Premessa alla traduzione delle Raccomandazioni ISRM per la determinazione della tenacità a frattura delle rocce

La conoscenza dei valori di tenacità a frattura delle rocce è un elemento indispensabile per la previsione della propagazione delle fratture negli ammassi rocciosi, che riveste particolare interesse nei problemi di tipo applicativo, quali la fratturazione idraulica e la stabilità di strutture in roccia.

I *Suggested Methods for Determining the Fracture Thoughness of Rock*, pubblicati a cura della ISRM nel 1988, costituiscono un punto di riferimento fondamentale per chi si trovi a determinare in laboratorio le tenacità delle rocce, perché propongono in modo chiaro alcune modalità di prova e di interpretazione dei risultati. Occorre però anche segnalare come, in relazione al rapido sviluppo della meccanica della frattura, siano state formulate diverse proposte di modifica e critiche alla metodologia proposta. In particolare, anche sulla base di una esperienza personale maturata presso il laboratorio di meccanica delle rocce dell'ENEL-CRIS di Milano, si ritiene opportuno presentare al lettore della versione italiana delle Raccomandazioni, le seguenti osservazioni:

1. La preparazione dei provini con intaglio a V, il loro allineamento e sistemazione nella macchina di prova non sono né semplici né veloci da realizzare. Anche la messa a punto dell'apparecchiatura non sembra essere sempre compatibile con la possibilità dei comuni laboratori di meccanica delle rocce.
2. Gli effetti delle dimensioni e della forma dei provini sui risultati non sono esplicitamente tenuti in conto. In tal senso, il ricorso ad un fattore connettivo basato sull'indice di non linearità non sembra, alla luce dei più recenti sviluppi della meccanica della frattura, concettualmente corretto e non elimina comunque l'effetto della scala.
3. Il computo dell'indice di non linearità si basa su una costruzione grafica troppo laboriosa e possibile fonte di errori anche molto significativi.

Per quanto riguarda la terminologia utilizzata è speranza del traduttore che i numerosi disegni presenti nel testo possano sopperire alla discutibile traduzione di alcuni termini tecnici relativi a componenti meccaniche delle apparecchiature di prova.

Relativamente alla determinazione di due metodi di prova raccomandati, occorre segnalare come i termini *chevron bend* e *short rod* non sono stati tradotti, in quanto non esistono nella pratica di laboratorio italiana termini equivalenti e sufficientemente diffusi. È infine da rilevare come tali termini vengono utilizzati indifferentemente per indicare il tipo di provino o il tipo di prova.

Il curatore della traduzione
CLAUDIO SCAVIA

Raccomandazioni per la determinazione della tenacità a frattura delle rocce

Introduzione tecnica

Note sulla meccanica della frattura

L'ammasso roccioso è in genere d'importanza primaria nei problemi di ingegneria delle rocce, mentre il materiale roccioso diventa di per sè importante nei processi di abbattimento quali la perforazione, lo scavo con esplosivi, lo scavo di gallerie con fresa, il taglio o la frantumazione. Essendo i due aspetti tuttavia strettamente correlati, i concetti della meccanica della frattura, che in un primo tempo si erano rivolti principalmente allo studio del materiale roccioso, hanno fornito contributi importanti anche alla soluzione di problemi di ingegneria delle rocce [1]. Negli ultimi anni è quindi andato crescendo l'interesse verso tali concetti, sia nel campo degli studi analitici sia in quello delle prove di tenacità a frattura delle rocce [2 - 4].

La meccanica della frattura è una disciplina ingegneristica, il cui scopo è di fornire una descrizione quantitativa del passaggio da un componente strutturale intatto ad uno fratturato a causa della propagazione di una o più fessure. In generale, la teoria mette in rapporto la sollecitazione massima agente sulla struttura con la dimensione e l'ubicazione della fessura. È in grado anche di stimare la crescita delle fessure fino ad una dimensione critica, per condizioni ambientali o per variazione dei carichi (fatica). Può inoltre determinare le condizioni di propagazione rapida e di arresto delle fessure in avanzamento [5].

La meccanica della frattura può essere utilizzata principalmente per prevenire e prevedere la rottura catastrofica di strutture costruite con materiali prodotti dall'uomo, quali metalli, plastiche e ceramiche, trovando applicazione anche nel campo della rottura del calcestruzzo [6, 7]. In geofisica, diventa sempre più importante nella previsione dei movimenti sismici delle faglie. È però nell'ingegneria delle rocce che il suo uso sembra promettere sviluppi positivi.

Dal punto di vista storico, la meccanica della frattura è uno sviluppo dell'approccio della resistenza dei materiali, in cui la sollecitazione applicata ad una struttura è confrontata con determinati valori della resistenza del materiale al fine di stabilire se la rottura si verificherà o meno. Nella meccanica della frattura, il parametro di base del materiale prende il nome di tenacità a frattura.

Dal momento che la meccanica della frattura considera esplicitamente l'effetto delle fessure, le prove di tenacità a frattura sono diverse dalle prove ordinarie di resistenza perchè richiedono in genere l'impiego di provini con fessure ben definite.

Note sul concetto di tenacità a frattura

Griffith [8, 9] è stato il primo a stabilire un collegamento quantitativo tra resistenza e dimensione della fessura, utilizzando un bilancio energetico globale per identificare lo stato critico per la propagazione instabile della fessura nei materiali fragili. Secondo questo approccio, l'energia rilasciata dalla struttura in seguito alla propagazione della fessura (detta energia di frattura), è bilanciata da un termine di resistenza del materiale, che si può considerare opponentesi alla propagazione della fessura. Il termine di resistenza è l'energia specifica di superficie, γ, di dimensioni J/m^2 [10].

Nella moderna meccanica della frattura elastica lineare, il parametro guida è il fattore di intensificazione delle sollecitazioni, K. Esso, da un lato, è una misura della singolarità del campo di sollecitazione all'apice di una fessura sottoposta a carico e, dall'altro, è intimamente legato alla quantità di energia di frattura [11]. Viene abitualmente determinato mediante espressioni analitiche o procedimenti numerici e le sue dimensioni sono quelle di una sollecitazione x $\sqrt{}$ (lunghezza fessura), cioè ad esempio Pa x $\sqrt{(m)}$ o $N/m^{1.5}$.

K è posto in relazione ad un valore critico, che viene spesso considerato una proprietà del materiale e viene chiamato tenacità a frattura in condizioni di deformazione piana, K_{Ic}. Quando K raggiunge K_{Ic}, si assume che avvenga la propagazione della frattura. Una struttura si può dunque considerare sicura se K si mantiene al di sotto di K_{Ic}, mentre può arrivare alla rottura o alla frammentazione se K_{Ic} viene superato.

La relazione tra tenacità ed energia di superficie (effettiva) è semplicemente:

$$K_{Ic} = \sqrt{(2\gamma_{eff}E)}$$

dove il fattore 2 collega le due facce della fessura con ciascun apice della fessura, l'indice effettivo sta ad indicare che tutti gli effetti dissipativi all'apice della fessura e nelle immediate vicinanze sono compresi in γ, ed E è un appropriato modulo di deformazione del materiale.

La relazione base $K = K_{Ic}$, che esprime un equilibrio tra tassi di energia disponibili e dissipati al momento in cui la fessura inizia a manifestarsi, deve valere anche durante la crescita della fessurazione. Pertanto, la tenacità a frattura di un materiale esprime la sua resistenza ad una propagazione della fessura, oppure il tasso di consumo dell'energia di frattura richiesto per creare nuove superfici.

Note sulle possibilità di utilizzo dei valori di tenacità a frattura nella meccanica delle rocce

La tenacità a frattura può essere utilizzata nell'ingegneria delle rocce come:

(i) un parametro per la classificazione dei materiali rocciosi [12];

(ii) un indice rappresentativo dei processi di abbattimento quali lo scavo di gallerie con fresa [13, 14] e lo scavo con esplosivi [15];

(iii) una proprietà del materiale nella modellazione dell'abbattimento delle rocce, come ad esempio nel taglio [16], nella fratturazione idraulica [17, 19], nella fratturazione tramite gas [20, 21], nella stimolazione di pozzi di gas [22, 23], nella fratturazione con mine a raggiera [24, 25] e con mine a cratere [26], così come nelle analisi di stabilità [27, 28] e nell'interpretazione delle caratteristiche geologiche [29, 30].

In alcuni di questi casi, la tenacità a frattura non è l'unico parametro di resistenza che deve essere considerato. Si può tuttavia vedere che può diventare più importante di altre misure di resistenza quando il comportamento della struttura in esame è principalmente influenzato da poche fessure dominanti. Perciò la tenacità a frattura è oggi soprattutto d'aiuto nella previsione del comportamento delle rocce in casi reali. Le problematiche relative allo sfruttamento dell'energia geotermica offrono peraltro un ulteriore esempio di come la meccanica della frattura e le prove di tenacità a frattura siano state utilizzate nell'ingegneria delle rocce [31, 32].

Scopo delle raccomandazioni

A tutt'oggi, nelle prove di tenacità a frattura si sono utilizzati provini di forma diversa facendo riferimento a varie metodologie. I risultati ottenuti non sono in generale comparabili [2, 33, 34], il che sta ad indicare che i valori di tenacità a frattura così misurati non rappresentano di norma una proprietà del materiale. Scopo principale di queste raccomandazioni è di fornire metodi di prova che consentano di ottenere valori precisi e affidabili della tenacità a frattura.

Tali valori sono ovviamente un elemento importante per ottenere buone previsioni progettuali quantitative. Anche per quelle rocce per le quali non si ottengano dalle prove valori che possano essere considerati proprietà del materiale, il numero di tenacità così ottenuto ha un valore pratico, che può essere utilizzato come indice. In questi casi, chi si avvale di metodi di prova standard può comunque sempre incorporare l'esperienza di altri utilizzatori più facilmente di altri che non se ne servono.

Note sulle raccomandazioni

Vengono consigliati e descritti due metodi per la determinazione della tenacità a frattura di materiali rocciosi a partire da provini cilindrici ottenuti per carotaggio. Si è scelto tale tipo di provini perchè spesso le rocce sono disponibili sotto forma di spezzoni carotati che non richiedono grandi lavorazioni ulteriori.

Il Metodo 1 utilizza un provino, denominato chevron bend, in cui è stato prodotto un intaglio perpendicolare all'asse principale del provino [35]. Al campione di roccia, appoggiato a due rulli di supporto, è applicato un carico verticale che tende ad allontanare i lati dell'intaglio (vedi Fig. 1). In questo modo, il provino tende a dividersi in due in senso trasversale durante la prova, in seguito al propagarsi della fessura nella parte integra della sezione trasversale intagliata.

Il Metodo 2 utilizza un provino, denominato short rod [36], che presenta un intaglio parallelo all'asse principale. Al provino è applicato un carico di trazione allo scopo di allontanare le facce dell'intaglio (vedi Fig. 2). La separazione del provino in due spezzoni è così ottenuta per propagazione in corso di prova della fessura nella parte integra del provino

In entrambi i metodi, la parte integra della sezione intagliata è a forma di V. Grazie a tale forma si ha un tempo relativamente lungo di propagazione stabile della frattura al crescere del carico, fino al punto in cui si calcola la tenacità a frattura. In questo modo, nel provino si forma automaticamente una frattura netta naturale e la resistenza a frattura del materiale dovrebbe svilupparsi completamente con la crescita iniziale della fessura.

L'uso di due provini con fratture iniziali orientate in due diverse direzioni tiene conto dell'anisotropia che caratterizza buona parte dei materiali rocciosi. Inoltre si ottiene un risparmio di materiale, dato che il provino utilizzato nel Metodo 1 è sufficientemente

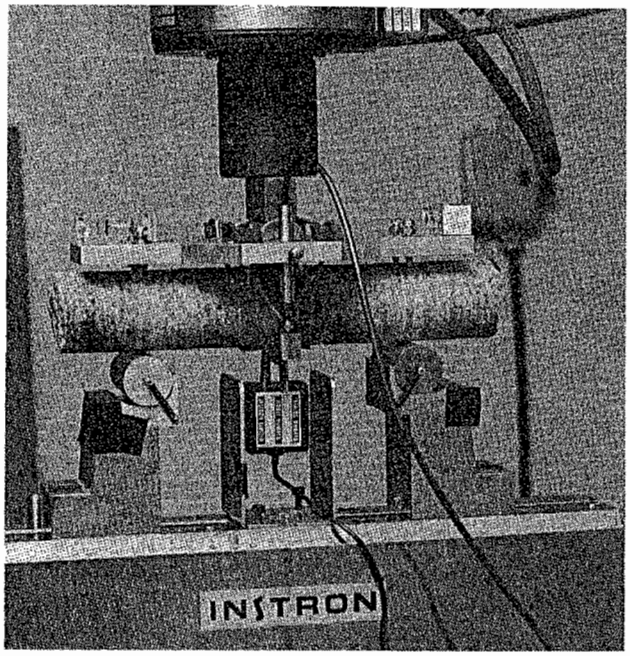


Fig. 1 - Allestimento del provino *chevron bend* nella macchina di prova, compresa la strumentazione per la misura degli spostamenti.

