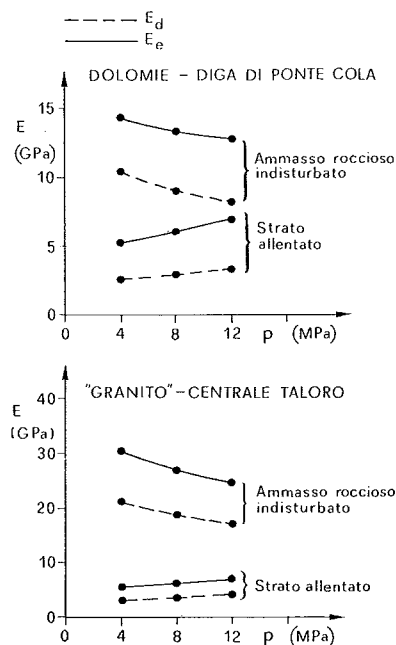


Fig. 12. - Andamento del modulo di deformabilità e del modulo elastico in funzione del livello di carico nei vari cicli della prova.

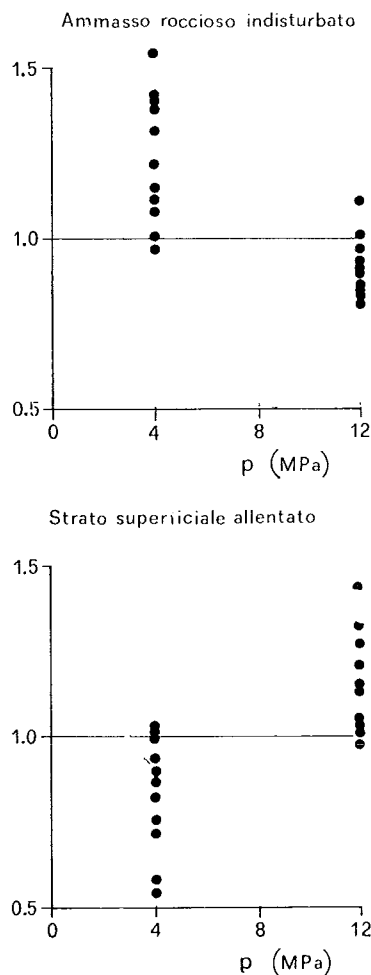


Fig. 13. - Valori dei moduli elastici a 4 e 12 MPa scalati rispetto a quelli ottenuti nel ciclo a 8 MPa (Granito di Timpagrande).

Questo andamento delle curve carichi-cedimenti è verosimilmente dovuto alla progressiva mobilitazione, sotto l'azione dei carichi applicati, di scorrimenti tangenziali in corrispondenza dei giunti inizialmente bloccati dagli sforzi preesistenti nell'ammasso roccioso stesso.

Il tipico comportamento qui illustrato è in contrasto con quello spesso descritto nella letteratura, caratterizzato da forti cedimenti iniziali attribuiti alla progressiva chiusura dei giunti. In realtà questo fenomeno si manifesta probabilmente solo nella fascia superficiale allentata, le cui deformazioni influenzano però in maniera preponderante i risultati delle prove quando l'interpretazione è basata solo sugli spostamenti in superficie.

Il comportamento della fascia allentata è messo in evidenza nelle stesse figg. 12 e 13 che indicano un accentuato aumento dei moduli all'aumentare del carico applicato.

4.2 Caratteristiche di anisotropia

Le caratteristiche di anisotropia degli ammassi rocciosi sono state già descritte da MARTINETTI *et al.* (1976) e da MARTINETTI e RIBACCHI (1983). Viene qui riportato un esempio tipico, relativo ad una formazione di gneiss (« Serizzo ») nella zona di Piedilago in Valdossola. La fig. 14 mette in evidenza che il rapporto di anisotropia (E_1/E_3) nell'ammasso roccioso indisturbato è molto più basso di quello rilevato con prove su campioni di laboratorio; esso risulta inoltre poco influenzato dal livello di carico. Nei campioni di laboratorio, al contrario, il grado di anisotropia diminuisce rapidamente all'aumentare del carico e solo per sollecitazioni molto elevate raggiunge valori corrispondenti a quelli misurati nell'ammasso roccioso indisturbato.

