Raccomandazione per la determinazione in sito della deformabilità della roccia

Parte I

Raccomandazione per la determinazione delle deformabilità mediante prove di carico su piastra (con carico superficiale)

1.(a) La prova di carico su piastra, denominata anche prova con martinetto cilindrico, che prevede l'applicazione di un carico superficiale, è eseguita in gallerie di piccolo diametro o in cunicoli esplorativi per determinare le caratteristiche di deformabilità di un ammasso roccioso.

(b) Due superfici, del diametro indicativamente di 1 m ciascuna, sono caricate contemporaneamente mediante l'uso di martinetti disposti trasversalmente nella galleria. Le deformazioni dell'ammasso roccioso sono misurate in fori di sondaggio situati dietro ciascuna superficie di carico e trasversalmente alla galleria tra le superfici di carico. Un tipico schema di prova è riportato in Fig. 1.

(c) Incrementi di carico e carichi ciclici consentono di ottenere i dati per il calcolo dei moduli elastici, di deformazione e di scarico. Le caratteristiche relative allo scorrimento plastico dell'ammasso roccioso possono essere determinate dai diagrammi che riportano gli spostamenti in funzione del tempo.

(d) Gli effetti dovuti all'anisotropia possono essere determinati orientando la spinta dei martinetti in qualsiasi direzione. È tuttavia opportuno che la spinta dei martinetti sia mantenuta in un piano perpendicolare all'asse del cunicolo.

Attrezzatura

2.(a) L'attrezzatura per l'esecuzione della prova comprende il necessario per: la preparazione della sezione di prova, la perforazione e l'installazione della strumentazione da foro, la misura degli spostamenti della roccia, l'applicazione dei carichi di prova, la registrazione dei dati di prova e il trasporto delle varie attrezzature alla sezione di prova.

3.(a) L'attrezzatura per la preparazione della sezione di prova dovrebbe includere un assortimento di attrezzi di scavo, quali perforatori e demolitori per uniformare le superfici di carico.

L'uso di esplosivo non dovrebbe essere permesso

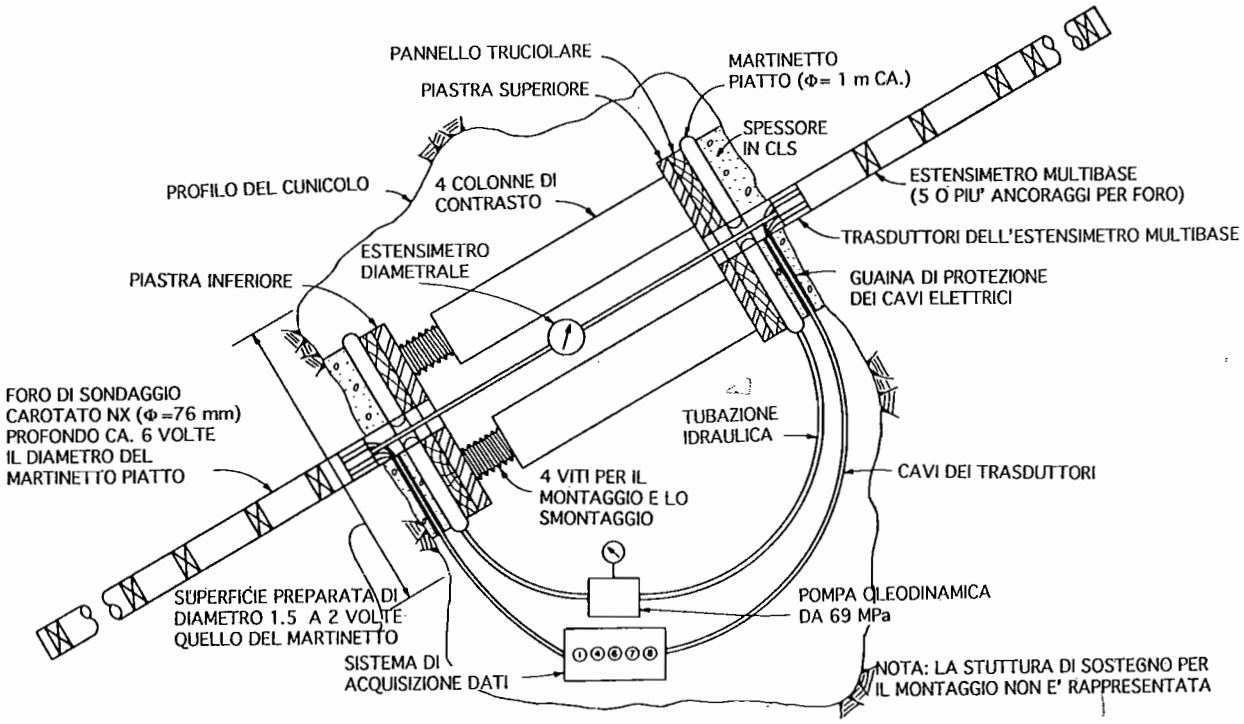

Fig. 1 - Prova di carico su piastra.

durante la fase finale della preparazione della sezione di prova.

4.(a) L'esecuzione di fori per l'installazione di strumentazione dovrebbe consentire, se possibile, il recupero di carote fino alla profondità di 10 m.

È consigliabile l'utilizzo di sistemi di osservazione dell'interno dei fori predisposti per l'installazione di strumentazione di misura degli spostamenti per confrontare e verificare le caratteristiche geologiche rilevate sulle carote.

(b) La strumentazione per la misura degli spostamenti dovrebbe comprendere un estensimetro multibase affidabile installato in ciascun foro e uno strumento per la misura delle variazioni diametrali della galleria. Tutti gli strumenti dovrebbero avere una sufficiente precisione e sensibilità in maniera da essere in grado di rilevare gli spostamenti previsti. Errori sperimentali superiori a 0.01 mm possono inficiare i risultati delle prove qualora il modulo dell'ammasso roccioso dovesse essere superiore a 35000 MPa. Una discussione sulle conseguenze di errori sperimentali è reperibile in [1].

5.(a) L'attrezzatura di carico dovrebbe essere in grado di applicare contemporaneamente una pressione uniforme su due superfici di carico situate su due lati opposti della galleria, aventi diametro pari a circa 1 m. Come illustrato in Fig. 1, l'attrezzatura utilizzata per l'applicazione del carico sulla roccia preventivamente preparata e strumentata potrebbe essere costituita da martinetti calibrati e da una struttura di contrasto in grado di resistere al massimo carico uniformemente distribuito con un sufficiente fattore di sicurezza. La centralina idraulica di pompaggio con i necessari accessori, valvole, trasduttori, tubi idraulici, dovrebbe avere sufficiente pressione e portata in maniera da applicare e mantenere la pressione prevista entro un 3% del valore nominale per tutta la durata della prova.

Procedura

6. *Preparazione della sezione di prova*

(a) L'area scelta per la prova dovrebbe essere preparata con cura. La roccia allentata dovrebbe essere rimossa utilizzando perforatori e demolitori. Per ridurre l'effetto di contenimento della roccia circostante, dovrebbe essere preparata un'area avente un diametro pari a 1.5-2 volte quella della superficie di carico. Le due superfici di carico dovrebbero essere coassiali e giacenti su piani perpendicolari alla direzione di carico dell'attrezzatura di contrasto.

Se per la preparazione iniziale dell'area di carico si fa uso di esplosivo, si dovrebbe aver cura di realizzare superfici non danneggiate dalle operazioni di scavo. Procedure dettagliate sulla preparazione della sezione di prova sono riportate in [2].

(b) I fori nelle superfici di carico per l'installazione di strumentazione dovrebbero essere realizzati mediante carotaggio. È necessario porre attenzione affinché i fori risultino coassiali tra di loro e con l'asse dell'attrezzatura di contrasto.

(c) L'esame delle carote e del foro predisposto per l'installazione della strumentazione consente di localizzare i punti di ancoraggio dell'estensimetro multibase. Gli ancoraggi dovrebbero essere ubicati in maniera da non essere installati sui giunti, separando in tale maniera le diverse zone strutturali o litologiche. L'ancoraggio più profondo dovrebbe essere posizionato ad una distanza pari a circa 6 volte il diametro del martinetto piatto al di sotto della superficie di carico in maniera da costituire il punto fisso rispetto al quale lo spostamento degli altri ancoraggi può essere riferito.

In generale gli altri ancoraggi dovrebbero essere concentrati nella zona di massima sollecitazione compresa tra la superficie della roccia e la profondità di circa 3 volte il diametro del martinetto piatto.

In Fig. 2 sono proposti alcuni schemi per l'ubicazione degli ancoraggi.

È opportuno che la testa strumentata e gli ancoraggi dell'estensimetro multibase siano resi solidali con le pareti del foro di sondaggio. Questo evita di dover misurare gli spostamenti degli elementi che compongono l'attrezzatura di prova, dato che tutte le misure saranno relative alla roccia.

7. *Installazione dell'attrezzatura*

(a) In Fig. 1 è proposto uno schema dell'attrezzatura di contrasto e di carico e della strumentazione di misura. Un'apposita piattaforma in legno (non illustrata in Fig. 1) consente l'assemblaggio di tutta l'attrezzatura di prova. Lo spazio tra il martinetto piatto e la roccia dovrebbe essere riempito con malta di cemento.

La malta dovrebbe essere lasciata maturare per un tempo sufficiente per ottenere un'adeguata resistenza prima dell'inizio delle prove. Nello spazio tra i martinetti piatti e le piastre inferiore e superiore dovrebbe essere messo in opera un pannello in materiale truciolare (in legno o resina) o altro materiale idoneo a garantire il collegamento tra il martinetto piatto da una parte e la piastra di carico dell'altra.

8. *Esecuzione della prova*

(a) Dopo l'installazione di tutta la strumentazione di misura nei fori di sondaggio, se ne dovrebbe verificare il funzionamento sia dal punto di vista mec-

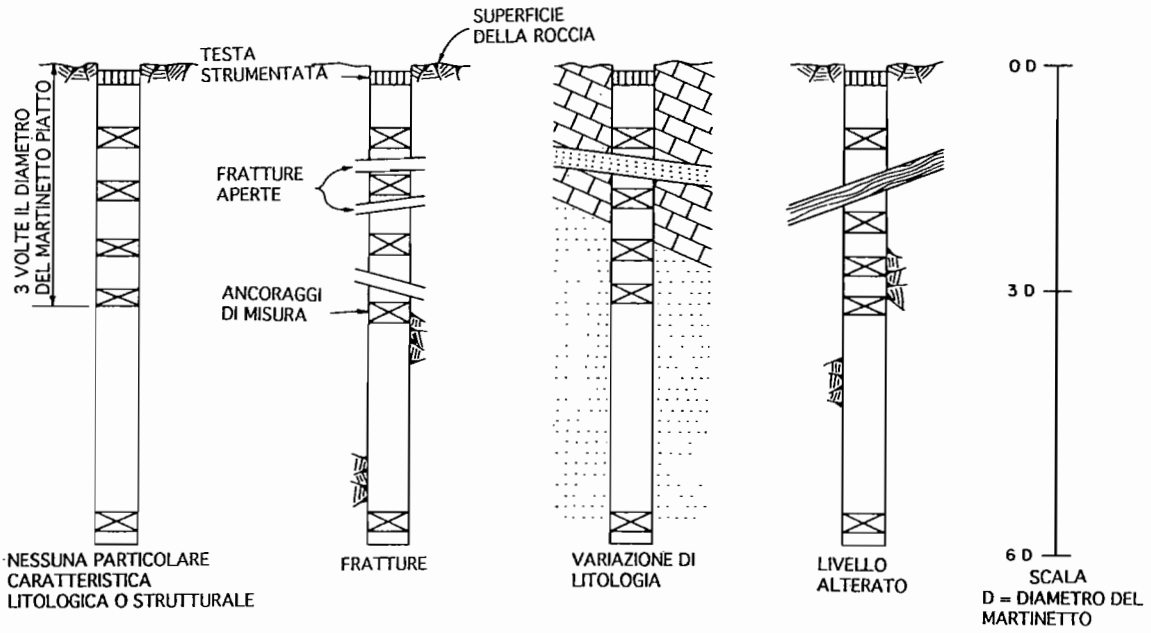

Fig. 2 - Esempio di ubicazione degli ancoraggi.

canico che elettrico. In seguito alla messa in opera della struttura di carico e di contrasto, si dovrebbe effettuare un ulteriore controllo della strumentazione. Un controllo finale di tutte le componenti meccaniche idrauliche ed elettroniche dovrebbe essere eseguito dopo la messa in opera dello strato di malta e nuovamente prima dell'applicazione del primo incremento di carico.