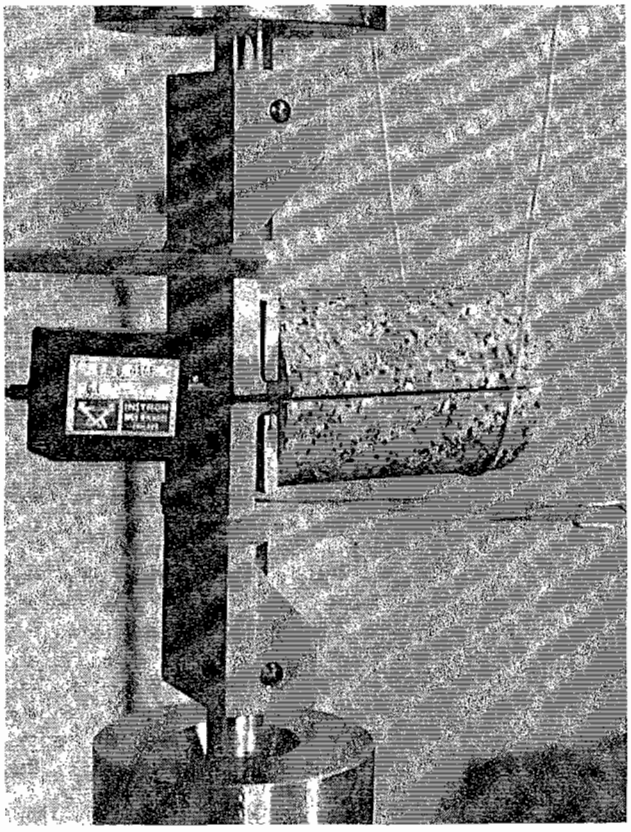


Fig. 2 - Allestimento del provino *short rod* nella macchina di prova, compreso l'estensimetro per la misura degli spostamenti.

lungo affinchè le due parti restanti al termine della prova possano essere utilizzate nelle prove short rod del Metodo 2.

Si anticipa che nelle versioni successive delle presenti Raccomandazioni è prevista l'aggiunta di un terzo provino in cui la direzione di propagazione della rottura sarà perpendicolare a quella relativa a ciascuno dei due provini qui considerati, in modo da poter eseguire un'analisi completa dell'anisotropia utilizzando una carota sola. Tale direzione dovrebbe coincidere con la direzione di formazione iniziale (radiale) della rottura in una situazione teorica di fratturazione idraulica o in una prova di trazione Brasiliana.

Entrambi i metodi offrono due livelli di prova. La prova di livello I può anche essere eseguita con attrezzatura portatile e richiede soltanto la registrazione del carico massimo durante la prova. Il valore di tenacità a frattura si può allora determinare mediante un semplice calcolo, ma ha più il carattere di un indice numerico che di una proprietà del materiale. Perciò la prova di livello I è più utile ai fini di una classificazione preliminare del materiale.

La prova di livello II richiede misure continue del carico e degli spostamenti nel corso della prova, è di esecuzione relativamente complessa e deve quindi essere effettuata in laboratorio. È tuttavia consigliabile e giustificata dall'osservazione che le prove effettuate su carote di dimensioni normali tendono a fornire valori di tenacità a frattura in qualche modo inferiori rispetto ai valori ottenuti su provini più grandi.

Grazie ai due livelli di prova, le Raccomandazioni consentono all'utilizzatore di scegliere tra quantità e qualità dei dati a parità di costo. Dello stesso tipo è la scelta tra l'indice di resistenza e la resistenza monoassiale, a compressione o a trazione, nelle prove convenzionali di resistenza delle rocce.

La Tabella I riporta valori di tenacità a frattura ottenuti su carote sottoposte a prova dai ricercatori impegnati nello sviluppo delle Raccomandazioni. Sia la tipologia delle prove che la valutazione della tenacità a frattura si accordano nelle linee essenziali ai contenuti del documento conclusivo, ma naturalmente se ne discostano nei particolari. I risultati riportati in tabella, dunque, indicano la gamma di valori medi, la dispersione ottenuta nella prova e la variabilità e l'anisotropia presenti nel materiale roccioso.

Dalle Raccomandazioni è lecito attendersi un certo grado di normalizzazione nelle prove di tenacità a frattura delle rocce, ma non si deve escludere la ricerca di semplificazioni e di ulteriori miglioramenti dei metodi qui presentati e neppure l'uso parallelo di altri metodi, perchè prove accuratamente eseguite di meccanica della frattura possono consentire una miglior comprensione della frattura delle rocce intatte [37-41].

TABELLA I - Valori di tenacita a frattura (media n. di prove ± scarto quadratico medio) ottenuti su provini carotati, espressi in $MN/m^{1.5}$.

Rocce [fonte dati]	Chevron bend		Short rod	
	K_{CB}	K^c_{CB}	K_{SR}	K^c_{SR}
Andesite Tampomas [70]	$1,50_7 \pm 0,12$	$1,68_7 \pm 0,15$	—	—
Andesite Tampomas [70]	$1,26_5 \pm 0,10$	$1,26_5 \pm 0,10$	—	—
Dolerite Whin Sill [46]	—	—	$2,86_6 \pm 0,12$	$3,26_6 \pm 0,09$
Gabbro Kallax [44]	—	—	$2,22_{13} \pm 0,11$	$2,58_{18} \pm 0,22$
Gabbro Kallax [44]	—	—	$2,86_{10} \pm 0,14$	$3,23_{13} \pm 0,34$
Granito Bohus [68]	$1,46_5 \pm 0,07$	—	$1,8_3$	2,43
Granito Bohus [69]	$1,69_4 \pm 0,04$	$1,42_4 \pm 0,14$	—	—
Granito CornWall [66]	$1,32_4 \pm 0,10$	—	—	—
Granito Epprechstein [66]	$1,74_8 \pm 0,18$	—	—	—
Granito Falkenberg [66]	$0,65_4 \pm 0,14$	—	—	—
Granito Falkenberg [66]	—	$1,52_5 \pm 0,20$	—	—
Granito lidato [66]	$1,09_5 \pm 0,13$	$1,73_5 \pm 0,21$	—	—
Granito lidato [67]	$1,37_3 \pm 0,13$	$2,26_3 \pm 0,65$	$1,01_4 \pm 0,18$	$1,12_4 \pm 0,35$
Granito lidato D, A [69]	$1,43_3 \pm 0,01$	$0,83_3 \pm 0,13$	$1,11_3 \pm 0,12$	$1,26_3 \pm 0,18$
Granito lidato ST [69]	—	—	$1,58_3 \pm 0,08$	$1,85_3 \pm 0,06$
Granito Krakemala [68]	$1,64_3 \pm 0,04$	$2,16_3 \pm 0,23$	$1,69_6 \pm 0,17$	$2,22_5 \pm 0,24$
Granito Merrivale [46]	—	—	$1,50_{24} \pm 0,10$	$1,80_{24} \pm 0,13$
Granito Rosa [46]	—	—	$1,58_4 \pm 0,04$	$2,03_4 \pm 0,08$
Granito Rasjö [69]	—	—	$2,37_6 \pm 0,32$	$2,80_6 \pm 0,33$
GranitoStrathAlladale[46]	—	—	$1,80_{11} \pm 0,10$	$2,19_{11} \pm 0,11$
Granito Stripa [47]	—	—	$2,01_5 \pm 0,14$	$2,36_{11} \pm 0,13$
Granito Stripa [68]	—	—	$2,37_9 \pm 0,15$	$2,70_9 \pm 0,27$
Granito Westerly [46]	—	—	$1,64_9 \pm 0,03$	$1,82_9 \pm 0,07$
Granito Westerly [68]	—	—	$2,04_9 \pm 0,05$	$2,27_4 \pm 0,03$
Granodiorite Finnsjön [69]	—	—	$2,95_3 \pm 0,11$	$3,35_3 \pm 0,08$
Norite Gray [46]	—	—	$2,23_1 \pm 0,11$	$2,69_6 \pm 0,16$
Tufo Ogino [71]	$1,05_{17} \pm 0,11$	$1,08_9 \pm 0,10$	$1,02_{19} \pm 0,05$	$1,06_{19} \pm 0,05$
Arenaria Pennant [46]	—	—	$1,98_6 \pm 0,06$	$2,56_6 \pm 0,07$
Arenaria Ruhr [66]	$1,03_{10} \pm 0,04$			
Arenaria Alvdalen [69]	$1,51_6 \pm 0,08$	$0,73_6 \pm 0,08$	$1,54_{11} \pm 0,08$	$1,91_{11} \pm 0,14$
Calcare Klinthagen [68]	$1,31_2$	—	$1,41_8 \pm 0,19$	$1,87_8 \pm 0,25$
Calcare Shelley [46]	—	—	$1,40_5 \pm 0,03$	$1,44_5 \pm 0,04$
Scisto Anvil Point D[45]	—	—	$0,56_5 \pm 0,09$	$1,02_5 \pm 0,14$
Scisto Anvil Point ST[45]	—	—	$0,25_4 \pm 0,04$	$0,47_2 \pm 0,07$
Marmo di Carrara [66]	$1,26_5 \pm 0,08$	$1,38_5 \pm 0,09$	—	—
Marmo di Ekeberg [68]	$1,89_{16} \pm 0,12$	—	$1,83_9 \pm 0,35$	$2,25_9 \pm 0,36$
Marmo di Ekeberg ST[68]	—	—	$1,48_3 \pm 0,16$	$1,82_3 \pm 0,10$
Marmo di Ekeberg D[68]	—	—	$2,28_2 \pm 0,01$	$2,62_2 \pm 0,05$
Marmo di Ekeberg [69]	$1,79_4 \pm 0,07$	$1,76_4 \pm 0,21$	—	—
Marmo di Treuchtlingen[68]	$1,26_6 \pm 0,07$	$1,70_6 \pm 0,09$	—	—

* A, D e ST fanno riferimento all'orientamento relativo tra la fessura e la struttura osservabile della roccia [45].

Metodo 1: Raccomandazione per la determinazione della tenacità a frattura su provini Chevron Bend

Campo di applicabilità del metodo

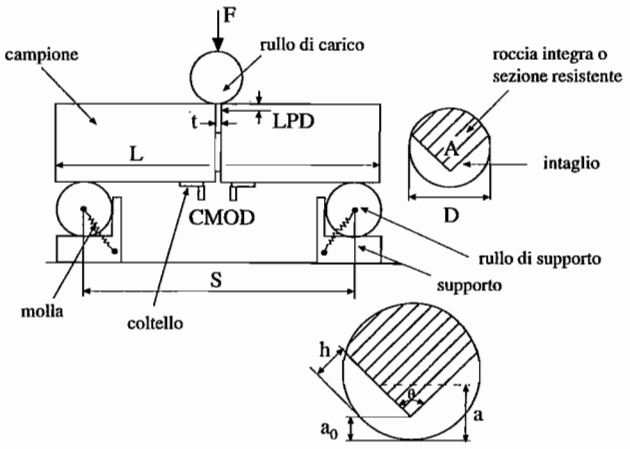
1. (a) La prova ha lo scopo di misurare la tenacità a frattura di materiali rocciosi. Questa proprietà è usata principalmente per la classificazione e la caratterizzazione del materiale roccioso rispetto alla resistenza alla propagazione della frattura. Serve anche come indice nei processi di abbattimento, quali la frantumazione e lo scavo di gallerie, o nell'analisi della fratturazione idraulica o con esplosivo.

(b) La prova utilizza materiale roccioso sotto forma di spezzoni carotati. L'asse della carota deve essere orientato parallelamente o perpendicolarmente rispetto a tutte le fonti di anisotropia, come i piani di debolezza. Il metodo qui presentato utilizza un provino detto chevron bend, che ha un intaglio a V, perpendicolare all'asse della carota.