L'andamento dei moduli nei campioni di laboratorio (fig. 15), che risulta tipico di molte rocce scistose, può essere giustificato ipotizzando la presenza di due sistemi di microfessure: il primo con orientamento casuale e costituito da microfessure parte aperte e parte chiuse, il secondo con orientazione secondo la fissilità della roccia (CREA *et al.*, 1981). Il confronto con i risultati delle prove in situ sembra indicare che gran parte di queste microfessure si formano solo a causa del disturbo e dell'elevate sollecitazioni indotte nelle carote durante il prelievo, particolarmente quando lo stato di sforzo originario è elevato.

Il comportamento dello strato superficiale al-

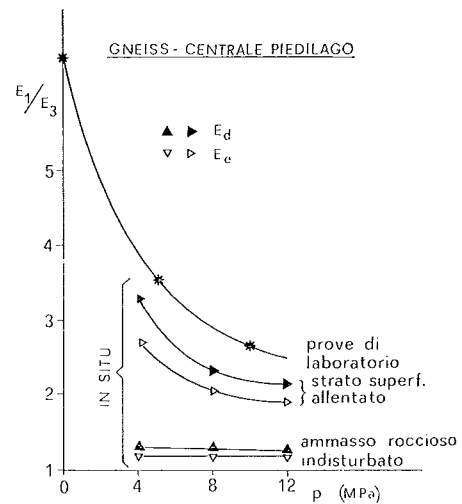


Fig. 14. - Confronto fra il grado di anisotropia rilevato da prove di laboratorio e quello determinato con le prove di carico su piastra.

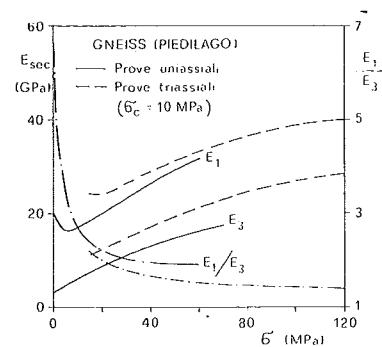


Fig. 15. - Andamento dei moduli elastici E_1 ed E_3 in funzione del livello di carico.

lentato (fig. 14) appare intermedio tra quello dell'ammasso roccioso indisturbato e quello dei campioni di laboratorio; evidentemente anche il disturbo derivante dall'apertura del cunicolo di prova provoca la formazione e l'apertura di microfessure, specialmente di quelle orientate secondo il piano di fissilità.

4.3 Rapporti tra moduli in situ e moduli di campioni di laboratorio

Le relazioni tra i valori medi dei moduli in situ ed i valori medi per campioni di laboratorio sono illustrate nella Tab. 2 e nella fig. 16. È evidente che negli ammassi rocciosi di buona qualità, con i valori di RQD superiori all'80% e intensità di fratturazione minore di 5 fratture per metro, i moduli in situ sono più elevati (talora molto più elevati) di quelli determinati sui corrispondenti campioni di laboratorio. Indubbiamente tale comportamento deriva da fattori analoghi a quelli discussi nel § 4.2, cioè alla for-

mazione ed all'estensione di microfessure nei campioni di laboratorio a seguito dell'azione di carotaggio.

In ammassi rocciosi più scadenti, invece, l'influenza delle fratture diviene prevalente ed i

moduli in situ risultano più bassi di quelli dei campioni di laboratorio; molto spesso, però, il fattore di riduzione non è così elevato come quello previsto da ben note relazioni empiriche (DERRE *et al.*, 1967).

TABELLA II
Caratteristiche di deformabilità e indici di qualità per vari ammassi rocciosi investigati.