(b) Le prove dovrebbero essere eseguite senza soluzione di continuità su una base di 24 ore giornaliere applicando livelli ed incrementi di carico che tengano conto delle particolari esigenze di ciascun progetto.

(c) Durante il corso della prova gli spostamenti della roccia misurati della strumentazione dovrebbero essere registrati con continuità o ad intervalli di tempo sufficientemente ristretti per ottenere l'insieme di dati previsto.

Nel caso di utilizzo di un sistema di acquisizione non continua, si raccomanda un minimo di quattro letture durante la prima ora di ciascuna fase di incremento o di decremento del carico.

(d) La massima pressione di prova, il numero di cicli per raggiungere la massima pressione e il numero di incrementi di pressione in ciascun ciclo saranno determinati in funzione alle condizioni di prova e al tipo di informazioni desiderate. Generalmente si considera adeguata una pressione che sia $1.2 \div 1.5$ volte superiore a quella esercitata dalla struttura. Per ciascun ciclo dovrebbero essere effettuati almeno cinque incrementi di pressione, ciascuno seguito da un periodo a pressione nulla.

Una tipica sequenza di cicli di carico è riportata in Fig. 3.

(e) La durata di ciascun incremento di pressione sarà determinata dallo scorrimento plastico dell'ammasso roccioso. Finché il comportamento dell'ammasso roccioso non sarà ben noto, la pressione dovrà essere mantenuta per almeno 48 ore; questo periodo dovrà essere seguito da uno a pressione zero per 24 ore. Le osservazioni sull'andamento della prova dopo i primi incrementi di pressione possono essere utilizzate per modificare i tempi dei successivi incrementi. La pressione nei martinetti dovrebbe essere mantenuta costante con scostamenti dal valore nominale non superiori al 3% durante tutto il periodo di prova a pressione costante. L'andamento del diagramma di una prova tipica in funzione del tempo è riportato in Fig. 4.

Calcoli

9.(a) I dati acquisiti durante la prova possono essere rappresentati graficamente mediante diagrammi che riportino lo spostamento in funzione del tempo, della pressione o della profondità. Questi diagrammi sono di ausilio nell'analisi dello scorrimento plastico sotto carico ed allo scarico e delle deformazioni irreversibili dell'ammasso rocioso. Nelle Figg. 3, 4 e 5 è riportata una serie di diagrammi esemplificativi.

(b) Le misure di spostamento durante i vari cicli di carico sono utilizzate per calcolare i moduli di deformabilità mediante opportune formule. General-

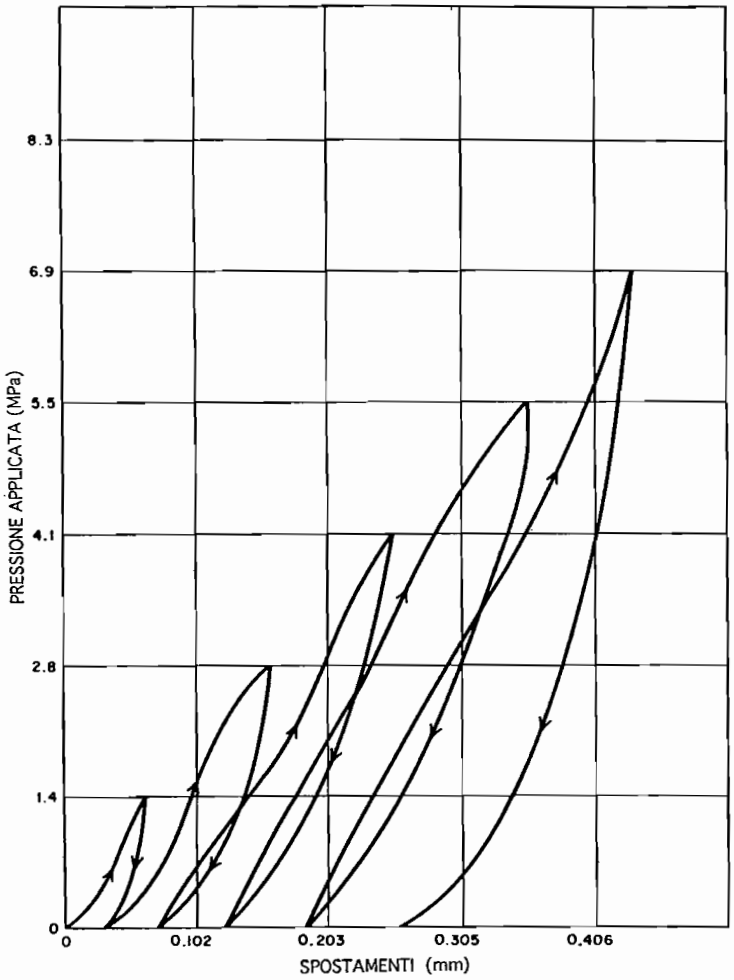

Fig. 3 - Spostamento superficiale della roccia in funzione della pressione applicata.

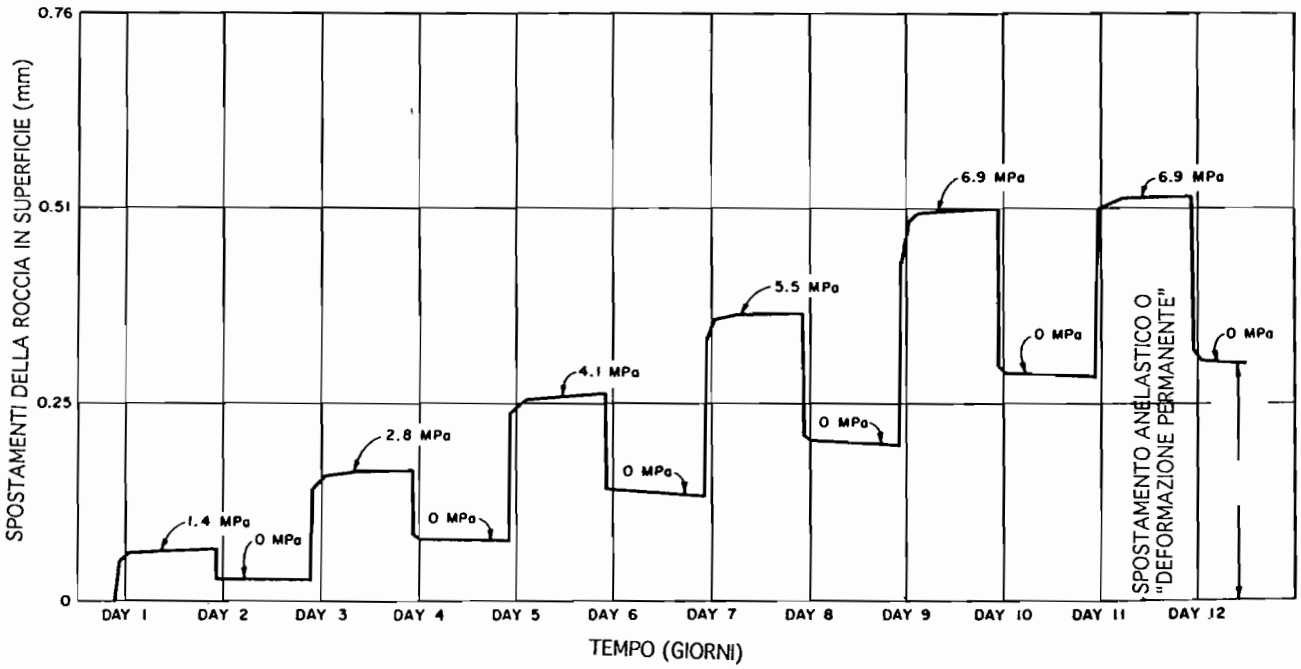

Fig. 4 - Spostamenti della roccia in funzione del tempo per prova di carico di piastra.

mente l'applicazione delle equazioni basate sulla teoria dell'elasticità [3], per la loro semplicità, è sufficiente per approssimare le reali condizioni del sito.

(c) Per una pressione uniformemente distribuita su di un'area circolare, lo spostamento in corrispondenza di qualsiasi punto al di sotto del centro dell'area di carico può essere espresso da:

$$w_z = \frac{2q(1-\nu^2)}{E}[(a^2+z^2)^{1/2}-z] - \frac{qz(1+\nu)}{E}[z(a^2+z^2)^{-1/2}-1] \quad (1)$$

in cui:

W_z = spostamento in direzione di quella di applicazione della pressione
Z = distanza tra la superficie di carico e il punto in cui è calcolato lo spostamento
q = pressione
a = raggio della superficie di carico
ν = coefficiente di Poisson
E = modulo elastico