(c) Sono previsti due livelli di prova. La prova di livello I richiede soltanto la registrazione del carico massimo. La prova di livello II richiede misure continue del carico e degli spostamenti.

Descrizione del provino

2. La geometria del provino chevron bend (CB) è illustrata in Fig. 3. L'intaglio a V induce la propagazione della fessura ad iniziare dall'apice della V e a proseguire trasversalmente fino all'asse del provino, in maniera stabile, fino al punto in cui viene calcolata la tenacità a frattura. Le dimensioni del provino devono essere quelle indicate nella Tabella II.



LEGENDA	
D	diametro del provino "chevron bend"
S	distanza tra i punti di appoggio, 3.33 D
θ	angolo dello chevron, 90°
a_0	distanza dell'apice dello chevron dalla superficie del provino, 0.15 D
a	lunghezza della fessura
t	lunghezza dell'intaglio
h	profondità di incisione nei fianchi dell'intaglio
L	lunghezza del provino
A	proiezione della superficie della sezione resistente
F	carico sul provino
LPD	abbassamento del punto di applicazione del carico rispetto ai punti di appoggio
CMOD	apertura relativa dei coltelli

Fig. 3 - Il provino *chevron bend* del Metodo 1 con dispositivo raccomandato di prova a flessione.

TABELLA II - Dimensioni del provino per il Metodo 1.

Parametri geometrici	Valore	Tolleranze
Diametri del provino	D	>10 x dimens. grani
Lunghezza del provino, L	4D	>3,5D
Luce del supporto, S	3,33D	±0,02D
Angolo sotteso della V, q	90,0°	±1,0°
Posizione apice della V, A_0	0,15D	±0,10D
Larghezza dell'intaglio, t	≤0,03D o 1 mm*	

* Scegliere il maggiore.

Attrezzatura di prova

Attrezzatura per la preparazione del provino

3. Per effettuare l'intaglio voluto si fa uso di una sega circolare diamantata. L'intaglio deve avere contorni perfettamente rettilinee, perciò la direzione di taglio della sega dovrà essere lineare. Il provino deve essere fissato mediante uno speciale dispositivo prima dell'esecuzione dell'intaglio (Fig. 4). In questo modo, si facilita l'adeguamento dell'angolo della V alle tolleranze date.

Apparecchiatura di prova e dispositivi di applicazione del carico

4. (a) La macchina di prova deve avere capacità sufficiente per fornire il carico di picco richiesto e deve poter applicare il carico secondo incrementi che rispettino i requisiti di cui al paragrafo 11 successivo. Dovrà essere tarata per intervalli di tempo adeguati e corrispondere alle normative nazionali in vigore, come indicato, ad esempio, nei Metodi ASTM E4, Verifiche delle macchine di prova - o nelle Norme inglesi 1610, nelle norme di Grado A o nelle norme tedesche DIN 51 220, DIN 51 223, Classe I e DIN 51 300.

(b) La prova di livello I richiede soltanto la registrazione del carico massimo raggiunto. Occorre perciò un'attrezzatura di prova che permetta di controllare l'applicazione del carico. L'apparecchiatura può essere trasportabile [42].

(c) La prova di livello II richiede una misura continua del carico e degli spostamenti oltre a quella del carico massimo. Occorre un'attrezzatura che consenta il controllo della velocità dello spostamento[1].

(d) La prova a flessione richiede l'applicazione di una forza di compressione sul provino. L'applicazione dovrà effettuarsi tramite un dispositivo adeguato che renda minimi gli effetti dell'attrito. Si consiglia uno schema del tipo di quello indicato in Fig. 3, in cui i rulli di supporto possono ruotare verso l'esterno, continuando a mantenere il contatto col provino durante la prova. I rulli sono inizialmente a contatto con i fermi che delimitano la luce del supporto e sono mantenuti in posizione da molle[2].

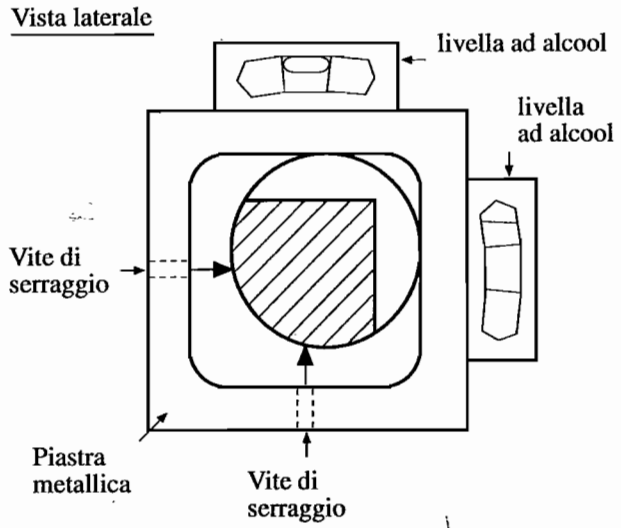


Fig. 4 - Esempio di dispositivo per la realizzazione dell'intaglio per provino *chevron bend*.

Dispositivi di allineamento del provino

5. (a) Per questo metodo servono speciali dispositivi atti a facilitare il corretto posizionamento del provino nel dispositivo di carico.

(b) La Fig. 5 illustra un dispositivo che consente diversi tipi di allineamento. Esso può, in primo luogo, essere usato per centrare i rulli di supporto rispetto al rullo superiore (di carico) e per dare una lunghezza esatta della luce del supporto. In secondo luogo, la faccia piana posteriore garantisce la perpendicolarità dell'asse del provino rispetto ai rulli. In terzo luogo, il perno di guida garantisce un centraggio preciso dell'intaglio rispetto ai rulli di supporto. Il dispositivo di allineamento dovrà poter essere rimosso una volta che il provino sia stato posizionato.

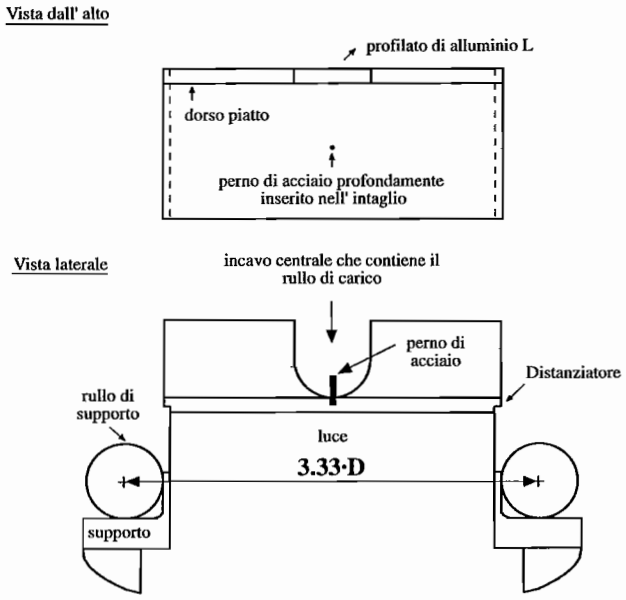


Fig. 5 - Esempio di dispositivo per l'allineamento del provino.

(c) Poichè l'allestimento della prova di livello II risulta complicato per poter ottenere le tre condizioni sopra riportate (vedi punto 10 successivo) e ne limita l'uso ad un solo valore del diametro, è preferibile un allestimento più semplice. L'uso di un'asta o di una barra con quattro serie di rientranze di diversa spaziatura, tagliate a 90°, ad esempio, consente di centrare i rulli di supporto rispetto al rullo di carico e di avere una luce tra i supporti che non superi i limiti di tolleranza, per un'intera gamma di diametri di provini. Anche la centratura dell'intaglio dei provini e la perpendicolarità degli assi si ottiene più facilmente utilizzando qualche altro dispositivo di allineamento.

(d) Un altro dispositivo di allineamento è illustrato in Fig. 6. Presenta una livella ad alcool il cui piano di riferimento è il basamento della macchina di

Sezione mediana con lama di allineamento

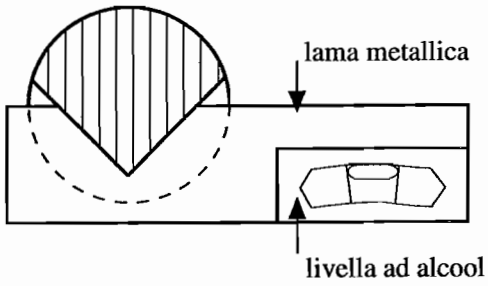


Fig. 6 - Proposta di dispositivo per l'allineamento del provino.

prova. È possibile controllare la direzione di applicazione del carico inserendo la livella nell'intaglio. Se la direzione non è soddisfacente, il provino può essere facilmente ruotato nella posizione corretta, anche con il piccolo carico aggiuntivo cui si fa riferimento al punto seguente.

Strumentazione per la misurazione degli spostamenti

6. (a) Se si eseguono misure di spostamento, il sistema deve essere munito di trasduttori elettrici. La principale variabile di spostamento da misurarsi sul provino è lo spostamento del punto di carico (LPD, Fig. 3). L'apertura dei bordi alla bocca dell'intaglio (CMOD) dovrà essere vista come un complemento del LPD. Il CMOD può anche, in via eccezionale, essere l'unica misura di spostamento che si effettua nel corso della prova[3].

(b) Per misurare lo LPD[4] si può utilizzare un alloggiamento a sella, come indicato in Fig. 7. In questo modo è possibile misurare lo spostamento relativo di due punti sulla superficie dell'intaglio rispetto ai punti della sella direttamente al di sopra dei punti di contatto tra il provino e i rulli di supporto. A tale

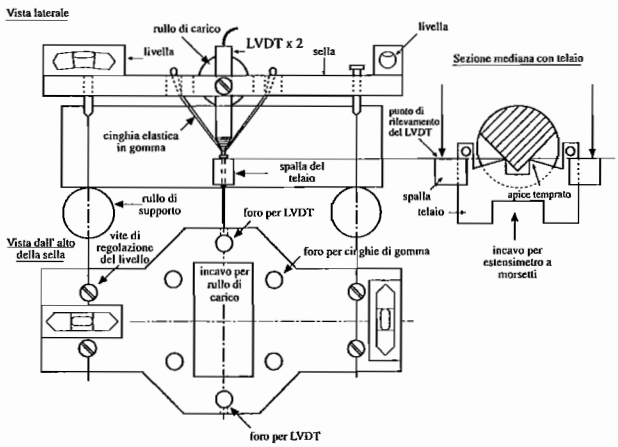


Fig. 7 - L'allestimento della sella per il montaggio dei calibri LVDT per le misure di LPD.

scopo, si utilizzano due trasduttori a carico induttivo (LVDT), i cui segnali vengono sommati, per ridurre al minimo l'influenza della rotazione e della torsione del provino[5]. La linearità dei trasduttori dovrà essere migliore dello 0.5% e si consiglia l'uso di un dispositivo di misura con attuatore con armatura di ritorno a molla che scorre su cuscinetti lineari.

(c) Il telaio illustrato in Fig. 7 è il più indicato per rocce dure. Per rocce tenere può essere più vantaggioso usare un angolo al vertice meno acuto nei punti di contatto, in modo da fornire un contatto stabile, che non provochi incisioni nel provino. La distanza tra i vertici non dovrebbe superare 0.15 D. Il telaio deve essere sufficientemente robusto e rigido in modo da evitare che scivoli nell'apertura della fessura.

(d) Per misurare il CMOD, si usa un estensimetro, vuoi del tipo detto comunemente a morsetti, vuoi del tipo con trasduttore LVDT[6]. In entrambi i casi, dovrà essere possibile misurare lo spostamento relativo di due posizioni dell'estensimetro, individuate con precisione, da un lato e dall'altro dell'apertura dell'intaglio. Per poter sistemare l'estensimetro a morsetti, il provino sarà munito di una coppia di coltelli di precisione che reggono i bracci dell'estensimetro e che servano da punti di riferimento dello spostamento[7]. La linearità dell'estensimetro a morsetti dovrà essere migliore dello 0.5%.

(e) Se si eseguono misure di spostamento, si consiglia di preparare provini artificiali in lega di alluminio o in altro materiale con proprietà simili a quelle della roccia da sottoporre a prova. Questi provini servono per una procedura semplificata di taratura (vedi punto 9 seguente).