		E_{LAB}^* (GPa)	E_{SITU}^{**} (GPa)	R.Q.D (%)	i (m ⁻¹)
GNEISS DI PIEDILAGO	// ⊥	18.0 6.5	27.0 21.0	94.0	2.6
FILLADI DI EDOLO	// ⊥	27.0	55.0 41.0	84.0	5.5
FILLADI DI S. FIORANO	// ⊥	46.0 6.5	50.0 18.0	97.0	1.7
ANATEXITE DI ENTRACQUE		38.0	66.0	96.0	1.5
CALCARENITE DI SOLARINO		17.0	24.0	98.0	1.5
GRANITO DI TIMPAGRANDE	A B	54.0 54.0	13.0 4.0	60.0 27.0	9.0 N.D.
GRANITO DEL TALORO	A B	17.0 22.0	18.0 10.0	70.0 46.0	8.0 13.0
CALCARI DI PIANI DI RUSCHIO		31.0	8.0	67.0	9.0
DOLOMITE DI PONTE COLA		18.0	8.0	15.0	15.0

* E_{LAB} » » » a 10 MPa.

** E_{SITU} Modulo secante di deformabilità a 12 MPa.
 i frequenza di fratture.

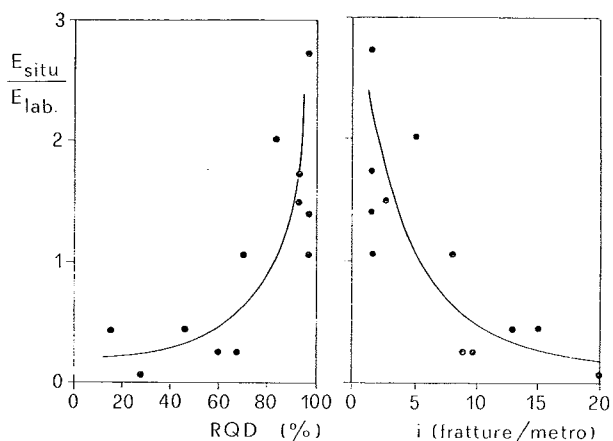


Fig. 16. - Rapporto fra i valori medi dei moduli di deformabilità in situ e dei moduli di laboratorio in funzione della qualità della roccia.

4.4 Correlazioni tra moduli ed indici di qualità

Nel precedente paragrafo si è messo in evidenza l'esistenza di una relazione fra i valori medi dei due indici di qualità (frequenza di fratture ed RQD) ed i valori medi dei moduli per i diversi ammassi rocciosi considerati. Se però ci si riferisce alle varie prove eseguite en-

tro uno stesso ammasso roccioso si riscontra una grande varietà di comportamento che rende difficile trarre indicazioni generali.

Ad esempio la fig. 17 mostra un caso di buona correlazione tra moduli e frequenza di fratturazione (granito del Taloro) ed un caso di assenza di correlazione (calcari di Piani di Ruschio). La dispersione dei dati sperimentali è sempre alquanto elevata.

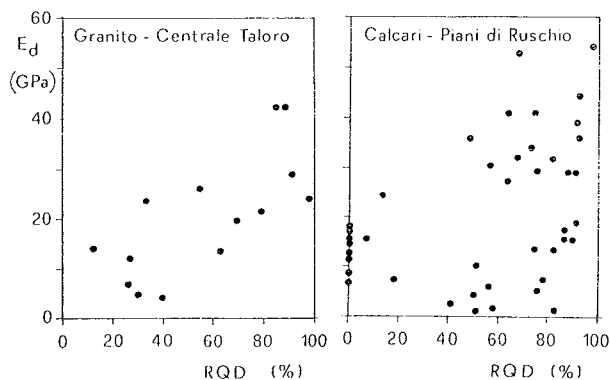


Fig. 17. - Relazioni tra moduli elastici e frequenza delle fratture per due formazioni investigate.

Analoghe considerazioni valgono per le relazioni tra moduli ed RQD, come è esemplificato nella fig. 18.