Alla superficie $Z=0$ e l'espressione si riduce a:

$$w_{z=0} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} qa. \quad (2)$$

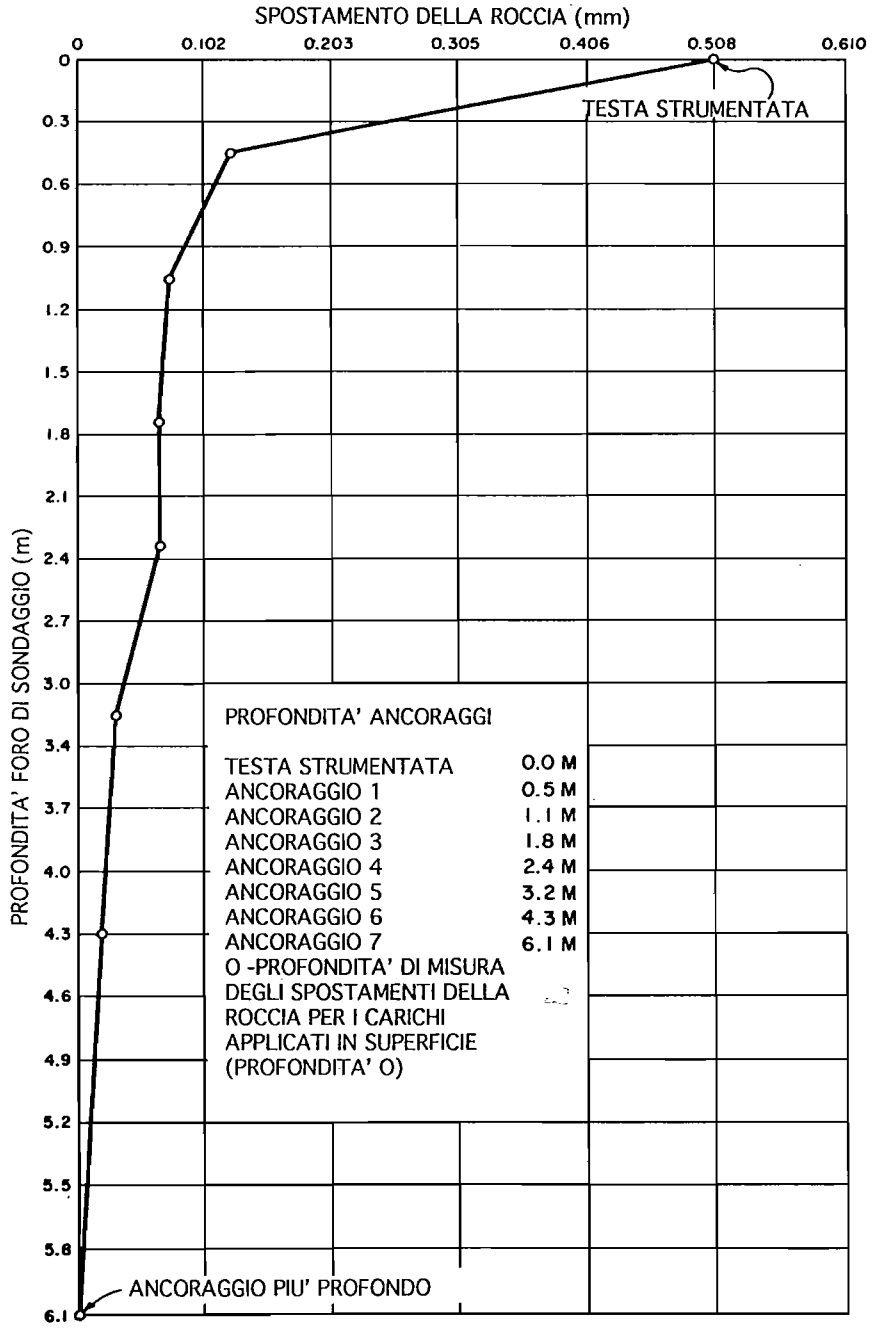

Fig. 5 - Spostamento uniassiale in funzione della profondità riferito all'ancoraggio più profondo per una pressione applicata pari a 6.9 MPa.

(d) Quando i carichi sono applicati con un martinetto piatto circolare avente un foro centrale, l'effetto dell'area non caricata deve essere sottratto.

Utilizzando la notazione:

a_2 = raggio esterno del martinetto piatto

a_1 = raggio interno del martinetto piatto o raggio del foro

$$w_z = \frac{2q(1-\nu^2)}{E}\,[(a^2+z^2)^{1/2}(a_1^2+z^2)^{1/2}] + \frac{z^2 q(1+\nu)}{E}\,[a_1^2+z^2)^{-1/2} - (a_2^2+z^2)^{-1/2}]. \quad (3)$$

Sostituendo gli appropriati valori di a_1, a_2, ν e z, l'equazione (3) si riduce a:

$$w_z = \frac{q}{E}\,(K_z). \quad (4)$$

Se gli spostamenti W_{z1} e W_{z2} sono misurati in corrispondenza dei punti z_1 e z_2, il modulo di deformabilità del materiale situato tra le quote z_1 e z_2 può essere calcolato come:

$$E_d = q\left[\frac{K_{z1}-K_{z2}}{W_{z1}-W_{z2}}\right]. \quad (5)$$

Presentazione dei risultati

10. Il rapporto dovrebbe includere quanto segue:

(a) Una descrizione geologica completa del sito comprendente le descrizioni dei campioni, le fotografie dei campioni, le fotografie delle superfici di carico dopo la loro preparazione ed una descrizione dei danni locali causati dall'uso di esplosivo.

(b) Una descrizione dell'attrezzatura di prova comprendente fotografie dell'attrezzatura installata, le specifiche relative alla precisione ed alla sensibilità di tutti i trasduttori di pressione e di spostamento e i dati di taratura di tutti gli strumenti.

(c) Tabelle con tutti i dati rilevati durante la prova.

(d) Diagrammi degli spostamenti in funzione della pressione come riportato in Fig. 3. Le informazioni ricavabili da questo diagramma possono essere utilizzate per determinare l'andamento della curva sforzi-deformazioni, per ricavare i valori per il calcolo dei vari moduli e per determinare le caratteristiche allo scarico ed elastiche.

(e) Diagrammi degli spostamenti in funzione del tempo come riportato in Fig. 4. Questo diagramma è utile per lo studio dello scorrimento plastico della roccia. Esso dovrebbe essere registrato durante le prove per definire la durata di ciascun incremento di carico.

(f) Diagrammi degli spostamenti in funzione della profondità riferiti all'ancoraggio più profondo come illustrato in Fig. 5. Questo profilo degli spostamenti è utilizzato per evidenziare zone anomale con valori di modulo inferiori o superiori alla media.

Dopo l'identificazione di queste zone, esse possono essere confrontate con i risultati delle osservazioni effettuate sui campioni estratti dai fori di sondaggio realizzati per l'installazione della strumentazione. Se gli ancoraggi degli estensimetri multibase sono correttamente ubicati, i moduli di queste zone possono essere calcolati utilizzando l'equazione (5).

(g) I moduli calcolati commisurati al problema progettuale. Per ciascun valore di modulo dovrebbe essere identificata la profondità alla quale esso è riferito e l'intervallo di sollecitazione per il quale è stato calcolato.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

BENSON R. P., MURPHY D. K. e MCCREATH D.R. (1969) - *Modulus testing of rock at the Churchill Falls underground powerhouse, Labrador*. in Determination of the in situ modulus of deformation of rock, American Society for Testing and Materials, STP477.

MISTEREK D. L., SLEBIR E. J. e MONTGOMERY J.S. (1973) - *Bureau of reclamation procedures for conducting uniaxial jacking tests*. Paper presented at American Society for Testing and Materials Annual Meeting, June 24-29, Philadelphia, Pennsylvania.

TIMOSHENKO S., GOODIER J.N. (1951) - *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New York.

Parte II

Raccomandazione per la determinazione della deformabilità in sito mediante una prova di carico su piastra a fondo foro

Finalità

1.(a) Questa prova è utilizzata per determinare in sito le caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso. La prova prevede l'applicazione di pressioni crescenti, mediante cicli di carico e di scarico, sul fondo spianato di un foro di sondaggio e la misura degli spostamenti corrispondenti.

(b) I moduli elastici e di deformabilità possono essere ricavati da diagrammi che rappresentino la pressine in funzione dello spostamento. Le proprietà del materiale dipendenti dal tempo (scorrimento plastico) possono essere determinate dai diagrammi degli spostamenti in funzione del tempo.

(c) Il metodo consente di eseguire prove in corrispondenza di varie sezioni situate a differenti profondità ed è caratterizzato da un costo, per raggiungere ciascuna sezione di prova, relativamente limi-

tato. Al limite si può ottenere un diagramma quasi continuo della deformabilità in funzione della profondità.

(d) La direzione di carico coincide necessariamente con quella dell'asse del foro di sondaggio, ed è generalmente subverticale; non può così essere ottenuta alcuna informazione sull'anisotropia della roccia. La dimensione della superficie di carico è limitata dalla possibilità di poter disporre di adeguate attrezzature di perforazione ed è generalmente minore rispetto al caso di altre prove di carico su piastra (vedi PARTE 1).

(e) Il metodo è generalmente utilizzato per ottenere informazioni per il progetto di fondazioni, come alternativa al metodo della PARTE 1, nel caso non sia possibile accedere direttamente mediante una trincea o un cunicolo esplorativo alla quota prevista per la fondazione.

Attrezzatura (per es. Figg. 1 e 2)

2. Attrezzatura per la perforazione, la pulitura e la preparazione del foro di prova comprendente:

(a) Una sonda o una perforatrice in grado di realizzare un foro per le prove del diametro pari ad almeno 500 mm[1] fino alla massima profondità richiesta.

(b) Un rivestimento per la lunghezza necessaria per stabilizzare la parete del foro.

(c) L'abbassamento del livello di falda o altra attrezzatura per consentire la preparazione della superficie di carico e l'installazione della piastra di carico in assenza di acqua.

(d) Un utensile spianatore, un alesatore o attrezzi manuali per spianare la superficie di carico ($\pm$ 5 mm) e per renderla normale all'asse del foro ($\pm$ 3°).

(e) Un'attrezzatura per eliminare i frammenti dal foro di sondaggio.

(f) Un'attrezzatura per prelevare campioni fino ad una profondità di almeno 3 m sotto la superficie di carico, tenendo tuttavia conto del fatto che il diametro del foro di ispezione deve essere minore del 10% rispetto a quello delle piastre di carico.

3. Attrezzatura per l'installazione della piastra di carico comprendente:

(a) Un'attrezzatura per calare le piastre nel foro per le prove.

(b) Materiali e un'attrezzatura ausiliaria per predisporre uno strato di regolarizzazione sotto la piastra di carico, da realizzarsi per esempio mediante malta di cemento e gesso.

4. Una piastra di carico avente diametro non inferiore a 500 mm e sufficientemente rigida perché possa deformarsi non più di 1 mm durante la prova.[2]

5. Una colonna di carico per trasmettere la forza applicata della struttura di reazione alla piastra di carico, realizzata in maniera tale che:

(a) resista allo schiacciamento e trasmetta il carico senza essere soggetta a distorsioni tali da inficiare i risultati delle prove.

(b) Sia cava per contenere la colonna di misura

(c) Il carico risultante agisca nel centro della piastra di carico ($\pm$ 3 mm) durante la prova.

6. Un sistema di carico e di reazione che comprenda per esempio un martinetto idraulico, pali di reazione o tiranti e l'attrezzatura ausiliaria in maniera tale che:

(a) Il carico sia applicato alla colonna assialmente.

(b) I carichi possano essere variati all'interno di tutto l'intervallo di sollecitazione previsto e possano essere mantenuti costanti entro il 2% del valore stabilito per un periodo di almeno 24 ore.

(c) La corsa del martinetto dovrebbe essere superiore alla somma dei previsti spostamenti della piastra di prova e della trave di reazione.

(d) La struttura di reazione dovrebbe essere caratterizzata da materiali, progettazione e costruzione opportuni, in maniera da soddisfare ai requisiti e da poter essere utilizzata in condizioni di sicurezza.

(e) I tiranti di reazione, quando utilizzati, dovrebbero essere posizionati ad una distanza superiore a 10 volte il diametro del foro per le prove dalle piastre di carico.

7. Un'attrezzatura per la misura del carico, per esempio una cella di carico o un anello dinamometrico, per misurare il carico applicato con una precisione migliore del 2% rispetto a quello massimo raggiunto durante le prove.

8. Un'attrezzatura per misurare lo spostamento del centro della piastra di carico[3] in direzione parallela all'asse del foro per le prove, avente le seguenti caratteristiche:

(a) Il sistema dovrebbe avere una corsa superiore al massimo spostamento della piastra di carico previsto durante la prova, con una precisione globale migliore di $\pm$ 0.05 mm.