Registrazione

7. Occorre un sistema di registrazione analogico o digitale tale da consentire di ottenere il livello di precisione specificato per i sistemi di carico e di spostamento. Si consiglia di tracciare direttamente le curve di carico in funzione del LPD su un diagramma cartesiano ad assi X-Y durante la prova di Livello II. Sono validi anche modi diversi di visualizzazione, ad esempio schermi CRT, purchè si possa eseguire la correzione per la non-linearità come descritto al punto 15.

Procedimento di prova

Scelta e preparazione del provino

8. (a) Si definisce campione di prova una serie di spezzoni di carota (provini) aventi lo stesso diametro, caratteristiche strutturali simili e medesimo orientamento rispetto all'asse della carota (vedi punto 8b seguente) per i quali si voglia determinare la tenacità a frattura. Ciascun gruppo di provini con direzione del carico identica (vedi punto 8j seguente) costituisce un sotto-campione e va trattato separatamente.

(b) Le carote devono essere contrassegnate da un riferimento, scritto con inchiostro indelebile, prima della preparazione del campione, in modo da conoscere gli assi del provino e le giaciture relative alle caratteristiche strutturali del materiale, alle facce del blocco campione, ai fori di perforazione, ecc. I campioni devono essere immagazzinati in modo da conservarne il contenuto di acqua naturale, per quanto possibile, fino al momento della preparazione del provino.

(c) Deve essere misurato e riportato il contenuto di umidità di ciascun campione[8].

(d) Per ciascun campione di prova deve essere effettuata almeno una sezione sottile per poterne definire le caratteristiche mineralogiche, la granulometria, il tipo di superficie, il volume e la porosità[9]. La precisione per queste determinazioni dovrà essere migliore del 3% (±) per le analisi modali, del 5% (±) per le misure granulometriche e dello 0.2% (±) per la porosità. Se i provini presentano anisotropia o si rivelano anisotropi a successive rilevazioni di prova[10], si dovranno allora ricavare tre sezioni sottili reciprocamente perpendicolari, in direzione parallela e normale all'anisotropia e quindi analizzarle.

(e) Deve essere misurata la resistenza a trazione diretta σ_t del materiale roccioso[11].

(f) Il diametro D della carota deve essere in rapporto di almeno 10:1 rispetto alle dimensioni del grano più grande della roccia. Per la preparazione dei provini dovrà essere scelta una porzione liscia di carota, priva di irregolarità sporgenti e ad asse rettilineo, con deviazione massima di 0.5 mm. Il diametro deve essere misurato con l'approssimazione di 0.1 mm, facendo la media di due diametri ad angolo retto in tre diverse posizioni poste ad uguale distanza lungo il provino prescelto.

(g) La lunghezza L del provino deve essere di almeno 4D. Non si richiedono particolari accorgimenti per il parallelismo e la planarità delle facce estreme. Tuttavia, il contorno laterale di contatto coi rulli di supporto dovrà essere maggiore di 3.5D e le lunghezze dovranno superare la metà di 3.33D su entrambi i lati dell'intaglio.

(h) Carote di lunghezza idonea saranno intagliate con una sega circolare diamantata raffreddata ad acqua.

(i) Si dovrà misurare la larghezza t dell'intaglio, che non dovrà superare 0.03D oppure 1 mm (con preferenza per la maggiore delle due misure). L'intaglio dovrà essere equidistante dalle facce estreme. Sarà eseguito mediante due tagli perpendicolari all'asse della carota. Il telaio di fissaggio per l'angolo

d'intaglio illustrato in Fig. 4 è dapprima avvitato al provino nella direzione voluta in base ai contrassegni fatti in precedenza. Le livelle sul telaio consentono la rotazione del provino nelle guide fino alla posizione corretta per il primo taglio. La profondità del taglio dovrà essere di 0.25D. Dopo il primo taglio, il provino viene ruotato di 90° con l'aiuto del telaio di fissaggio e nuovamente tagliato alla stessa profondità del primo taglio.

(j) Occorre registrare l'angolo della bisettrice dell'intaglio a V rispetto al riferimento sulla carota, in modo da conoscere il piano della frattura e la sua direzione di propagazione relativa alla struttura del materiale, alle facce del blocco campione, ecc. Questo angolo coincide con la direzione voluta di carico, che deve essere parallela o perpendicolare a tutti gli elementi di anisotropia.

(k) L'angolo θ interno della V deve essere di 90.0° ± 1.0°. La posizione del suo vertice, a_0, deve essere misurata e deve rimanere entro 0.10D del suo valore nominale 0.15D. Un controllo preliminare, prima della prova, potrà evitare successive prove non necessarie[12].

(l) I coltelli abbracceranno la luce dell'intaglio e dovranno essere centrati sia rispetto al piano dell'intaglio sia rispetto al vertice della V. Per far ciò, occorre inserire dapprima una lama con una guida nell'intaglio a V e poi far scorrere un blocco spaziatore lungo la guida, con i coltelli ben aderenti, fino a far arrivare i coltelli a contatto con la superficie del provino (Fig. 8). I coltelli devono essere fissati al provino con un adesivo di buona resistenza e in grado di produrre una giunzione sottile[13]. Infine, premendo i coltelli verso il basso, si potrà asportare il blocco spaziatore senza danneggiare il giunto adesivo.

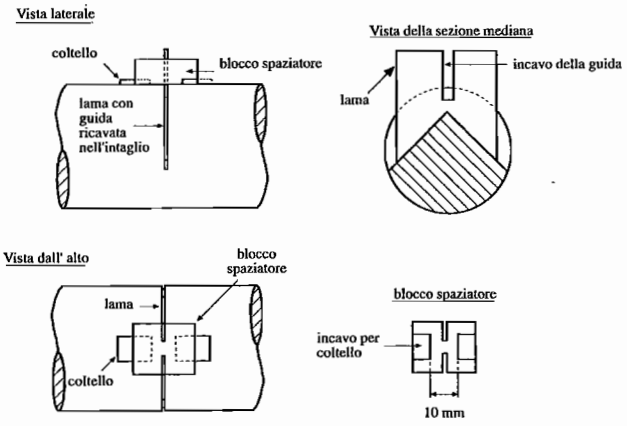


Fig. 8 - Esempio di montaggio del coltello sul provino *chevron bend*. La spaziatura consigliata per coltello è di 10 mm.

Taratura

9. (a) È necessario verificare la taratura della cella di carico. La prova di livello I non richiede ulteriori tarature.

(b) Prima di ciascuna serie di prove, i dispositivi di allineamento devono essere posti rasenti la base dell'attrezzatura di prova e orientati nella stessa direzione che avranno in prova (vedi 10b), per controllare le letture delle livelle. Le livelle saranno regolate per dare lettura zero in queste posizioni.

(c) Per le prove di Livello II, si deve controllare la linearità di tutti gli strumenti di misura degli spostamenti e preferibilmente eseguire una taratura prima di ciascuna serie di prove. Se si usa un provino artificiale di proprietà note, allora si potrà facilmente eseguire giornalmente la taratura completa degli strumenti, compreso il registratore X-Y, confrontando la pendenza della curva carico-LPD risultante col valore di riferimento ottenuto dallo strumento appena tarato. La taratura sarà ritenuta accettabile quando la differenza di pendenza tra le due curve non superi l'1.0%.

(d) Gli strumenti di misura degli spostamenti dovranno dare una risposta lineare, ma i valori misurati non necessitano di una taratura precisa in termini di spostamento assoluto (vedi 15e). Se però gli strumenti sono tarati in modo assoluto, si potranno ottenere altri risultati, quali il modulo di Young, la resistenza alla propagazione della fessura in termini di energia di frattura restituita ed il lavoro specifico della frattura (vedi 16).

Allestimento della prova

10. (a) Il dispositivo per l'applicazione del carico deve essere installato con precisione sull'attrezzatura di prova. Si dovrà misurare la distanza tra i centri dei due rulli di supporto, la luce S del supporto, che dovrà essere di 3.33D ± 0.02D. (vedi anche 5b). L'impostazione della posizione del pistone o della testa a croce ed i limiti di posizione devono essere scelti in modo tale da non danneggiare gli strumenti, i dispositivi di carico e gli estensimetri di misurazione degli spostamenti nel caso in cui il provino abbia a rompersi prematuramente in modo improvviso o imprevisto.

(b) Il provino, compresa eventualmente l'attrezzatura per le misure di LPD (vedi 10d), deve essere posto nella macchina di prova in modo che il sistema di trasferimento del carico sia allineato correttamente. Si dovranno utilizzare dispositivi di allineamento (vedi 5) per trovare la posizione corretta e si dovrà usare un piccolo carico aggiuntivo per bloccare il provino.

(c) Per la prova di Livello II, gli estensimetri per la misura degli spostamenti dovranno essere mon-

tati sul provino, in modo che i movimenti o gli spostamenti del provino stesso non interferiscano con le operazioni di misura. Gli estensimetri devono essere centrati. La procedura è semplice per un estensimetro a morsetti, se i coltelli sono stati montati correttamente. A questo punto si può applicare il carico e la prova può procedere fino alla conclusione.

(d) Al provino va attaccata la sella dell'attrezzatura per la misurazione LPD di Fig. 7 prima di piazzarlo nella macchina di prova. La regolazione finale della sella avverrà quando il provino sia stato fissato in posizione e il telaio installato. Sia la base che il telaio devono essere paralleli alla base della macchina di prova e centrati rispetto all'asse del provino e al rullo di carico. La regolazione dell'inclinazione della base si effettua tramite le viti e la lettura delle livelle. La regolazione del centraggio della base e del telaio si fa a mano. La tensione delle fasce elastiche in gomma dovrà essere sufficiente a mantenere il telaio a contatto con l'estremità inferiore dell'intaglio quando siano stati montati i trasduttori LVDT. Il telaio non deve essere incastrato nell'intaglio. I trasduttori LVDT devono di preferenza essere regolati con la maggior aderenza possibile ai rispettivi valori di zero elettrico.

Prove

11. (a) Il Livello I richiede che la prova sia effettuata in controllo di carico. Il carico deve essere registrato e la prova deve proseguire fino a rottura del provino. La velocità media di crescita del fattore di intensificazione delle tensioni durante la prova, non dovrà essere inferiore a 0.25 MPa $\sqrt{(m)}$/s o tale che la rottura avvenga entro 10 secondi dall'applicazione iniziale del carico.

(b) Il Livello II richiede che la prova sia condotta in controllo di spostamento e si devono perciò registrare sia i carichi che gli spostamenti[13]. Si devono eseguire almeno quattro cicli di scarico-carico durante la prova (Fig. 9a). Lo scarico avverrà mediante inversione istantanea della velocità di controllo dello spostamento[14]. Dovrà essere eseguito almeno uno di questi cicli prima del carico massimo ed almeno uno dopo. I cicli dovranno essere distribuiti uniformemente lungo il diagramma carico-LPD. Lo scarico deve terminare e il nuovo carico iniziare quando il carico arriva a valori compresi tra il 10% e il 20% del carico massimo.

(c) Durante la fase di carico della prova, la velocità di spostamento, (LPD o CMOD), dovrà essere sufficiente a rendere la velocità di rottura, à, maggiore di 1mm/s nel punto di valutazione. La formula per il calcolo è data al punto 12 seguente.

(d) Nella prova di Livello I, il carico massimo sul provino dovrà essere registrato con approssimazione non minore dell'1.0%.

(e) Nella prova di Livello II, la pendenza iniziale della tangente del diagramma carico-LPD deve essere compresa tra 0.7 e 1.5, per consentire una valutazione precisa delle pendenze. Si consiglia un valore vicino al limite superiore. Il valore della pendenza, s, è definito al punto 13 seguente. Si devono scegliere le impostazioni di taratura e di registrazione in modo tale che il carico massimo sia determinato con approssimazione dell'1.0%. Lo spostamento relativo deve anch'esso essere determinato con approssimazione dell'1.0%.

(f) Nella prova di Livello II, la registrazione dei dati deve proseguire oltre il carico massimo fino ad un punto in cui lo spostamento sia almeno una volta e mezzo lo spostamento in corrispondenza del carico massimo[15].