Un altro parametro spesso utilizzato per descrivere la qualità di un ammasso roccioso è la velocità sismica in situ. La fig. 19 illustra le relazioni tra i moduli in situ e le velocità sismiche in situ per due formazioni granitiche italiane; le correlazioni sono soddisfacenti, ma non è facile spiegare perché le leggi di dipendenza sono molto diverse per i due materiali esaminati. La fig. 20 illustra invece la situazione per due formazioni metamorfiche delle Alpi. Nello gneiss di Piedilago la differenza dei moduli relativi alle due condizioni di prova (rispettivamente perpendicolare e parallela alla scistosità) è rispecchiata da analogha variazione nella velocità sismica, mentre ciò non si verifica per la fillade di Edolo. Nell'ambito di cia-

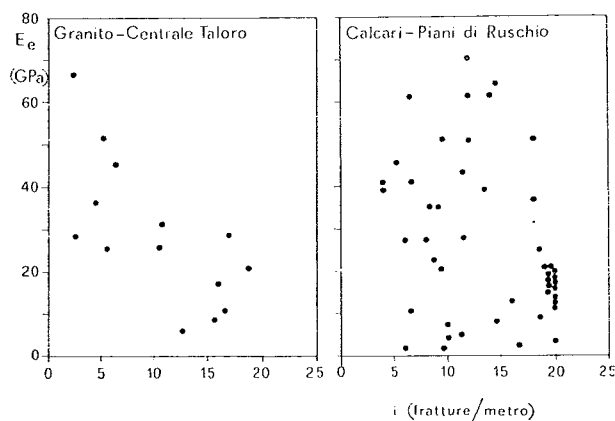


Fig. 18. - Relazioni tra moduli di deformabilità ed indici di qualità RQD della roccia per due formazioni investigate.

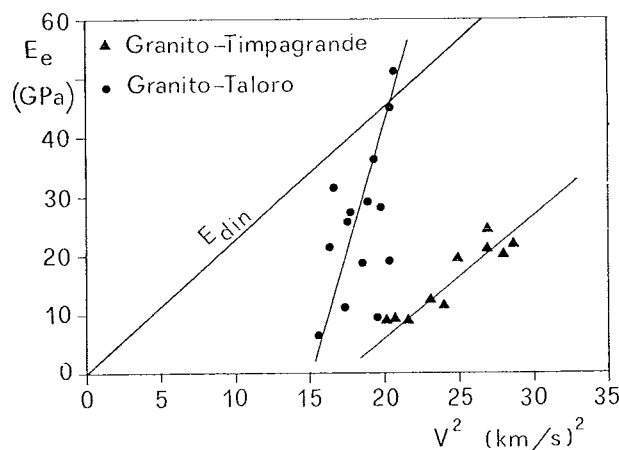


Fig. 19. - Relazione tra modulo elastico e velocità sismica per due formazioni granitiche.

scun tipo di prova non si osserva alcuna correlazione tra moduli e velocità sismica.

Infine nella fig. 21 sono riportati i dati disponibili per vari ammassi rocciosi investigati. La dispersione dei dati è molto forte per cui il rapporto tra modulo statico e modulo dinamico varia entro un campo tra 0.2 e 1.1; appare evidente tuttavia una certa relazione tra i due parametri, che sembra presentare un andamento curvilineo indicando che il rapporto tra modulo dinamico e modulo statico tende a crescere al migliorare della qualità della roccia.