(b) Le aste del sistema di riferimento, le colonne e i sistemi di fissaggio dovrebbero, dopo l'assemblaggio, essere sufficientemente rigidi da soddisfare a questi requisiti.

(c) Gli ancoraggi di riferimento per la misura degli spostamenti dovrebbero essere solidamente installati ad una distanza superiore a 10 volte il diametro del foro per le prove dalla piastra di carico e dai tiranti di reazione.

9. Un sistema di misura del tempo per rilevare la durata delle prove fino a 48 ore, avente risoluzione pari a 1 sec.

Procedura

10. *Scelta della zona di prova*

(a) La zona di prova deve essere scelta in maniera tale da consentire l'esecuzione delle prove in corrispondenza dell'ubicazione reale della fondazione, con carico agente nella stessa direzione di quella della fondazione; in alternativa può essere sottoposta a prova una roccia che si trovi in condizioni analoghe a quelle previste.

(b) Dovrebbe essere posta attenzione non solo all'ubicazione del foro di prova, ma anche alla scelta dell'ubicazione dei tiranti di reazione e degli ancoraggi di riferimento, alle condizioni della falda e ad altre situazioni che potrebbero influenzare l'esecuzione delle prove.

(c) La scelta delle sezioni di prova dovrebbe essere verificata prima dell'inizio della prova esaminando in dettaglio una carota prelevata nelle vicinanze della superficie di carico.

11. *Perforazione e preparazione del sito*

(a) L'ubicazione del foro di prova e dei tiranti deve essere accuratamente tracciata sul terreno ed i fori perforati fino alla profondità necessaria. Il foro è rivestito, se necessario, per garantire la stabilità durante la prova.

Si prelevano carote fino ad almeno 3 m sotto la sezione prevista per la prova e la scelta di essa è confermata o variata.

(b) Nel caso il foro di prova sia situato sotto la falda, dovrebbero essere intraprese le operazioni necessarie per abbassare il livello di falda (per esempio pompando acqua da tubi di drenaggio circostanti l'area di prova) per un periodo di tempo sufficiente per consentire l'installazione della piastra di carico.

(c) Si regolarizza la superficie di carico (± 5 mm) e si prende nota della sua profondità. Tutti i detriti dovrebbero essere asportati.[4] Uno o più strati di malta, di spessore totale minore di 30 mm, sono

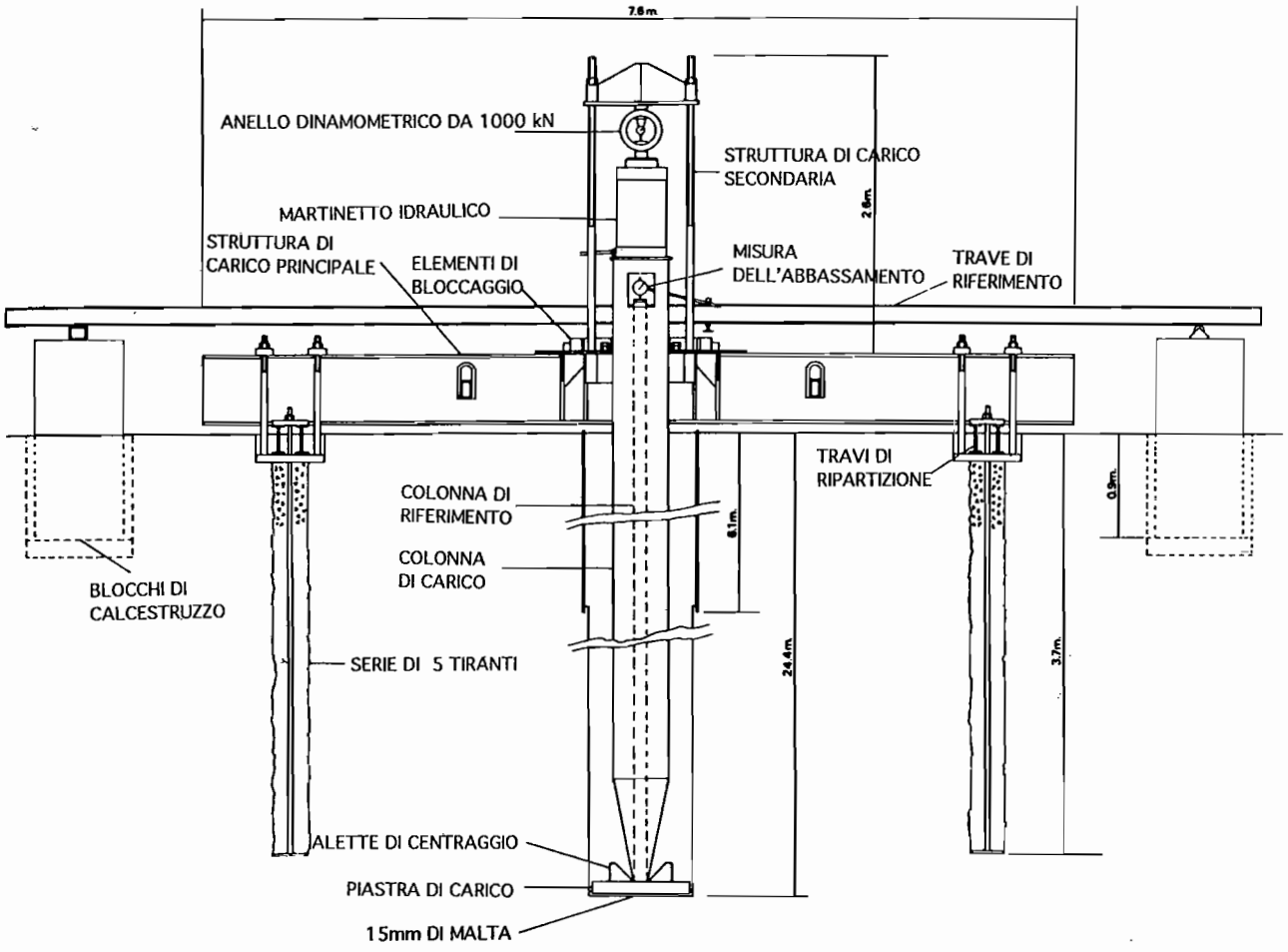

Fig. 6 - Sezione verticale dell'attrezzatura per prove di carico su piastra a fondo foro.

messi in opera per colmare lo spazio tra la superficie di carico e la piastra di carico che sarà installata prima che l'ultimo strato di malta abbia fatto presa. L'intervallo di tempo tra lo scavo della superficie di carico e l'installazione dell'attrezzatura non dovrebbe superare 12 ore.[5]

(d) Si installano i tiranti di reazione e gli ancoraggi di riferimento, si assembla e si controlla l'attrezzatura. Si applica un carico di fondo (pari a circa il 5% del massimo carico di prova) che è mantenuto fino all'inizio della prova.

(e) Si dovrebbe consentire alla falda di ritornare al suo livello iniziale prima dell'inizio della prova.

12. *Esecuzione della prova*

(a) Sotto l'azione del carico di fondo (paragrafo 11.d), si dovrebbero controllare e registrare il carico e lo spostamento per un periodo di tempo non inferiore a 48 ore per stabilire i valori di riferimento e per consentire di valutare gli effetti indotti dalla variazione delle condizioni ambientali.[6]

(b) I carichi e gli incrementi di carico da applicare durante le prove dovrebbero essere scelti in maniera da coprire un campo $0.3 \div 1.5q_0$, dove q_0 è lo stato di sollecitazione indotto dalla prevista struttura.[7]

(c) Si incrementa il carico con non meno di cinque intervalli approssimativamente uguali tra di loro fino a circa 1/3 del carico massimo previsto per le prove.

Ad ogni incremento il carico è mantenuto costante (± 3%) e si registrano gli spostamenti in funzione del tempo fino alla loro stabilizzazione.[7] La stessa procedura viene seguita durante la fase di decremento del carico fino al raggiungimento del carico di fondo.

(d) Si ripete la procedura 12(c) per cicli di carico

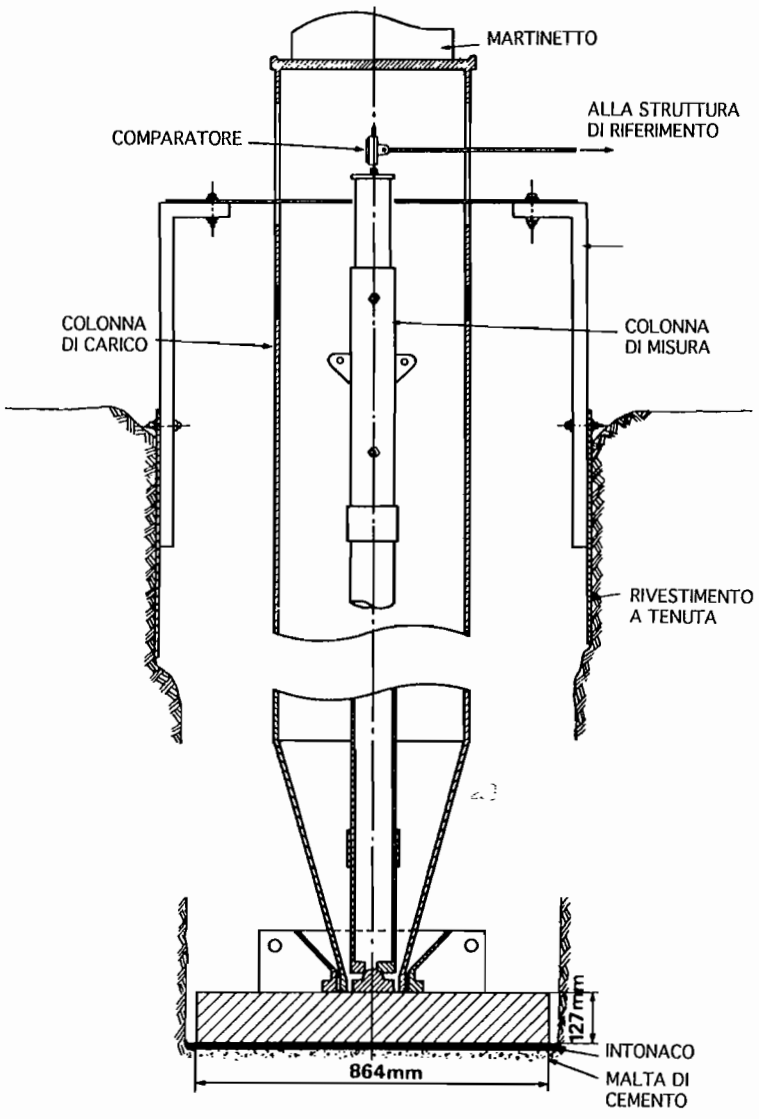

Fig. 7 - Particolari dell'attrezzatura per prove di carico su piastra.

massimi pari a circa 2/3 e 3/3 il carico massimo previsto per la prova.

13. Si estrae l'attrezzatura dal foro di prova; successive prove possono essere eseguite a maggiore profondità continuando a perforare nello stesso foro (paragrafi 11 e 12).

Calcoli

14. (a) Si disegnano i grafici degli abbassamenti (o degli innalzamenti durante le fasi di scarico) in funzione del logaritmo del tempo (Fig. 8).

(b) Si traccia il grafico della pressione in funzione degli spostamenti per ciascuna prova (Figg. 9 e 10).