(g) Le due metà residue del provino dopo la prova a flessione possono essere usate per preparare e sottoporre a prova due provini short rod in base ai requisiti indicati per il Metodo 2. Per far questo, i piani della fessura nei provini short rod devono essere perpendicolari tra loro ed uno di questi piani deve giacere nel piano di simmetria del provino sottoposto

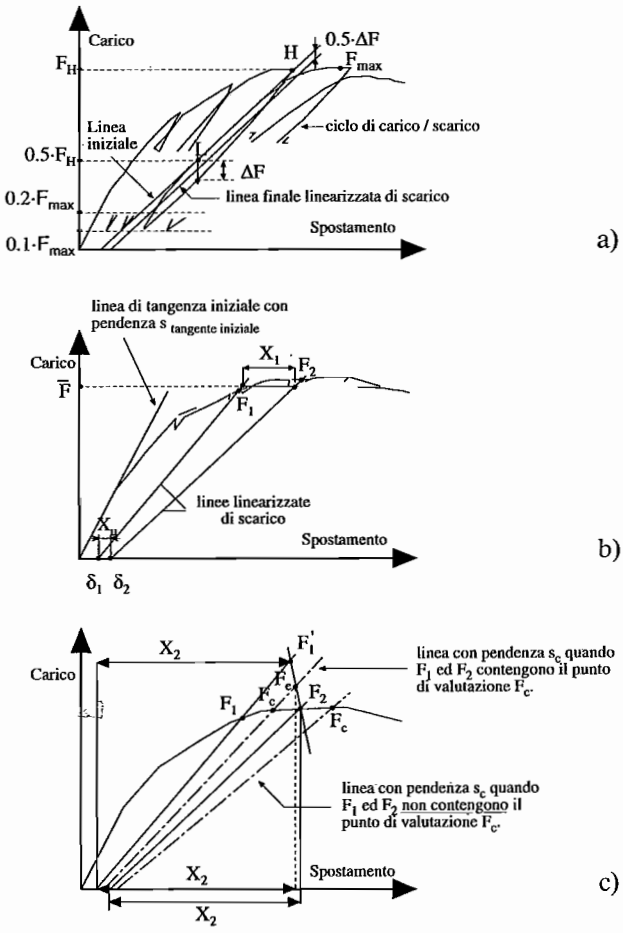


Fig. 9 - I principi di correzione di non-linearità di K_{CB} nel diagramma carico/LPD (Metodo 1) o di K_{SR} nel diagramma carico/CMOD (Metodo 2). (a) Costruzione della linea di scarico linearizzata; (b) derivazione del grado p di non linearità; (c) derivazione del carico nel punto F_c di valutazione.

a flessione, in modo da ottenere una misura dell'anisotropia di resistenza.

(h) Il risultato non sarà ritenuto valido e si dovrà eseguire una nuova prova se la fessura si allontana dal piano di simmetria definito dall'intaglio per più di 0.05D entro 0.3D dall'apice dell'intaglio a V[16].

Valutazione dei parametri di maggior interesse

Calcolo della velocità di applicazione del carico

12. La velocità di spostamento controllato, cui ci si riferisce al punto 11 precedente, dovrà superare il seguente valore limite:

$$\dot{LPD} \text{ o } \dot{CMOD} > 0.006\ K_{CB}/(E\sqrt{D})m/s \quad (1)$$

Qui K_{CB} è la tenacità a frattura definita successivamente nell'equazione (3) ed E è il modulo di Young del materiale.

Calcolo dei valori della pendenza

13. La pendenza retta è definita dalla tangente dell'angolo ξ tra la retta e l'asse LPD.

$$s = \text{tang } \xi \quad (2)$$

La pendenza iniziale della tangente del diagramma carico-LPD è la pendenza di una retta che passa per l'origine con carico zero e tangente alla curva (Fig. 9b).

Calcolo della tenacità a frattura

14. Per la prova di livello I, la tenacità a frattura del provino sarà calcolata mediante la formula seguente:

$$K_{CB} = A_{min}F_{max}/D^{1.5} \quad (3)$$

dove

$$A_{min} = [1.835 + 7.15a_0/D + 9.85\ (a_0/D)^2]S/D. \quad (4)$$

Esprimendo il carico di rottura, F_{max} in kN e il diametro D del provino in cm, la tenacità a frattura sarà espressa in $MPa\sqrt{(m)}$ oppure in $MN/m^{1.5}$. Si raccomanda di utilizzare le unità di misura SI. Il fattore A_{min} è adimensionale. Se il valore dell'angolo d'intaglio è compreso nei limiti di tolleranza, la variazione del valore K_{CB} calcolato sarà minore dell'1%.

Correzione della tenacità a frattura in caso di non-linearità

15. (a) Per la prova di livello II, la valutazione deve iniziare dal calcolo della tenacità a frattura come indicato al punto 14 precedente. Si dovrà quindi calcolare un fattore di correzione di non-linearità nel diagramma carico-LPD secondo i metodi grafici di costruzione illustrati nelle Fig. 9a-c.

(b) Si tracci una retta per ciascun ciclo di scarico-ricarico, nel senso specificato in seguito. Ciascuna retta è definita da due punti, H ed L. Il punto superiore (H) è quello da cui lo LPD inizia a diminuire sul lato di scarico del ciclo e il carico corrispondente è indicato con F_H (Fig. 9a). Il punto inferiore (L) giace sulla parte di ricarico del ciclo ed è definito dal livello di carico:

$$F_L = 0.5\ F_H \quad (5)$$

Si tracci poi una retta iniziale passante per H ed L.

(c) L'entità dell'isteresi centrata intorno ad F_L nel ciclo di scarico-ricarico è definita dalla distanza verticale ΔF (Fig 9a). La retta finale di ogni ciclo sarà allora ottenuta traslando verticalmente la retta iniziale verso il basso di una quantità $0.5\Delta F$. Essa dovrà intersecare l'asse del LPD.

(d) Si calcoli la pendenza di ciascuna retta finale. Si trovino le due rette i cui valori di pendenza si avvicinano maggiormente al valore:

$$s_c = [1.05 - 2.15a_0/D + 4.21(a_0/D)^2]\ s_{\text{tangente iniziale}} \quad (6)$$

Il punto corrispondente alla pendenza s_c di scarico sulla curva carico-LPD è quello in cui deve essere valutata la tenacità a frattura[15-17].

(e) Mediante queste due rette linearizzate di scarico prescelte si definiscano gli spostamenti residui $\delta 1$ e $\delta 2$ nella condizione di scarico e la distanza sull'orizzontale (Fig. 9b):

$$x_u = -\delta_2 - \delta_1 \quad (7)$$

Si tracci, regolarizzandola, la curva carico-LPD tra le suddette rette di scarico, ignorando gli sbalzi di scarico-ricarico. Si individuino poi i punti di intersezione tra le rette di scarico e la curva regolarizzata. Detti F_1 ed F_2 i relativi carichi, si trovi poi il carico medio:

$$\bar{F} = (F_1 + F_2)/2 \quad (8)$$

Se le rette di scarico contengono F_{max}, allora il maggiore tra F_1 ed F_2 dovrà essere sostituito da F_{max}. Si tracci poi una retta di carico orizzontale a questo livello (Fig. 9b). Questa definisce gli spostamenti di due stati di ugual carico lungo le rette di scarico linearizzate. La differenza tra questi spostamenti si indica con xl. Allora il rapporto di spostamento

$$p = x_u/x\ell \quad (9)$$

definisce il grado di «non-linearità», p[18]. Grandi variazioni di p tra i provini in un campione di prova o un valore di p negativo indicano probabilmente errori inaccettabili nella procedura di valutazione[19].

(f) Se le due rette di scarico prescelte abbracciano il punto di valutazione e se $\bar{F}$ non è minore di 0.98 F_{max}, allora il valore della tenacità a frattura corretto per la non-linearità sarà ottenuto dalla

$$K^c_{CB} = \sqrt{(1+p)\,(1-p)}\,K_{CB} \qquad (10)$$

L'apice 'c' indica un valore corretto della tenacità a frattura[20].

(g) Se le due linee di scarico prescelte non contengono il punto di valutazione o se $\bar{F}$ è minore di 0.98 F_{max}, allora, mediante interpolazione o estrapolazione lineare, si tracci la linea di scarico di pendenza s_c. La procedura si baserà su una quantità costante di spostamento recuperato (LPD), cioè sulla distanza orizzontale x_2 (Fig. 9c).

(h) Dapprima, lungo la linea di scarico passante per F_1, si trovi il punto F'_1 che presenta una quantità di recupero di spostamento allo scarico uguale a quella allo scarico da F_2 lungo la seconda linea di scarico, cioè la quantità x_2. Si tracci poi una retta passante per F'_1 ed F_2 e si trovi il punto su questa retta il cui carico sia

$$F_e = s_c x_2 \qquad (11)$$

Si tracci una retta da questo punto fino ad uno spostamento recuperato dopo lo scarico x_2. La sua pendenza sarà per definizione s_c. Infine, si trovi il carico nel punto di valutazione F_c come intersezione tra questa linea e la curva regolarizzata carico-LPD.

(i) Il valore corretto per la non-linearità della tenacità a frattura sarà calcolato come:

$$K^c_{CB} = \frac{F_c}{F_{max}} \cdot K_{CB} \cdot \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \qquad (12)$$

Questa correzione di K_{CB} non richiede che il materiale sia isotropo.

Calcolo del modulo di Young e dell'Energia di Frattura

16. (a) Se è stata eseguita una taratura assoluta degli strumenti per la misurazione degli spostamenti, allora si possono calcolare altri parametri del materiale seguendo le procedure di seguito indicate.

(b) Modulo di Young. Se è nota in termini assoluti la pendenza della tangente iniziale, allora è possibile calcolare il modulo a flessione di Young, E, del materiale costitutivo del provino[21]. Si usa l'equazione seguente:

$$E = g_0\, s_{\text{tangente iniziale}}/D \qquad (13)$$

dove

$$g_0 = 20.8 + 19.4a_0/D + 142.3\,(a_0/D)^2. \qquad (14)$$

Se $s_{\text{tangente iniziale}}$ è espressa in kN/mm e D in mm, il valore risultante del modulo di Young sarà in GPa, che è l'unità che si consiglia di usare. Una variazione nella luce del supporto entro i limiti di tolleranza provocherà una variazione inferiore al 2% nel valore calcolato di E.

(c) Se poi è noto anche il coefficiente di Poisson, ν, del materiale del provino, si può trasformare il valore della tenacità a frattura, espresso in termini di intensificazione degli sforzi, MPa$\sqrt{(m)}$, in resistenza alla propagazione della fessura, espressa in termini di energia di frattura:

$$G^c_{CB} = \frac{(1-\nu^2)\,(K^c_{CB})^2}{E} \qquad (15)$$

L'unità di misura che si consiglia per G^c_{CB} è J/m^2. La conoscenza del valore di ν non è essenziale. Dato che ν è minore di 0.3 per la maggior parte delle rocce che interessano, lo si può ipotizzare con sufficiente precisione oppure assumerlo uguale a zero, se lo si dichiara espressamente[22].

(d) Infine, se si segue la registrazione della curva carico-LPD fino a che il provino non abbia praticamente più alcuna resistenza residua, allora il lavoro totale W^f_{CB} di frattura, che si richiede per separare in due metà il provino intagliato[3], si può calcolare con la

$$W^f_{CB} = \int_0^\infty F\, d(LPD) \qquad (16)$$

Riferendo W^f_{CB} alla superficie A della parte intatta del provino intagliato[23], si ottiene l'energia di frattura:

$$\bar{R}_{CB} = \frac{W^f_{CB}}{A} \qquad (17)$$

La dimensione di $\bar{R}_{CB}$ è J/m^2 e il suo valore è correlato strettamente con quello di G^c_{CB}.

Osservazioni

Dimensioni e tipo del provino

17. (a) Nelle misure di tenacità a frattura a deformazione piana su materiali metallici si richiede che

le prove siano completate e che i risultati siano analizzati prima di poter dichiarare la validità degli stessi[25-26]. Il metodo qui presentato per le rocce evita in parte questo problema, proponendo una correzione per il comportamento non-lineare del materiale, che si basa su misure di spostamento. L'esperienza fatta indica che i valori corretti della tenacità a frattura possono essere ragionevolmente indipendenti dalle dimensioni del provino, ma che valori non corretti tendono a diminuire in modo significativo con la diminuzione delle dimensioni del provino. Per non incorrere in questa limitazione, si devono probabilmente usare carote con diametro decisamente superiore a 50 mm.