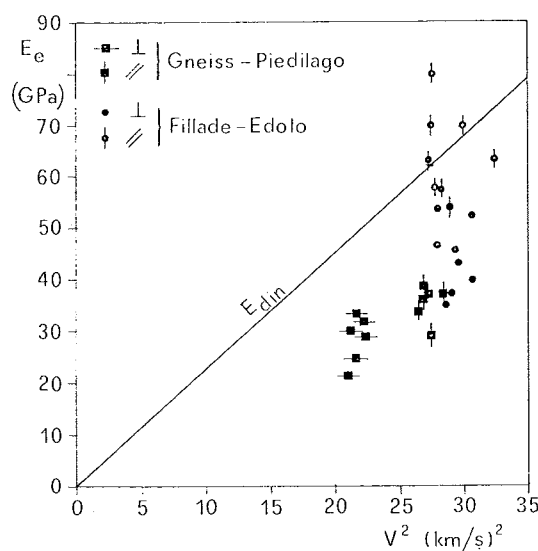


Fig. 20. - Relazioni tra moduli elastici e velocità sismiche in situ per due formazioni anisotrope.

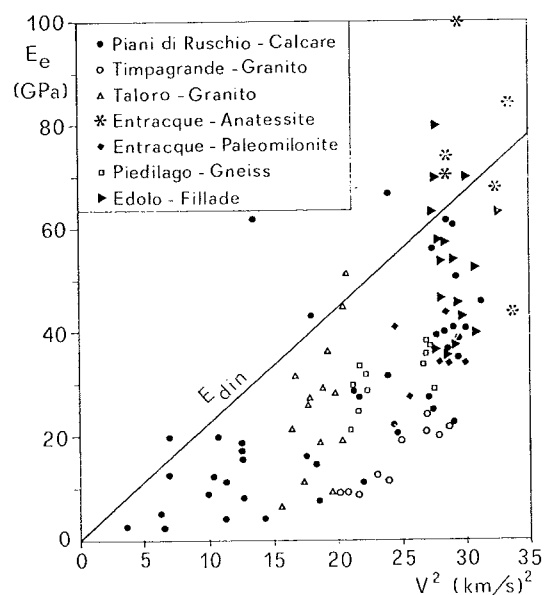


Fig. 21. - Relazione tra modulo elastico e velocità sismica in situ per diverse formazioni investigate.

5. Conclusioni

I perfezionamenti apportati alla tecnica di esecuzione della prova di carico su piastra introducono certamente maggiori complessità nella fase realizzativa; il maggior impegno richiesto è tuttavia più che compensato dalla maggiore significatività dei dati che consentono quindi una valutazione veramente affidabile delle caratteristiche di deformabilità degli ammassi rocciosi.

Sia le indagini con metodi numerici sull'influenza di vari fattori, che per semplicità di analisi non vengono considerati nell'interpretazione tradizionale della prova, che l'elaborazione dei risultati delle prove sinora effettuate hanno indicato la possibilità di introdurre alcune modifiche dell'attuale schema. Si pensa ad esempio, di sostituire il sistema di estensimetri meccanici per il rilevamento degli spostamenti lungo il foro in asse al carico, con sistemi ad induzione tipo *Extensofor* (LONDE, 1982), in modo da eliminare i problemi di attrito ed isteresi delle aste. Si pensa inoltre di ridurre il numero dei punti di misura eliminando sia i punti in superficie a maggior distanza dalla piastra, sia alcuni punti in profondità lungo l'asse di carico; in effetti la massima profondità investigata può essere portata, ad esempio, a 2.0-2.5 m dato che le indicazioni degli estensimetri più profondi risultano spesso dubbie ed affette da notevoli errori.

L'elaborazione dei risultati delle prove ha già fornito utili indicazioni sul comportamento deformativo degli ammassi rocciosi e sulla sua dipendenza dalla qualità della roccia. La grande massa di dati da analizzare rende però necessarie più approfondite verifiche e confronti sui quali si sta attualmente lavorando, che certamente forniranno ulteriori informazioni.

Questa nota è basata sulla relazione di Panel e sugli interventi presentati all'«International Symposium on Soil and Rock Investigations by In Situ Testing», svoltosi a Parigi nel maggio 1983. La ricerca è stata svolta con il contributo C.N.R. 05/83.