(c) I moduli di deformabilità possono essere determinati dalla tangente alla curva pressione-abbassamento.

In Fig. 11 sono definiti in questa maniera tre moduli, dove:

E_i = modulo tangente iniziale

E_e = modulo elastico ottenuto da un ciclo di ricarico

E_y = modulo di deformabilità che tiene conto della «cedevolezza» del materiale.

(d) Il modulo è calcolato con la formula

$$E = \frac{dq}{d\rho} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D\,(1-\nu^2) \cdot I_c \qquad (6)$$

dove:

q = pressione applicata

ρ = abbassamento

D = diametro della piastra

ν = coefficiente di Poisson (compreso tra 0.1 e 0.3 per la maggior parte delle rocce)

I_c = fattore correttivo della profondità riportato in Fig. 12

(e) Un parametro R dipendente dal tempo (noto come rapporto di scorrimento plastico) è determinato per ciascun incremento di carico. Il parametro R è definito come rapporto tra l'incremento di spostamento (abbassamento) per decade logaritmica del tempo e l'abbassamento globale dovuto alla pressione applicata. La relazione tra R e la pressione applicata può essere rappresentata graficamente (Fig. 13).

Presentazione dei risultati

15. Il rapporto dovrebbe includere quanto segue:

(a) Diagrammi e descrizioni dettagliate dell'attrezzatura di prova e delle tecniche utilizzate per la perforazione, la preparazione e le prove.

(b) Piante e sezioni che illustrino l'ubicazione delle sezioni di prova in riferimento alla topografia generale, alla geologia e al regime idraulico dell'acqua di falda.

(c) Stratigrafia dettagliata completa di descrizione della roccia fino ad almeno 3 m sopra e sotto ciascuna sezione di prova.

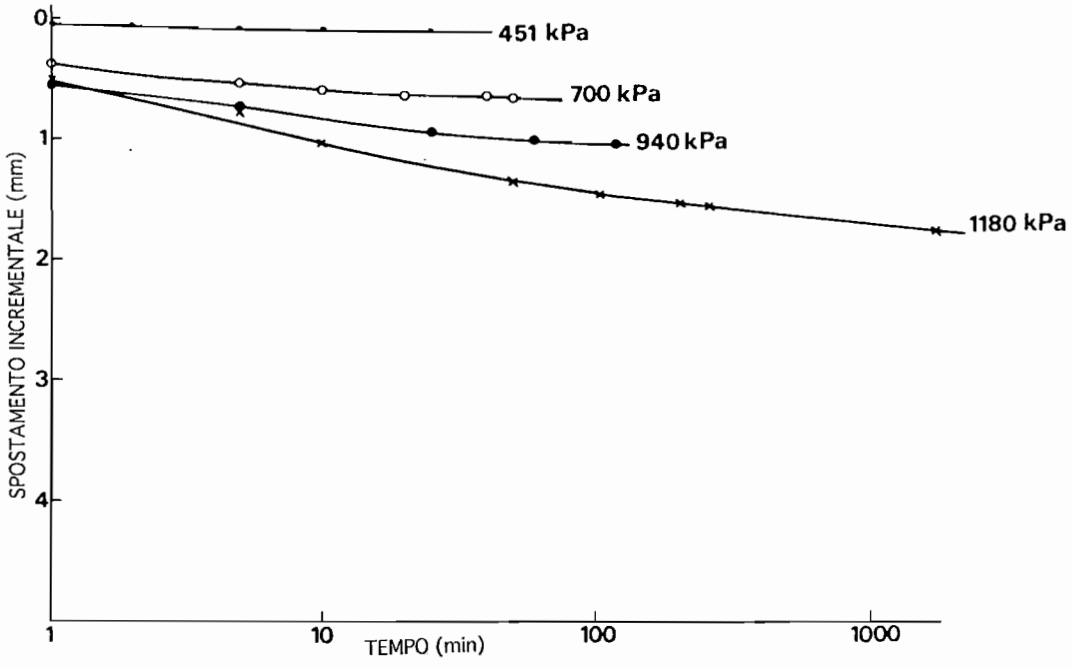

Fig. 8 - Relazioni tipiche tra spostamento incrementale e tempo per vari livelli di carico.

(d) Tabelle con i risultati delle prove, diagrammi degli spostamenti in funzione del tempo per ciascun incremento di carico e diagrammi del carico in funzione dello spostamento per la prova nel suo insieme (per esempio Fig. 9).

(e) I valori calcolati dei parametri di deformabilità, completi dei dettagli sui metodi applicati e delle osservazioni effettuate per i loro calcolo. Anche variazioni in funzione delle profondità del terreno dovrebbero essere illustrate graficamente come «profili di deformabilità» sovrapposti alle stratigrafie dei fori di prova.

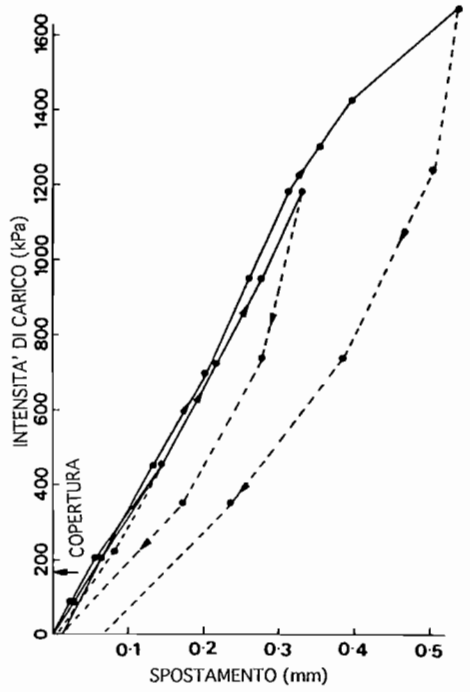

Fig. 9 - Risultati tipici di prove di carico su piastra su calcarenite («Grade II chalk»).

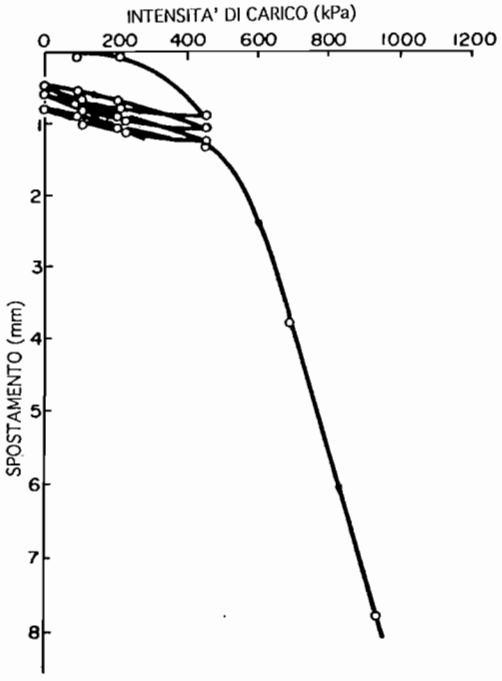

Fig. 10 -

Note

1. Il foro di prova dovrebbe preferibilmente essere di sufficiente diametro in maniera da consentire un'ispezione visiva diretta e la preparazione delle superfici di carico.

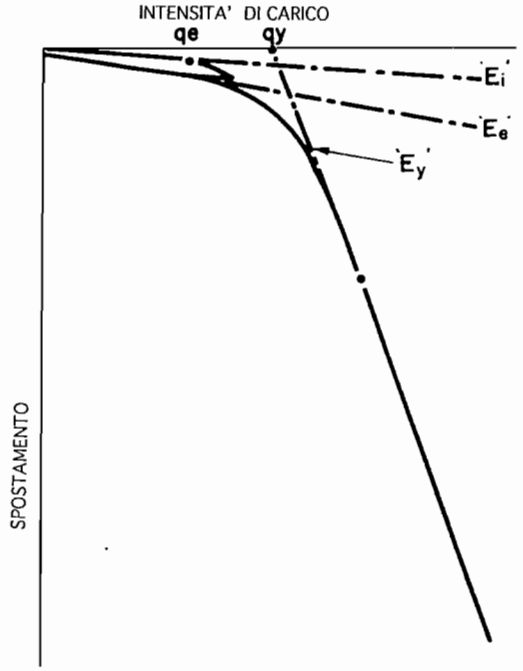

Fig. 11 - Diagramma pressione-spostamento idealizzato per prova di carico su piastra.

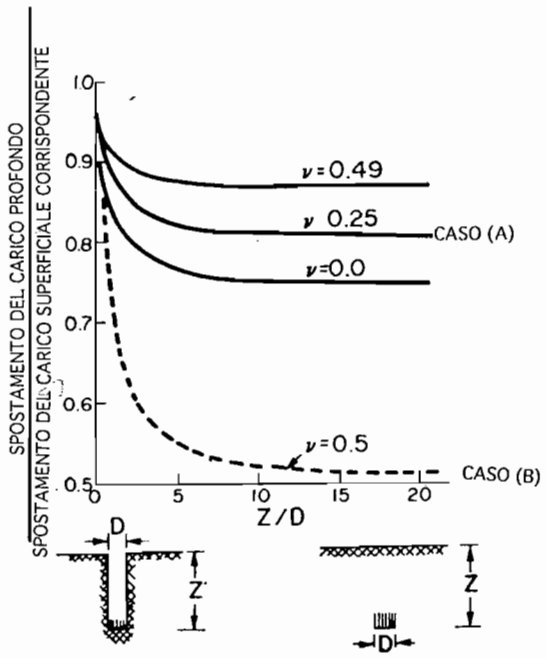

Fig. 12 - (a) Carico circolare uniforme alla base di un pozzo non rivestito. (b) Carico circolare uniforme all'interno di un solido semi-infinito (caso trattato da Fox, 1948).

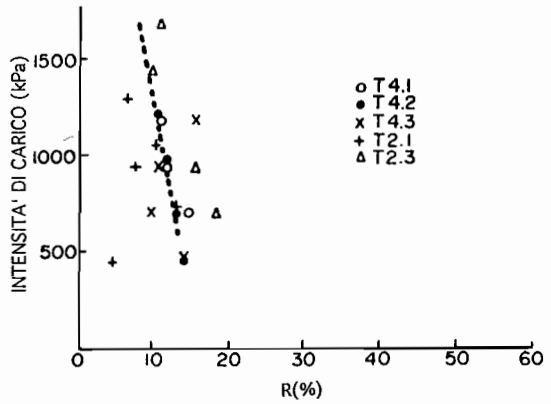

Fig. 13 - Relazione tra intensità di carico e rapporto di scorrimento plastico R ricavata da prove di carico su piastra.

Qualora il foro avesse un diametro insufficiente per un'ispezione diretta, esso deve essere realizzato a carotaggio continuo per fornire campioni adeguati ad una descrizione geotecnica e stratigrafica del terreno.

2. La piastra di carico, se in acciaio non rinforzato mediante nervature, dovrebbero avere uno spessore di almeno 20 mm. per un diametro di 500 mm.

3. Se necessario, lo spostamento della roccia a qualsiasi livello sotto la piastra di carico può essere monitorato mediante l'uso di aste passanti attraverso un foro situato al centro della piastra di carico, ancorate rigidamente nel foro di sondaggio.