(b) Dato che non viene assegnato alcun criterio preciso di validità in rapporto alle dimensioni del provino, non esiste alcuna garanzia che un valore di tenacità a frattura determinato in base a questo metodo rappresenti con precisione una proprietà del materiale.

(c) Si può ritenere tuttavia che il valore K^c_{CB} di tenacità a frattura, calcolato con la prova di livello II, costituisca una rappresentazione valida di una proprietà del materiale se $p < 0.05$ (vedere il punto 15). In questo caso, il valore K_{CB} di livello I (vedere il punto 14) è inferiore a K^c_{CB} per meno del 5% e la prova di livello I offre una stima precisa.

(d) Un'indicazione più probante che K^c_{CB} sia una rappresentazione valida di una proprietà del materiale la si può ottenere da prove effettuate su almeno due campioni di dimensioni diverse. Il campione di dimensioni maggiori deve avere $p < 0.05$ ed il rapporto tra i diametri deve essere superiore a 2. L'indicazione voluta si ottiene allora se K^c_{CB} non mostra alcuna dipendenza dalle dimensioni dei provini.

(e) Non è ben noto, al momento, se valori corretti per la non-linearità della tenacità a frattura di rocce in provini chevron sottoposti a flessione si accordino bene con valori della tenacità a frattura ricavati da altri provini in cui lo stato di sollecitazione nella parte intatta davanti alla fessura è dovuto principalmente a flessione. Anche se i valori di tenacità a frattura ricavati da questo tipo di provini fossero indipendenti dalle dimensioni, non necessariamente si accorderebbero con valori ricavati da provini in cui la parte intatta sia sottoposta principalmente a trazione.

Uso dei valori di tenacità a frattura

18. (a) A proposito dell'uso previsto, i valori corretti della tenacità a frattura per la non-linearità ottenuti con questo metodo si considerano cautelativi per le analisi ingegneristiche, a patto che i difetti analizzati siano molto più piccoli di tutte le altre dimensioni strutturali e siano molto maggiori della microstruttura caratteristica del materiale. In caso contrario, questi valori devono essere usati esclusivamente per verificare la resistenza a frattura dei diversi materiali in termini relativi.

Relazione conclusiva e presentazione dei risultati

19. Le relazioni dei risultati devono contenere i seguenti dati:

Dati di carattere generale

20. Particolari delle attrezzature di prova e delle procedure utilizzate. Ci si può riferire al metodo qui presentato, descrivendo e motivando eventuali differenze dalle procedure raccomandate.

Dati relativi al campione di prova

21. Per ciascun campione di prova nel suo insieme, occorre indicare quanto segue:

(a) Il numero del campione, il luogo del prelievo e il tipo di roccia, la natura e l'orientamento di tutti i piani di anisotropia e di debolezza.

(b) L'asse della carota, con riferimento alla geologia e alla struttura in situ e, nel caso di più provini ricavati dalla stessa carota, la direzione di carico.

(c) Le modalità di conservazione, il contenuto d'acqua e il grado di saturazione al momento della prova.

(d) Una tabella dei dati del provino relativi alla determinazione della tenacità a frattura, compresi i parametri ausiliari (vedere il punto 22).

(e) Per ciascun provino, una tabella riassuntiva del valore medio di tenacità a frattura e la deviazione standard[27].

(f) Le proprietà indice ottenute da altri tipi di prove ed altre grandezze, quali la densità relativa, la granulometria, la porosità e la permeabilità, citando il metodo usato per la determinazione di ciascun valore.

Dati del provino

22. Per ciascun provino del campione i dati riportati devono contenere quanto segue:

(a) Dimensioni del provino: D, S, a_o e θ.

(b) Livello di prova e velocità di carico, cioè $\dot{F}$ o tempo di rottura per il livello I e il $\dot{LPD}$ per il livello II.

(c) Carico massimo F_{max} e, per il livello II, il carico al punto F_c di valutazione, ove possibile.

(d) Valori di tenacità a frattura espressi per tre grandezze significative, cioè K_{CB} per il livello I e K^C_{CB} e per il livello II, compresi due valori significativi di p.

(e) Parametri ausiliari (E, ν, σ_t o il modulo di rottura, G^c_{CB} e $\bar{R}_{CB}$).

Metodo 2: Raccomandazioni per la determinazione della tenacità a frattura utilizzando campioni short rod.

Campo di applicabilità del metodo

1. (a) La prova ha lo scopo di misurare la tenacità a frattura di materiali rocciosi. L'uso principale di questa proprietà è rivolto alla classificazione e alla caratterizzazione del materiale roccioso rispetto alla resistenza alla propagazione della frattura. Serve anche come indice nei processi di abbattimento, quali la frantumazione e lo scavo di gallerie, o nell'analisi della fratturazione idraulica o con esplosivo.

(b) La prova utilizza materiale roccioso sotto forma di spezzoni carotati. L'asse della carota deve essere orientato parallelamente o perpendicolarmente a tutte le fonti di anisotropia, quali i piani di debolezza. Il metodo qui presentato utilizza un provino, detto short rod, che presenta un intaglio a V ricavato lungo l'asse del provino stesso.

(c) La prova ha due livelli. La prova di livello I richiede soltanto la registrazione del carico massimo. La prova di livello II richiede, l'effettuazione di misurazioni continue del carico e degli spostamenti.

Descrizione del provino

2. La geometria del provino short rod (SR) è illustrata in Fig. 10. L'intaglio a V induce la propagazione della fessura ad iniziare dall'apice della V e a proseguire poi lungo l'asse del provino in maniera stabile fino al punto in cui viene calcolata la tenacità a frattura. Le dimensioni del provino devono essere quelle indicate nella Tabella III.

Attrezzatura di prova

Attrezzatura per la preparazione del provino

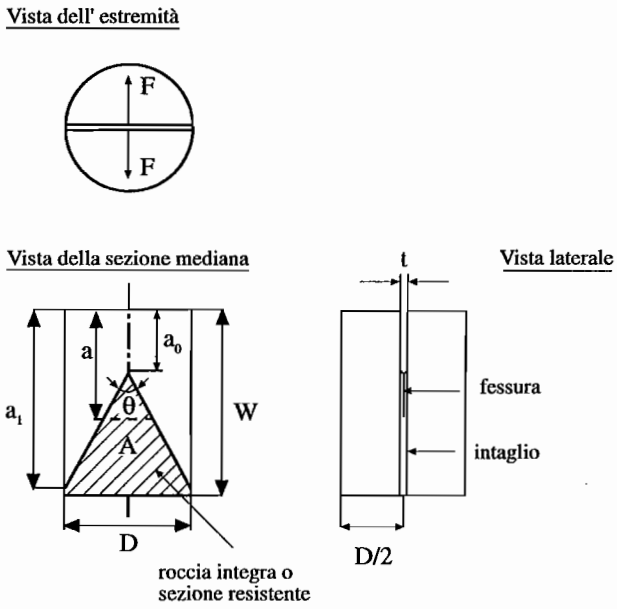
3. Per tagliare i provini nella lunghezza voluta e per ricavare l'intaglio richiesto si usa una sega diamantata. L'intaglio a V deve avere contorni perfettamente rettilinee, perciò la direzione di taglio della sega dovrà essere lineare. Per procedere al taglio, si usa un dispositivo di fissaggio (Fig. 11). In questo modo, si garantisce l'adeguamento dell'angolo della V alle tolleranze date.

Apparecchiatura di prova e dispositivi di applicazione del carico

4. (a) La macchina di prova deve avere capacità sufficiente per fornire il carico di picco richiesto e deve poter applicare il carico secondo incrementi che rispettino i requisiti di cui al paragrafo 11 successivo. Dovrà essere tarata per intervalli di tempo adeguati e corrispondere alle normative nazionali in vigore, come indicato, ad esempio, nei Metodi ASTM E4, Verifiche delle macchine di prova— o nelle Norme inglesi 1610, nelle norme di Grado A o nelle norme tedesche DIN 51 220, DIN 51 223, Classe I e DIN 51 300.

(b) La prova di livello I richiede soltanto la registrazione del carico massimo raggiunto. Occorre perciò un'attrezzatura di prova che permetta di controllare l'applicazione del carico. L'apparecchiatura può essere trasportabile [43].

(c) La prova di livello II richiede una misura continua del carico e degli spostamenti oltre a quella del carico massimo. Occorre un'attrezzatura che consenta il controllo della velocità dello spostamento[28].



LEGENDA	
D	diametro del provino short rod
W	lunghezza del provino, 1.45 D
θ	angolo dello chevron, 54.6°
a	lunghezza della fessura
a_0	distanza dell' apice dello chevron dall' estremità caricata, 0.48 D
a1	profondità massima dei fianchi dello chevron
t	larghezza dell' intaglio
A	area della sez. resistente in proiezione
F	carico sul provino

Fig. 10 - Il provino *short rod* del Metodo 2.

TABELLA III - Dimensioni del provino per il Metodo 2.

Parametri geometrici	Valore	Tolleranze
Diametri del provino	D	>10 x dimens. grani
Lunghezza del provino, W	1,45D	±0,02 D
Angolo sotteso della V, σ	54,6°	±1,0°
Posizione apice della V, a_0	0,48D	±0,02 D
Lunghezza chevron, a_1 - a_0	0,97D	±0,02 D
Larghezza dell'intaglio, t	≤0,03D o 1 mm*	

* Scegliere il maggiore.

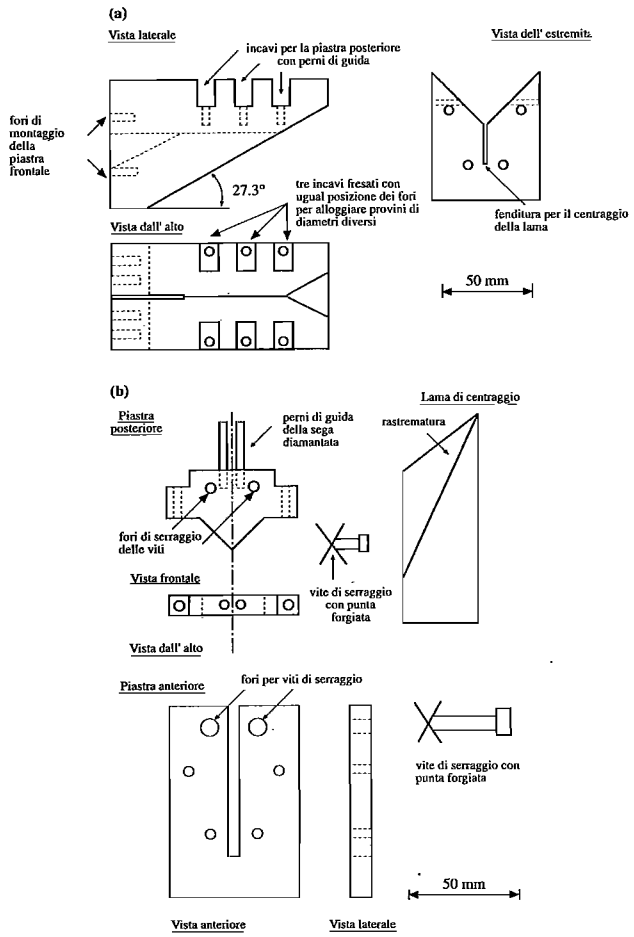


Fig. 11 - Esempio di dispositivo per la realizzazione dell'intaglio del provino *short rod* (a) Blocco a V; (b) piastre d'estremità e lama di centraggio.

(d) La prova short rod richiede che si applichi al provino una forza di trazione. L'applicazione può avvenire mediante un apposito sistema di collegamento che elimini gli sforzi di flessione e torsione nel provino. Si può usare un rullo o una catena di collegamento. Si può usare anche una configurazione come quella illustrata in Fig. 12, in cui flessione e torsione sono ridotte al minimo mediante due cuscinetti sferici rotanti[29]

(e) Il carico viene trasferito dal sistema di collegamento al provino mediante morsetti, come illustrato in Fig. 13. Devono essere d'acciaio, di resistenza sufficiente ad evitare lo snervamento dei denti o dei punti di presa. I denti dei morsetti devono essere rastremati in modo tale che la trasmissione del carico tra i morsetti e il provino sia ben definita rispetto all'apice dell'intaglio a V e giaccia lungo l'asse di carico voluto.