BIBLIOGRAFIA

- BERNABINI M., BORELLI G. B. (1974) - *Methods for determining the average dynamic elastic properties of a fractured rock mass and the variations of these properties near excavations*, Proc. Third Congress of I.S.R.M., Denver, Vol. IIA, pp. 393-397.
- BORSETTO M., LEMBO-FAZIO A. (1983) - *Rapporto interno ISMES*.
- BORSETTO M., GOFFI L., ROSSI P. P. (1980) - *Studio del comportamento di un ammasso roccioso stratificato riferito*

- a prove di deformabilità in cunicolo*, Gallerie, 5, 12, pp. 11-28.
- BRIZZOLARI E. (1981) - *Miniseismic investigations in tunnels: methodology and results*, Geoexploration, 18, pp. 259-267.
- CARABELLI E. (1978) - *I metodi geofisici di controllo dei terreni e delle rocce di fondazione*, XIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Merano, vol. III, pp. 219-223.
- CREA G., MARTINO D., RIBACCHI R. (1981) - *Influenza delle caratteristiche strutturali sull'anisotropia delle rocce*, R.I.G., 14, 4, pp. 235-260.
- DEERE D. V., HENDRON A. T., PATTON F. D., CORDING E. T. (1967) - *Design of surface and near surface construction in rock*, 8th Symposium on Rock Mechanics, Minnesota, pp. 237-302.
- I.S.R.M. - Commission on standardization of laboratory and field tests (1979) - *Suggested methods for determining in situ deformability of rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, pp. 195-214.
- LONDE P. (1982) - *Concepts and instruments for improved monitoring*, J. Geotechn. Eng. Div., Proc. ASCE, 108, GT6, pp. 820-834.
- MANFREDINI G., MARTINETTI S., ROSSI P. P., SANPAOLO A. (1974) - *Observations on the procedures and on the interpretation of the plate bearing test*, Proc. 3rd Congress Int. Soc. Rock Mechanics, Denver, Vol. IIA, pp. 451-457.
- MARTINETTI S., RIBACCHI R. (1983) - *Plate-loading tests in anisotropic rock masses*, Int. Symp. Soil and Rock Investigations by in situ Testing, Parigi, Vol. II, pp. 89-94.
- MARTINETTI S., MARTINO D., RIBACCHI (1976) - *Determinazione dello stato di sollecitazione originario in un ammasso roccioso anisotropo*, R.I.G., 9, pp. 84-98.
- OBERTI G., CARABELLI E., GOFFI L., ROSSI P. P. (1979) - *Study of an orthotropic rock mass: experimental techniques, comparative analysis of results*, 4th Int. Congress on Rock Mechanics, Montreux, Vol. II, pp. 285-291.
- POULOS H. G., DAVIS E. H. (1974) - *Elastic solutions for soil and rock mechanics*, Series in Geotechnical Engineering. New York: John Wiley & Sons.
- STAGG K. G. (1968) - *In situ tests on the rock mass*, in Stagg & Zienkiewicz: Rock Mechanics in Engineering Practice (Chap. 5).

SUMMARY

This paper describes the recent improvements in the performance of plate-loading tests and it examines the possibility of better interpreting the measurement data for assessing the elastic characteristics of rock masses. The influence of various factors, that are not taken into account in the simplified model of a homogeneous and isotropic halfspace, was analyzed with numerical finite element methods.

Among these factors mention can be made of the following: presence of a loosened superficial layer; presence of a central borehole along the load axis; a not negligible ratio between plate diameter and tunnel diameter; anisotropy of the rock mass. For the usual test conditions the largest errors in assessing the undisturbed rock mass modulus are to be ascribed to the presence of a loosened layer which is in immediate contact with the loading surface.

The large number of tests and the wide variety of investigated rock masses have been instrumental in identifying some typical rock mass behaviours. For instance, a decrease of the moduli at increasing loads is generally observed and the anisotropy ratio in the field is lower than that observed for the tests carried out on laboratory samples.

Various correlations were obtained between the moduli and the various indices proposed for defining the «quality» of a rock mass. For rock masses of good quality the in situ moduli can be higher than those measured on laboratory samples.