4. Nel caso in cui il diametro del foro di prova sia sufficientemente grande, la regolarizzazione della roccia e l'installazione della piastra di carico dovrebbero essere eseguite manualmente. Qualora questo non sia possibile, la pulizia del foro dovrebbe essere effettuata mediante un utensile spianatore o analoga attrezzatura installata in fondo alla batteria di aste di sondaggio, e lo strato di malta messo in opera mediante una tramoggia o un secchio apribile inferiormente.

5. In particolar modo quando si effetuano prove sulle rocce più deboli si possono verificare fenomeni di sollevamento, allentamento ed eventuale rigonfiamento a causa delle operazioni di scavo della superficie di carico e delle mutate condizioni idrauliche. Le conseguenze di ciò possono essere minimizate riducendo quanto più possibile l'intervallo di tempo tra lo scavo e l'inizio della prova.

6. Piccole oscillazioni negli spostamenti possono essere dovute a variazioni del regime idraulico, della temperatura o di altri fattori ambientali.

7. A livelli di carico elevati gli spostamenti potrebbero non stabilizzarsi in tempi ragionevoli; si può in questo caso applicare il criterio che prevede di continuare le misure finché la velocità di spostamento non scenda sotto il 2% dell'incremento di spostamento che avviene in un'ora. Questo criterio può essere modificato per soddisfare alle esigenze della prova. Se gli spostamenti, in corrispondenza di ciascun ciclo di carico, continuano ad aumentare, questi dovrebbero essere seguiti tenendo conto delle esigenze pratiche della prova.

Parte III

Raccomandazioni per la misura della deformabilità della roccia mediante una prova di carico radiale

Finalità

1.(a) La prova consente di determinare la deformabilità di un ammasso roccioso sottoponendo una camera di prova di sezione circolare ad un carico radiale uniformemente distribuito; si misurano quindi gli spostamenti indotti e mediante essi si possono calcolare i moduli elastici e di deformabilità.[1]

(b) La prova consiste nel sottoporre a carico un volume considerevole di roccia, per cui i risultati ottenuti possono essere considerati altamente rappresentativi delle reali proprietà dell'ammasso roccioso, poiché essi tengono conto dell'influenza di giunti e fessure. Può altresì essere misurata la deformabilità anisotropa della roccia.

(c) I risultati sono generalmente utilizzati per il progetto di fondazioni di dighe e per il dimensionamento dei rivestimenti di pozzi piezometrici e di gallerie.

Apparecchiatura

2. Un'attrezzatura per lo scavo ed il rivestimento della camera di prova comprendente:

(a) Materiali per la perforazione e l'abbattimento con esplosivo o attrezzature per lo scavo meccanico.[2]

(b) Materiali cementizi e attrezzature per il getto del rivestimento della galleria, comprese strisce di materiale relativamente debole per dividere il rivestimento in segmenti.[3]

3. Un telaio di contrasto costituito in generale da una serie di anelli in acciaio sufficientemente resistenti e rigidi per resistere alla spinta dei martinetti piatti o del fluido di pressurizzazione.[4] Il telaio deve anche essere a tenuta stagna nel caso in cui il carico sia applicato mediante acqua in pressione. Nel caso in cui il carico sia applicato mediante martinetti piatti, la superficie esterna della struttura di contrasto deve essere liscia; generalmente tra gli anelli in acciaio ed i martinetti piatti si inseriscono tavole in legno duro.

4. Un'attrezzatura di carico per applicare una pressione radiale uniformemente distribuita sull'intradosso del rivestimento, comprendente:

(a) Una pompa idraulica in grado di applicare la pressione necessaria e di mantenerla costante entro il 5% del valore stabilito per un periodo di almeno 24 ore, comprese le necessarie tubazioni, i connettori ed il fluido.

(b) Nel caso si utilizzino i martinetti piatti per l'applicazione del carico (Fig. 14), essi dovrebbero essere progettati in maniera da sottoporre a carico la maggior parte possibile della circonferenza del rivestimento, mantenendo allo stesso tempo tra di loro una sufficiente distanza per consentire la misura degli spostamenti, e dovrebbero avere una pressione di scoppio e una corsa compatibili con i previsti carichi e spostamenti.

(c) Nel caso si utilizzi acqua per l'applicazione del carico (Fig. 15), sono necessarie guaine di impermeabilizzazione per contenere l'acqua in pressione tra

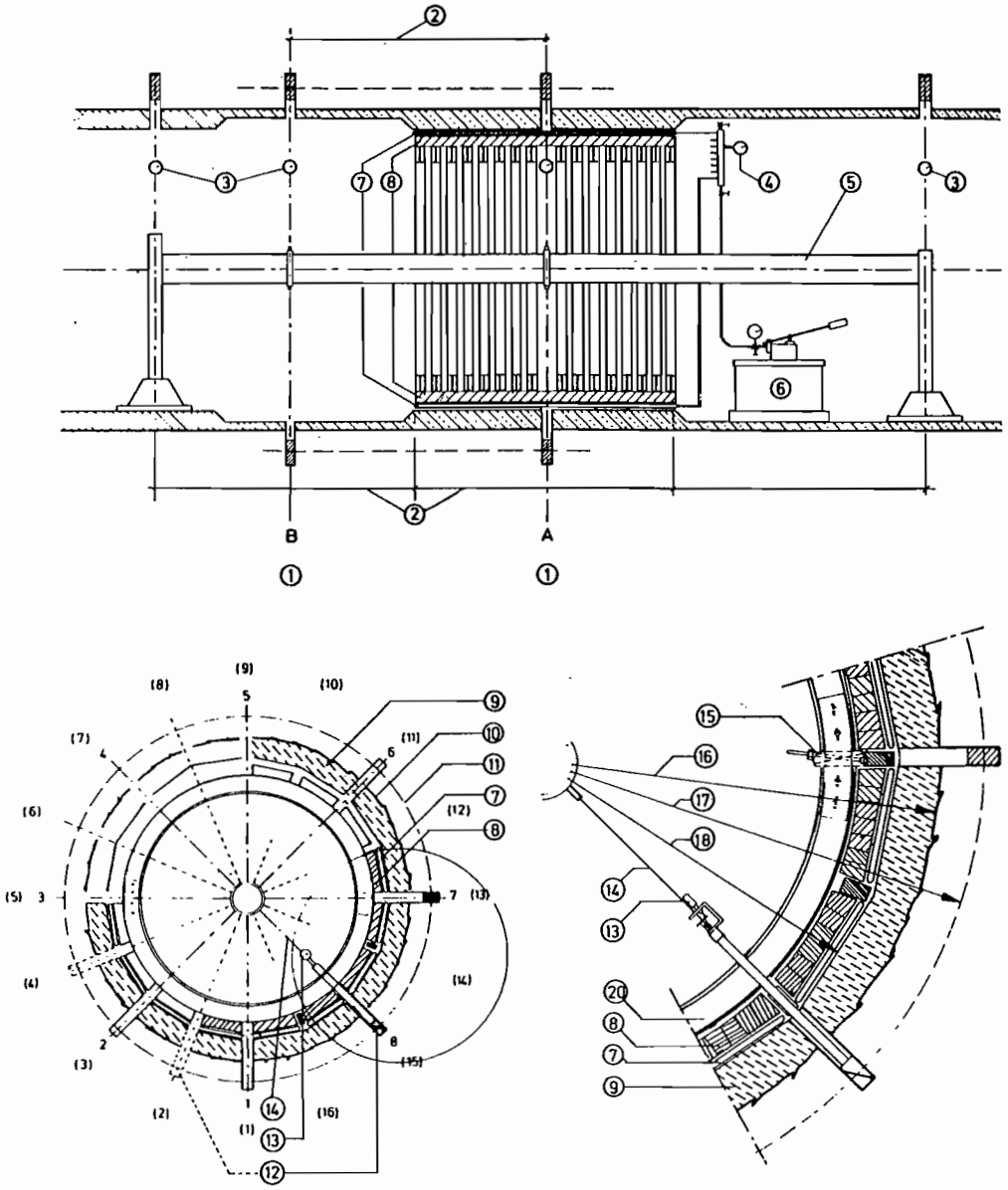

Fig. 14 - Prova di carico radiale: alternativa di carico mediante martinetti piatti.
1. Sezione di misura. - 2. Distanza uguale alla lunghezza del tratto caricato. - 3. Estensimetro di controllo. - 4. Manometro. - 5. Struttura di riferimento. - 6. Pompa manuale. - 7. Martinetto piatto. - 8. Centinatura in legno duro. - 9. Calcestruzzo spruzzato. - 10. Diametro di scavo. - 11. Diametro di misura. - 12. Fori per gli estensimetri. - 13. Comparatore. - 14. Astina in acciaio. - 15. Cunei di allargamento. - 16. Raggio di scavo. - 17. Raggio di misura. - 18. Superficie di carico. - 19. Ancoraggio del bullone. - 20. Anello in acciaio.

il rivestimento in calcestruzzo e la struttura di contrasto; si dovrebbe evitare l'infiltrazione di acqua in pressione nella roccia in quanto questo fatto influenzerebbe notevolmente i risultati della prova.

5. Un'attrezzatura per la misura del carico comprendente uno o più manometri o trasduttori di pressione[5], aventi idoneo fondo scala ed in grado di misurare la pressione applicata con una precisione migliore del 2%.

6.(a) Un'attrezzatura per la misura degli spostamenti radiali della galleria con una precisione migliore di 0.01 mm. Si dovrebbero usare estensimetri monobase o multibase conformi alle norme ISRM «Raccomandazioni per il rilevamento degli spostamenti della roccia». Le direzioni secondo le quali rilevare le misure dovrebbero essere scelte tenendo conto della struttura della roccia e delle eventuali direzioni di anisotropia.

(b) Le misure degli spostamenti dovrebbero essere eseguite facendo riferimento ad ancoraggi resi solidali con la roccia e sufficientemente lontani dalla zona di carico per non esserne influenzati.

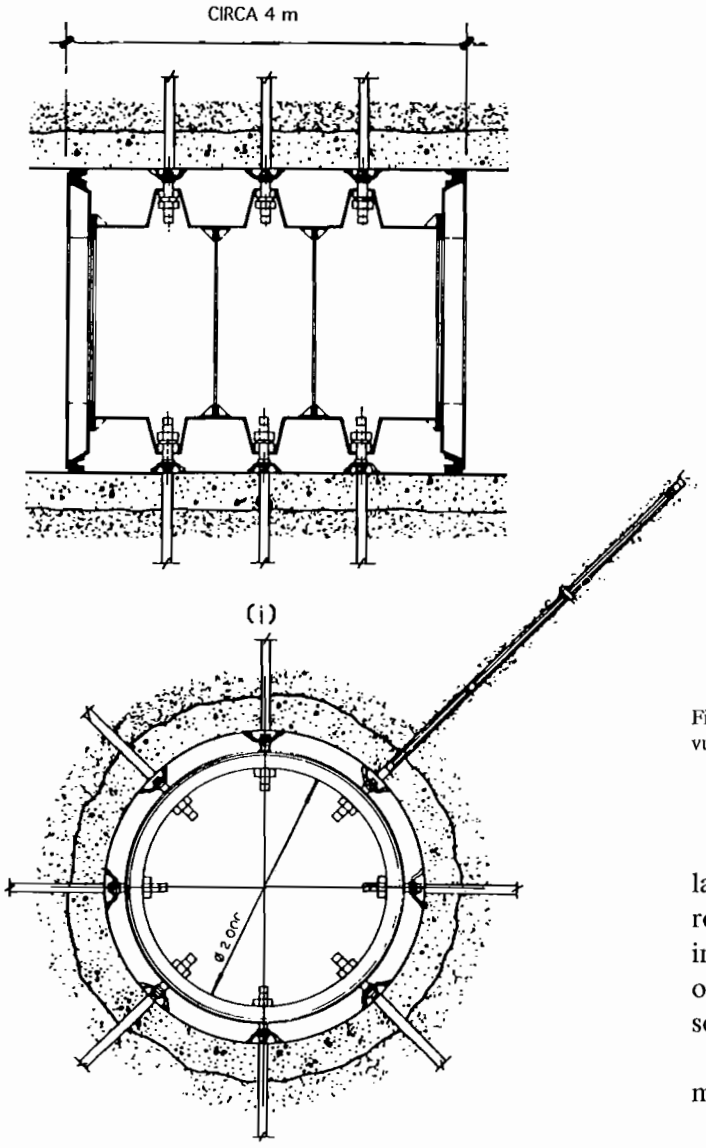

Fig. 15 - Prova di carico radiale: alternativa di carico con acqua in pressione (camera idraulica).