(f) I denti morsetti devono essere posizionati sul provino mediante due piastre terminali in lega di alluminio o altro materiale sufficientemente duro da fornire una linea di contatto ben definita tra i morsetti e le piastre. Nella parte centrale delle piastre terminali, per la prova di livello II, si possono ricavare

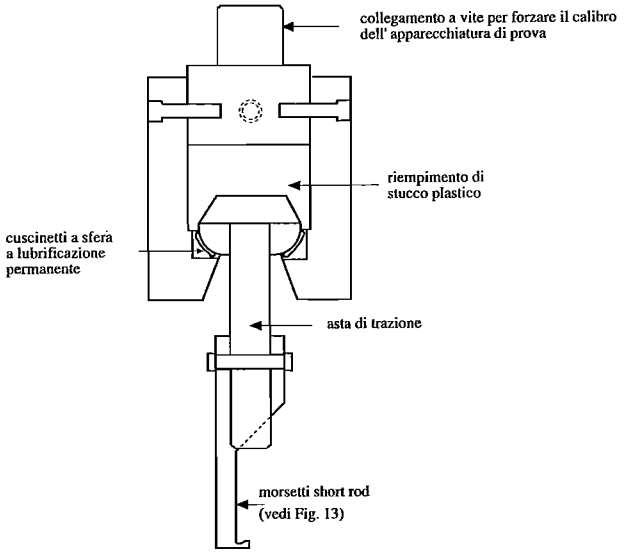


Fig. 12 - Proposta di realizzazione di un sistema di collegamento per il carico di trazione nel provino short-rod.

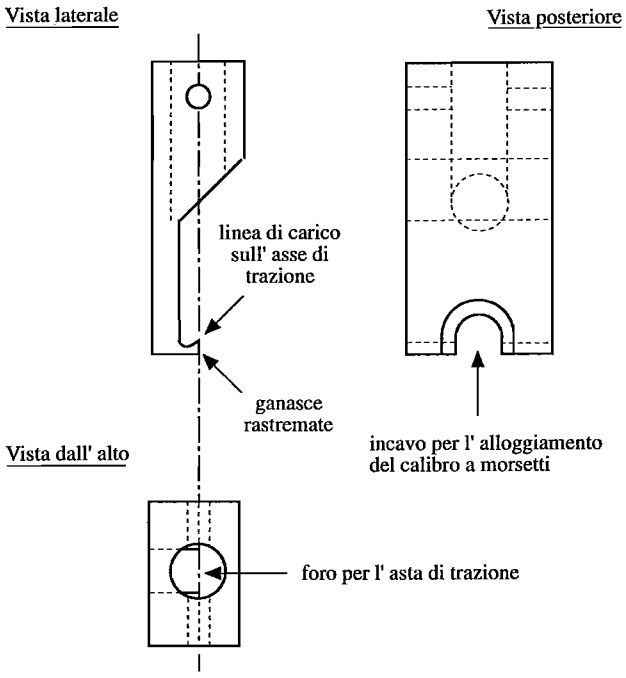


Fig. 13 - Esempio di realizzazione dei morsetti per il provino *short rod*.

rotaie per il contenimento dei coltelli che servono per le misure di spostamento richieste (Fig. 14). Le proprietà elastiche delle piastre devono essere simili a quelle delle rocce da sottoporre a prova per non provocare sforzi elevati all'interfaccia durante la prova. Le piastre vanno cementate alla parte intagliata del provino. Devono essere di grandezza sufficiente per distribuire il carico applicato lungo l'intera apertura dell'intaglio e per evitare la rottura anticipata dell'interfaccia cemento-roccia.

Strumentazione per la misura dello spostamento

5. (a) Se si eseguono misure di spostamento, si devono usare trasduttori elettrici. Lo spostamento da misurarsi è quello dell'apertura della fessura (CMOD, Fig. 14). Si raccomanda l'uso di estensimetri del tipo a graffette o estensimetri a trasduttori LVDT.

(b) L'estensimetro a graffette misura lo spostamento relativo di due posizioni accuratamente individuate dell'estensimetro stesso che abbraccino l'apertura dell'intaglio. Il provino sarà fornito di una coppia di coltelli lavorati con precisione che sostengono i bracci dell'estensimetro e che servono come punti di riferimento degli spostamenti (Fig. 14)[7]. La linearità dell'estensimetro a morsetti dovrà essere superiore allo 0.5%.

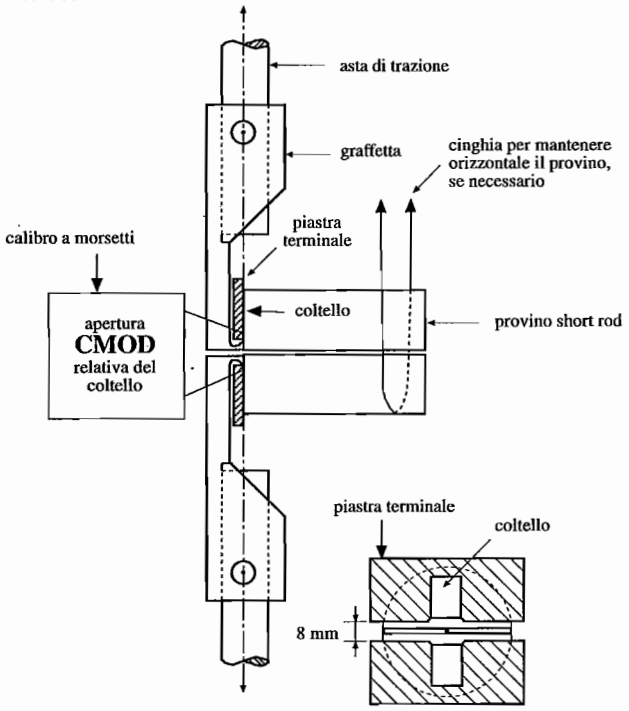


Fig. 14 - Montaggio del provino con calibro a morsetti e coltello tra le graffette.

(c) In Fig. 15 è illustrato un tipo diverso di estensimetro per la misura del CMOD che usa gli LVDT. I due trasduttori LVDT[5] misurano l'allontanamento delle linee di contatto tra le piastre terminali e i denti dei morsetti. I segnali prodotti devono essere sommati per minimizzare l'influenza di rotazione e torsione delle due metà del provino. La linearità degli LVDT dovrà essere superiore allo 0.5% e si raccomanda l'uso di un tipo di trasduttore con attuatore ad armatura di ritorno a molla che scorra su cuscinetti lineari.

(d) Se si eseguono misure di spostamento, è consigliabile allestire provini artificiali in lega di alluminio o in altro materiale con proprietà simili a quelle della roccia da sottoporre a prova. Questi provini servono per una procedura semplice di taratura (vedere il punto 8 seguente).

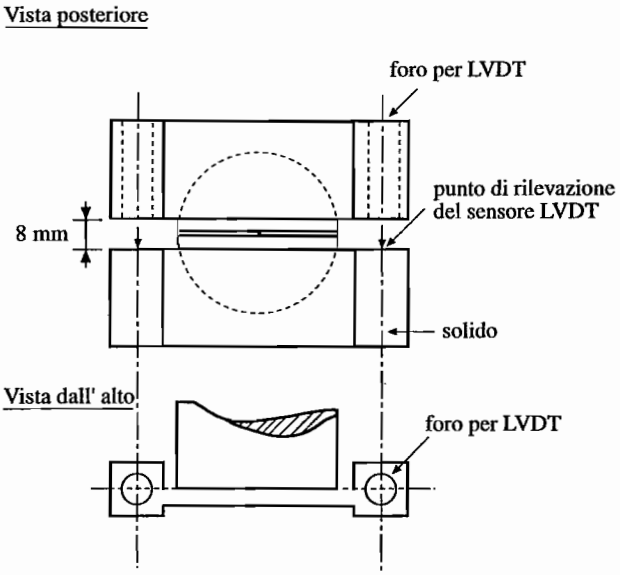


Fig. 15 - Proposta di calibro CMOD basato su trasduttori LVDT.

Registrazione

6. Occorre un sistema di registrazione analogico o digitale, che consenta di ottenere il grado di precisione richiesto per i sistemi di applicazione della forza e per le misure degli spostamenti. Si raccomanda di stampare direttamente il grafico carico-LPD in un piano cartesiano X-Y durante la prova di livello II. Si possono usare anche altri sistemi di visualizzazione, come schermi CRT, a condizione che si possa ottenere una correzione di non-linearità come descritto al punto 14.

Procedimenti di prova

Scelta e preparazione del provino

7. (a) Si definisce campione di prova una serie di spezzoni di carota (provini) aventi lo stesso diametro, di proprietà simili e uguale orientamento dell'asse della carota (vedere punto 7b seguente), di cui si voglia determinare la tenacità a frattura. Ciascun gruppo di provini con ugual direzione di carico (vedere punto 7j seguente) costituisce un sotto-campione che deve essere trattato separatamente.

(b) Le carote devono essere contrassegnate da un riferimento, scritto con inchiostro indelebile, prima della preparazione del campione, in modo da conoscere gli assi del provino e gli angoli di rotazione relativi alle caratteristiche strutturali del materiale, alle facce del blocco campione, ai fori di perforazione, ecc. I campioni devono essere immagazzinati in modo da conservarne il contenuto di acqua naturale, per quanto possibile, fino al momento della preparazione del provino.

(c) Deve essere misurato e riportato il contenuto di umidità di ciascun campione[8].

(d) Per ciascun campione di prova deve essere effettuata almeno una sezione sottile per poterne definire le caratteristiche mineralogiche, la granulometria, il tipo di superficie, il volume e la porosità[9]. La precisione di queste determinazioni dovrà essere migliore del ± 3% per l'analisi modale, del ± 5% per la granulometria e dello ± 0.2% per la porosità. Se i provini spezzoni presentano anisotropia o si rivelano come anisotropi a successive rilevazioni di prova[10], si dovranno allora ricavare tre sezioni sottili reciprocamente perpendicolari, in direzione parallela e normale all'anisotropia e quindi analizzarle.

(e) Deve essere misurata la resistenza a trazione diretta σ_t del materiale roccioso[11].

(f) Il diametro D della carota dovrà essere riferito alle dimensione del grano maggiore della roccia in un rapporto di almeno 10:1. Per la preparazione dei provini dovrà essere scelto una porzione liscia di carota, priva di irregolarità sporgenti e ad asse rettilineo, con deviazione massima di 0.5 mm. Il diametro deve essere misurato con l'approssimazione di 0.1 mm, facendo la media di due diametri ad angolo retto in tre diverse posizioni poste ad uguale distanza lungo il provino prescelto.

(g) Le carote verranno tagliate alla lunghezza desiderata e intagliate usando una ruota diamantata raffreddata ad acqua.

(h) Si misurerà la lunghezza w del provino, che non dovrà discostarsi da 1.45D di oltre 0.02 D. Le estremità del provino dovranno in generale essere lisce e piatte e non dovranno discostarsi dalla perpendicolare all'asse del provino di oltre 0.5 mm su 100 mm[30].

(i) Si dovrà misurare la larghezza t dell'intaglio, che non dovrà superare 0.03D o 1 mm, con preferenza per il valore maggiore. Si raccomanda che l'intaglio sia eseguito con due tagli simmetrici rispetto all'asse della carota. Il dispositivo di serraggio della Fig. 11 blocca il provino all'angolo specificato rispetto alla linea di taglio e alla rotazione voluta rispetto ai contrassegni presenti. Il primo taglio è centrato con l'aiuto dei perni di guida e la sua profondità dovrà essere regolata con attenzione, fin quasi a intersecare il congiungimento del diametro della carota con l'estremità posteriore del provino. Dopo il taglio, il provino viene estratto dal dispositivo di fissaggio, ruotato di 180° intorno all'asse della carota e reinserito nel dispositivo con una lama di centraggio che fissa l'angolo di rotazione e quindi tagliato ancora alla stessa profondità del primo taglio.

(j) Si dovrà registrare l'angolo della normale al piano dell'intaglio rispetto al riferimento sul provino, in modo da conoscere sia il piano della fessura sia la direzione di propagazione della fessura stessa relativa alla struttura del materiale, alle facce del blocco campione, ecc. L'angolo coincide con la direzione voluta di carico, che deve essere parallela o perpendicolare a tutti gli elementi di anisotropia.

(k) L'angolo θ interno della V dovrà essere di 54.6° ± 1.0°. Si dovrà misurare la posizione a_o dell'apice dell'angolo, che non dovrà superare 0.02D del suo valore nominale 0.48D. Per evitare prove inutili, conviene eseguire un controllo preliminare.