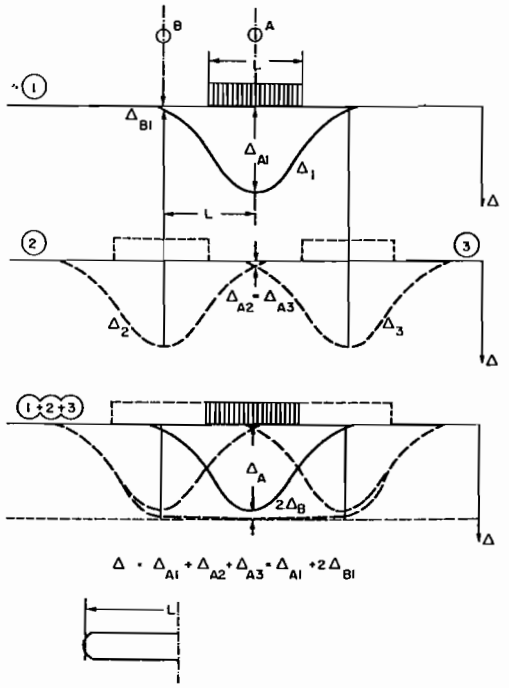

Fig. 16 - Metodo di sovrapposizione per ottenere gli spostamenti dovuti all'applicazione del carico uniformemente distribuito equivalente (eliminazione degli effetti di bordo).

Nel caso si utilizzino estensimetri multibase l'ancoraggio più profondo può essere utilizzato come riferimento purché esso sia situato ad una distanza dal rivestimento pari ad almeno 2 volte il diametro della camera di prova. In alternativa le misure possono essere effettuate con riferimento ad una trave rigida di riferimento che traversi assialmente la camera di prova e sia ancorata ad una distanza non inferiore a 1 volta il diametro della camera a partire da ciascuna estremità della camera (Fig. 14).

Procedura

7. *Preparazione*

(a) L'ubicazione della camera di prova è scelta considerando le condizioni della roccia, ed in particolare l'orientamento degli elementi strutturali della roccia quali i giunti, la stratificazione e la foliazione, in funzione all'orientamento della prevista galleria o scavo per il progetto del quale i risultati delle prove sono richiesti.

(b) La camera di prova è scavata secondo le dimensioni richieste.[2,6]

(c) Si prende nota delle condizioni geologiche della camera e si prelevano i campioni per le prove di classificazione come richiesto.

(d) Si mette in opera nella camera il rivestimento in calcestruzzo.[3] Si montano la struttura di contrasto e l'attrezzatura di carico.

(e) Si segna con cura l'ubicazione dei fori per gli estensimetri e si realizzano le perforazioni, verificando che non vi siano interferenze tra i sistemi di carico e quelli di misura. Si installano gli estensimetri e si controlla l'attrezzatura.

8. *Prova*

(a) La prova è condotta eseguendo almeno tre cicli di carico e di scarico; per ciascun ciclo di carico la pressione massima raggiunta sarà superiore rispetto a quella del ciclo precedente.[7]

(b) Per ciascun ciclo di carico si incrementa la pressione ad una velocità media pari a 0.05 MPa/min fino al valore massimo previsto per il ciclo, eseguendo non meno di 3 serie di letture intermedie delle coppie di valori carico-spostamento in maniera da

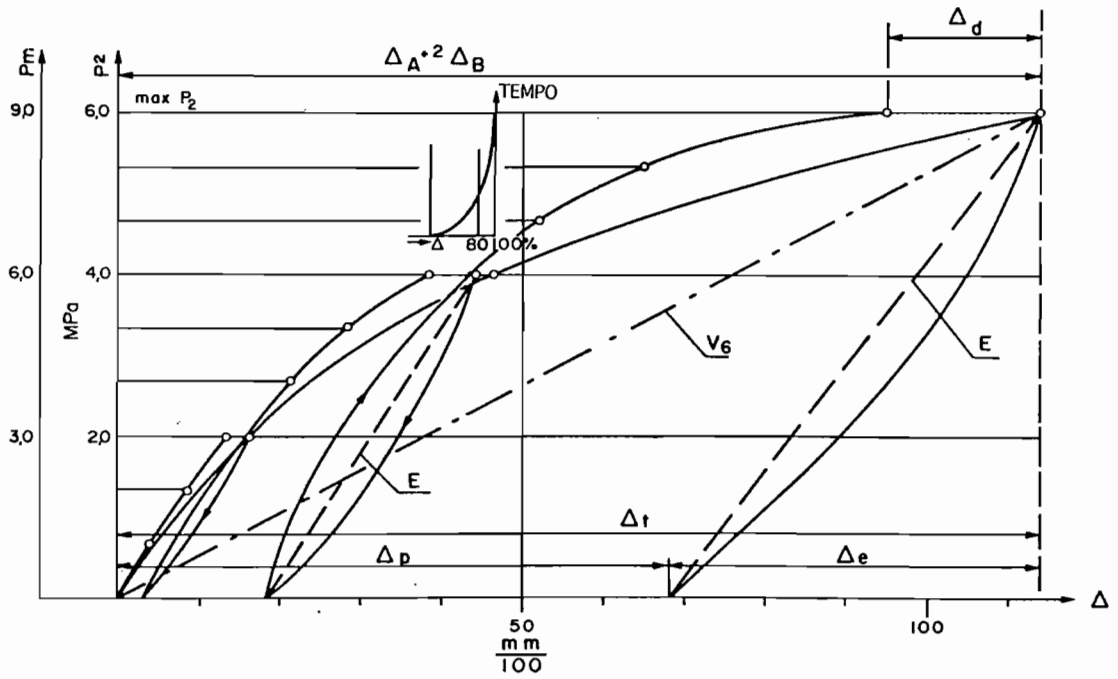

Fig. 17 - Caratteristico diagramma della pressione applicata in funzione dello spostamento.

consentire un adeguato tracciamento delle curve pressione-spostamento (per es. Fig. 17).

(c) Raggiunta la massima pressione prevista per quel ciclo, la pressione è mantenuta costante (± 2% del valore di pressione massima di prova) e si registrano gli spostamenti in funzione del tempo finché non sia raggiunto circa l'80% dello spostamento previsto a lungo termine (Fig. 18).[8] Ciascun ciclo è completato riportando la pressione pressoché a zero con la stessa velocità media, eseguendo ulteriori 3 serie di letture pressione-spostamento.

(d) Nell'ultimo ciclo la pressione massima è mantenuta finché non si osservano più spostamenti.[8] Il ciclo è completato scaricando ad intervalli di carico eseguendo letture della pressione e del corrispondente spostamento.

(e) L'attrezzatura di prova è quindi smontata; se necessario possono essere effettuate ulteriori prove dopo l'esecuzione di operazioni di consolidamento della roccia.[6]

Calcoli

9.(a) È fornita una soluzione solo per il caso di un unico ciclo di misura con estensimetri ancorati immediatamente dietro il rivestimento. Questa soluzione, per la quale si assume anche l'ipotesi che la roccia abbia un comportamento elastico lineare, è generalmente sufficiente nella pratica sebbene sia possibile analizzare configurazioni di prova più complesse e realistiche mediante l'uso, per esempio, di un'analisi agli elementi finiti.

(b) Se si utilizzano martinetti piatti, per prima cosa si correggono i valori di carico applicato per fornire una pressione uniformemente distribuita equivalente p_1 agente sul rivestimento della camera di prove:

$$p_i = \frac{\Sigma b}{2 \cdot \pi \cdot r_1} \cdot p_m \qquad (7)$$

dove:

p_i = pressione uniformemente distribuita sul rivestimento ad una distanza uguale al raggio r_1
P_m = pressione misurata nei martinetti piatti
b = larghezza dei martinetti piatti (vedi Fig. 5)

Si calcola la pressione equivalente p_2 in corrispondenza del «raggio di misura» r_2 immediatamente a ridosso del rivestimento, essendo r_2 il raggio esterno alla zona con sforzi non uniformi sotto i martinetti piatti ed il rivestimento e la roccia allentata:

$$p_2 = \frac{r_1}{r_2} \cdot p_1 = \frac{\Sigma b}{2 \cdot \pi \cdot r_2} \cdot p_m. \qquad (8)$$

(c) La sovrapposizione degli spostamenti per due lunghezze di carico «fittizie» è utilizzata per fornire lo spostamento equivalente D di una «camera di prova di lunghezza infinita».[9]

$$\Delta = \Delta_{A1} + \Delta_{A2} + \Delta_{A3} = \Delta_{A1} + 2 \cdot \Delta_{B1} \qquad (9)$$

(vedi Fig. 16 per i simboli)

(d) Il risultato della prova a lunga durata (D_d) per la massima pressione (max p_2) è riportato grafica-

mente sul diagramma degli spostamenti (Fig. 17). Si correggono proporzionalmente i dati di prova di ciascun ciclo per fornire la curva pressione-spostamento completa a lungo termine. La componente elastica (Δ_e) e la componente plastica (Δ_p) dello spostamento totale (Δ_t) sono ottenuti dallo spostamento dopo lo scarico finale

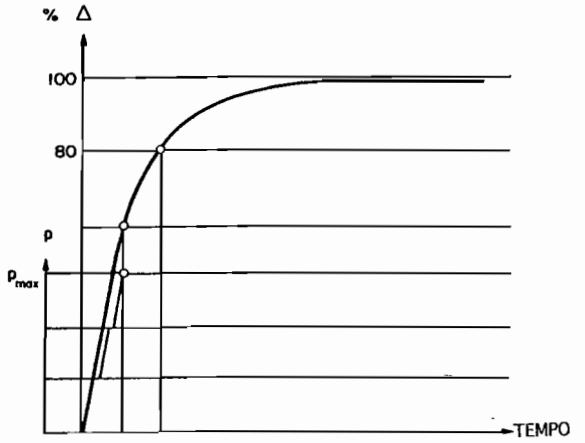

Fig. 18 - Caratteristico andamento del grafico dello spostamento in funzione del tempo a pressione costante.

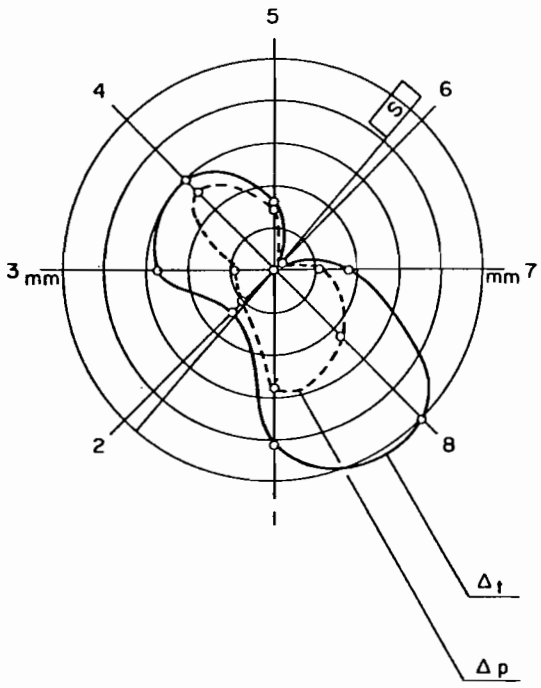

Fig. 20 - Caratteristico diagramma che illustra gli spostamenti totali e plastici in funzione della direzione normale all'asse della camera di prova.

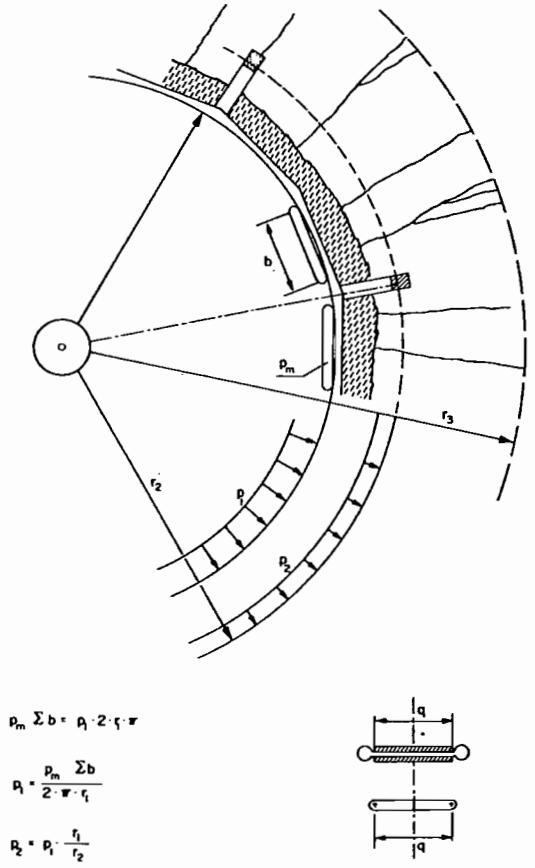

Fig. 19 - Schema dei carichi che illustra i simboli utilizzati nei calcoli.

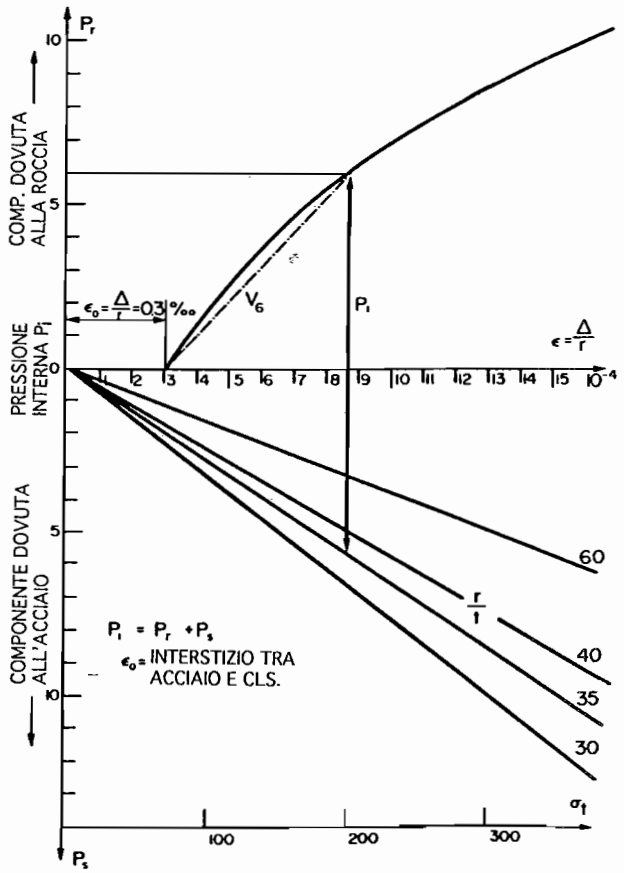

Fig. 21 - Diagramma di progetto per ottenere una stima diretta dello spessore del rivestimento di una galleria in pressione (da LAUFFER e SEEBER, vedi Nota 1).

Tabella I - *Configurazione raccomandata per i fogli sui quali riportare i dati di prova.*

1	2	3	4	5	4 + 5	6	7	4 + 5 + 7	8	9
NR	TEMPO	p_2	Δ_A	Δ_B	$\Delta_A + \Delta_B$	Δ_d	Δ_d corr.	Δ_t	Δ_e	Δ_p
1						—	—			
2						—	—			
3a							—			
3b							—			
3c										
4										
5										
6a							—			
6b							—			
6c										
7										
8										
9a										
9∞							—			

$$E = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_e} \cdot \frac{m+1}{m} = \text{----------}$$

$$V = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_t} \cdot \frac{m+1}{m} = \text{----------}$$

$$\Delta_t = \Delta_p + \Delta_c \quad \text{(vedi Fig. 17)} \qquad (10)$$

(e) Il modulo elastico E e il modulo di deformabilità V sono ottenuti dal diagramma pressione-spostamento (Fig. 17) mediante l'uso delle seguenti formule basate sulla teoria dell'elasticità:

$$E = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_e} \cdot \frac{\nu+1}{\nu} \qquad (11)$$

$$V = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_t} \cdot \frac{\nu+1}{\nu} \qquad (12)$$

in cui p_2 è la massima pressione di prova e ν è una stima del coefficiente di Poisson.

(f) In alternativa a (e) di cui sopra, i moduli della roccia indisturbata possono essere ottenuti prendendo in considerazione gli effetti di una zona fessurata ed allentata utilizzando le seguenti formule:

$$E = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_e} \left(\frac{\nu+1}{\nu} + \ln \frac{r_3}{\rho_2} \right) \qquad (13)$$

$$V = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_t} \left(\frac{\nu+1}{\nu} + \ln \frac{r_3}{\rho_2} \right) \qquad (14)$$

dove r_3 è il raggio del limite della zona assunta fessurata e allentata, e ln il logaritmo naturale.

(g) La dimensione del rivestimento di gallerie in pressione può essere determinata direttamente dai grafici.[1] Si deve utilizzare la curva di carico che ha evidenziato il maggiore spostamento come mostrato nelle Figg. 17, 20 e 21.

Presentazione dei risultati

10. Il rapporto dovrebbe includere quanto segue:

(a) Uno schema che indichi tutte le dimensioni, le fotografie e una dettagliata descrizione dell'attrezzatura, una completa descrizione dei metodi adottati per la preparazione della camera, per il rivestimento e per le prove.

(b) Mappe e sezioni geologiche della camera di prova che evidenzino l'orientazione relativa della stratificazione, della fratturazione, della fagliatura e di qualsiasi altra caratteristica che possa avere influenza sui risultati delle prove, possibilmente con allegati i dati di prove indice per fornire ulteriori informazioni sulle caratteristiche meccaniche della roccia sottoposta a prova.

(c) Tabelle con i dati delle prove e i relativi diagrammi con riportati gli spostamenti in funzione delle pressioni applicate p_m o p_2, e gli spostamenti in fun-

zione del tempo a pressione costante per ciascun punto di misura. Tabelle con i valori «corretti» con l'indicazione delle correzioni apportate. Vedi Figg. 17, 18 e Tab. I (i diagrammi sono normalmente tracciati solo per gli spostamenti massimi e minimi).

(d) Una sezione trasversale della camera di prova che rappresenti gli spostamenti totali (Δ_t) e plastici (Δ_p) verificatisi in corrispondenza della pressione massima (per es. Fig. 20). L'orientazione delle strutture geologiche più importanti dovrebbe essere evidenziata in questa figura per consentire il confronto con eventuali anisotropie nei risultati di prova.

(e) I diagrammi che riportano gli spostamenti in funzione della pressione applicata (per es. Fig. 17) dovrebbero essere contrassegnati per indicare i moduli elastici e di deformabilità corrispondenti e i dati in base ai quali i moduli sono stati calcolati.

Note

1. Per il progetto del rivestimento di gallerie in pressione lo spessore del rivestimento in scala reale può essere determinato direttamente in base ai risultati della prova sulla galleria «modello» [Lauffer H., Seeber, G. (1961) - *Design and control of linings in pressure tunnels and shafts*. 7th Int. Conf. on Large Dams, Roma 1961, R91, Q25].

2. Il diametro consigliato è di 2.5 m, con una lunghezza di carico uguale al diametro. L'uso di esplosivo è consentito unicamente se i risultati delle prove sono applicati direttamente considerando la prova come «modello» di una galleria reale scavata con esplosivo (vedi Nota 1). In caso contrario la camera dovrebbe essere scavata arrecando all'ammasso il minor disturbo possibile.

3. Qualora la prova sia eseguita per studiare il comportamento della sola roccia, il rivestimento dovrebbe essere realizzato in segmenti in maniera da avere una resistenza all'espansione radiale trascurabile; in questo caso il tipo di materiale con il quale è realizzato il rivestimento riveste poca importanza, e può essere utilizzato sia calcestruzzo spruzzato che calcestruzzo gettato. Se invece è previsto lo studio del comportamento del rivestimento insieme alla roccia, il rivestimento non dovrebbe essere realizzato a segmenti e le sue proprietà dovrebbero essere riprodotte in base a quelle del prototipo.

4. L'applicazione della pressione radiale alla camera di prova può essere effettuata sia mediante martinetti piatti che mediante un liquido in pressione; le due alternative sono illustrate nelle Figg. 14 e 15.

5. La misura degli spostamenti è normalmente eseguita mediante comparatori meccanici. Una particolare attenzione è richiesta per garantire l'affidabilità di trasduttori elettrici e del sistema di acquisizione dati, qualora questa attrezzatura sia utilizzata.

6. Per valutare l'efficacia di iniezioni di consolidamento, generalmente si preparano due camere di prova adiacenti. Le iniezioni sono effettuate dopo il completamento della prova nella camera non consolidata, e l'attrezzatura è quindi trasferita nella camera di prova consolidata.

7. La massima pressione di prova applicata in questo tipo di prova e' generalmente 5-10 MPa.

8. Nel caso la roccia sia caratterizzata da scorrimento plastico, può essere necessario interrompere il carico anche se si continuano a registrare spostamenti. Si dovrebbe aver raggiunto non meno dell'80% degli spostamenti previsti a lungo termine.

9. Questa sovrapposizione si rende necessaria a causa della lunghezza relativamente limitata della camera di prova rispetto al suo diametro. La sovrapposizione è rigorosamente valida unicamente per deformazioni in campo elastico; essa fornisce tuttavia una buona approssimazione anche se la roccia ha un limitato comportamento plastico.