(l) Si dovrà misurare la profondità massima a_1 dei fianchi dello chevron e la lunghezza a1 − a0 della V non dovrà superare 0.02D del suo valore nominale 0.97D[31].

(m) Le piastre terminali devono essere montate parallele ed equidistanti dal piano centrale dell'intaglio. Ciò si ottiene utilizzando una barra spaziatrice con perni centrali che si adattano perfettamente all'intaglio (Fig. 16). Le piastre sono appoggiate contro la barra spaziatrice durante la cementazione. Si userà un adesivo di resistenza adeguata, capace di produrre un giunto sufficientemente sottile[13].

(n) I coltelli utilizzati per la prova di livello II devono abbracciare l'apertura dell'intaglio ed essere centrati rispetto al piano dell'intaglio e all'apice della

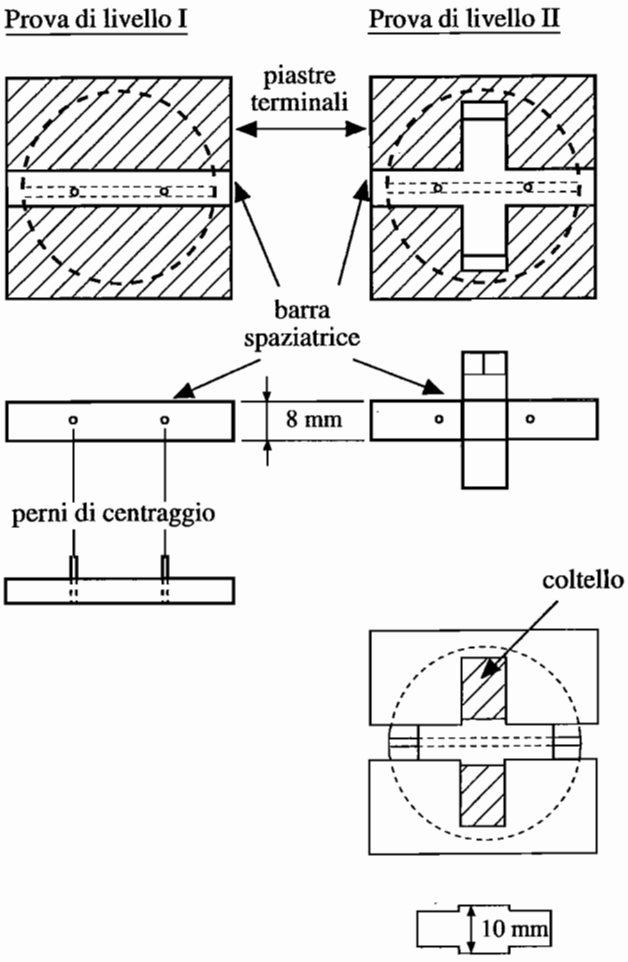


Fig. 16 - Montaggio delle piastre e delle estremità del coltello sul provino *short rod* con le barre spaziatrici raccomandate. La spaziatura delle estremità del coltello è di 10 mm.

V. La cosa si realizza se le piastre terminali, con incavi centrati per i coltelli, sono montate bene e i coltelli vengono poi montati usando un'altra barra spaziatrice (Fig. 16). I coltelli possono essere fissati al provino con lo stesso adesivo delle piastre terminali. Per poter montare l'estensimetro a graffette, servono incavi nei morsetti di carico (Fig. 13). Gli incavi dovranno essere di larghezza sufficiente per evitare il contatto tra i bracci dell'estensimetro e i morsetti. I coltelli possono anche essere parte integrante delle piastre terminali.

Taratura

8. (a) È necessario verificare la taratura della cella di carico. La prova di livello I non richiede ulteriori tarature.

(b) Per la prova di livello II, si deve controllare la linearità degli strumenti di misura degli spostamenti e tararli prima di ciascuna serie di prove. Se si usa un provino artificiale di proprietà note, allora la taratura dell'intera strumentazione, compreso il registratore X-Y, può essere facilmente controllata ogni giorno mettendo a confronto la pendenza della curva carico-CMOD risultante col valore di riferimento ottenuto da strumenti appena tarati. I valori delle due pendenze non devono discostarsi di oltre l'1% affinchè la taratura sia ritenuta valida.

(c) Gli strumenti di misura degli spostamenti devono dare una risposta lineare ma i valori misurati non necessitano di essere tarati con precisione in termini di spostamento assoluto (vedere punto 14e). Se però gli strumenti sono tarati assolutamente, è possibile calcolare altri valori, quali il modulo di Young, la resistenza alla propagazione della fessura in termini di energia restituita e il lavoro specifico della frattura (vedere punto 15 seguente).

Allestimento della prova

9. (a) Il dispositivo per l'applicazione del carico deve essere installato con precisione sull'attrezzatura di prova. L'impostazione della posizione del pistone o della testa a croce ed i limiti di posizione devono essere scelti in modo tale da non danneggiare gli strumenti, i dispositivi di carico e gli estensimetri di misurazione degli spostamenti nel caso in cui il provino abbia a rompersi prematuramente in modo improvviso o imprevisto.

(b) Il provino dovrà essere collocato nella macchina di prova in modo che il sistema di trasferimento del carico risulti correttamente allineato. Si potrà usare un piccolo carico aggiuntivo per mantenerlo in posizione corretta. Se il carico aggiuntivo non fosse sufficiente ad evitare il ribaltamento di un provino di grandi dimensioni a causa della forza di gravità, si dovrà allora usare una cinghia oppure un supporto per mantenere l'asse del provino perpendicolare alla direzione di carico (Fig. 14).

(c) Per la prova di livello II, gli estensimetri per la misura degli spostamenti devono essere montati sul provino in modo che il movimento o la deformazione del provino non interferiscano con le misure e devono essere centrati. La procedura è semplice per un estensimetro a morsetti se i coltelli sono montati correttamente. L'estensimetro a morsetti viene mantenuto in posizione soltanto dall'azione della molla dei suoi bracci a mensola, senza bisogno di adesivi a di altre sostanze. Un montaggio appropriato delle piastre terminali ha lo stesso effetto sulla messa in opera degli LVDT.

Prove

10. (a) La prova di livello I deve essere effettuata con controllo di carico. Il carico deve essere registrato e la prova deve proseguire fino alla rottura del provino. La velocità media di crescita del fattore di intensificazione delle tensioni durante la prova non deve essere minore di 0.25 MPa $\sqrt{(m)}/s$ oppure essere tale che la rottura avvenga entro 10 s dall'applicazione iniziale del carico.

(b) La prova di livello II deve essere effettuata in controllo degli spostamenti e si devono registrare sia il carico che gli spostamenti[3]. Si devono effettuare almeno quattro cicli di scarico-ricarico durante la prova (Fig. 9a). Lo scarico verrà effettuato mediante inversione istantanea della velocità di controllo dello spostamento[14]. Occorre svolgere almeno uno di questi cicli prima ed uno dopo il carico massimo[15]. I cicli devono essere distribuiti uniformemente lungo il diagramma carico-CMOD. Lo scarico deve terminare e il ricarico iniziare quando il carico è compreso tra il 10% e il 20% del carico massimo (Fig. 9a).

(c) Durante la fase di carico della prova, la velocità di apertura, CMOD, deve essere sufficiente a rendere la velocità di fessurazione à, maggiore di 1 mm/s nel punto di valutazione. La formula per il calcolo è data al punto 11 successivo.

(d) Nella prova di livello I, il carico massimo sul provino dovrà essere registrato con approssimazione dell'1%.

(e) Nella prova di livello II, la pendenza iniziale della tangente del diagramma carico-CMOD deve essere compresa tra 0.7 e 1.5 per consentire una valutazione accurata delle pendenze. Si raccomanda una valore il più vicino possibile al limite superiore. Il valore s della pendenza è definito al punto 12 successivo. Le impostazioni di taratura e di registrazione devono essere scelte in modo che sia possibile determinare il carico massimo con approssimazione dell'1%. Anche lo spostamento relativo deve essere determinato con una precisione dell'1%.

(f) La registrazione dei dati nella prova di livello II dovrà proseguire oltre il carico massimo fino ad un punto in cui lo spostamento sia almeno una volta e mezzo lo spostamento rilevato per il carico massimo.

(g) I risultati non potranno essere ritenuti validi e si dovrà effettuare un'altra prova se la fessura devia dal piano di simmetria definito dall'intaglio per oltre 0.05D entro 0.5D dall'apice dell'intaglio a V[15].

Valutazione dei parametri di maggior interesse

Calcolo della velocità di applicazione del carico

11. la velocità di spostamento controllato, cui si fa riferimento al punto 10 precedente, dovrà superare il seguente valore limite:

$$\dot{CMOD} > 0.017\ K_{SR}/(E\sqrt{D})m/s \qquad (18)$$

In questo caso, K_{SR} è la tenacità a frattura definita successivamente nell'equazione. (20) ed E è il modulo di Young del materiale[16].

Calcolo dei valori della pendenza

12. La pendenza s di una retta è definita dalla tangente dell'angolo ξ della retta e l'asse CMOD.

$$s = \tan \xi \qquad (19)$$

La pendenza iniziale della tangente del diagramma carico-CMOD è la pendenza di una retta che passa per l'origine con carico zero e tangente alla curva (Fig. 9b).

Calcolo della tenacità a frattura

13. Per la prova di livello I, la tenacità a frattura del provino sarà calcolata con la formula seguente:

$$K_{SR} = 24.0\ F_{max}/D^{1.5} \qquad (20)$$

Esprimendo il carico di rottura F_{max} in kN e il diametro D del provino in cm, la tenacità a frattura sarà espressa in $MPa\sqrt{(m)}$ oppure in $MN/m^{1.5}$. Si raccomanda di utilizzare le unità SI. Il fattore 24.0 è adimensionale.

(b) Si dovrà poi calcolare il seguente fattore di correzione:

$$C_K = (1 - 0.6\Delta w/D + 1.4\ \Delta a_o/D - 0.01\Delta\theta) \qquad (21)$$

I simboli Δw, Δa_0 e $\Delta\theta$ denotano le differenze tra i valori misurati e i valori nominali, cioè $\Delta w/D = w/D - 1.45$, ecc. Se $0.99 < CK < 1.01$, allora l'eq. (20) è valida, altrimenti il valore della tenacità a frattura dovrà essere calcolato con la:

$$K_{SR} = C_K\ 24.0\ F_{max}/D1.5 \qquad (22)$$

Queste equazioni sono state scritte assumendo che il materiale sia isotropo, ma non dovrebbero variare sensibilmente in presenza di anisotropia.

Correzione della tenacità a frattura in caso di non-linearità

14. (a) Per la prova di livello II, la valutazione deve iniziare dal calcolo della tenacità a frattura come al punto 13 precedente. Si dovrà quindi calcolare un fattore di correzione di non-linearità nella registrazione carico-CMOD secondo i metodi grafici di costruzione illustrati nelle Figg. 9a-c.

(b) Si tracci una retta per ciascun ciclo di scarico-ricarico, nel senso sotto specificato. Ciascuna retta è definita da due punti, H ed L. Il punto superiore (H) è quello in cui lo CMOD inizia a diminuire sul lato di scarico del ciclo e il carico corrispondente è indicato con F_H (Fig. 9a). Il punto inferiore (L) giace sulla parte di ricarico del ciclo ed è definito dal livello di carico:

$$F_L = 0.5\ F_H \qquad (23)$$

Si tracci poi una retta iniziale passante per H ed L.

(c) L'entità dell'isteresi centrata intorno ad F_L nel ciclo di scarico-ricarico è definita dalla distanza verticale ΔF (Fig. 9a). La retta finale di ogni ciclo sarà allora ottenuta traslando verticalmente la retta iniziale verso il basso di una quantità $0.5\Delta F$. Essa dovrà intersecare l'asse del CMOD.

(d) Si calcoli la pendenza di ciascuna retta finale. Si individuano le due rette i cui valori di pendenza si avvicinano maggiormente al valore:

$$s_c = 0.5\ s_{tangente\ iniziale} \qquad (24)$$

Il punto corrispondente alla pendenza s_c di scarico sulla curva carico-CMOD è il punto in cui deve essere valutata la tenacità a frattura[15-17].

(e) Mediante queste due rette linearizzate di scarico prescelte si definiscano gli spostamenti residui δ_1 e δ_2 nella condizione di scarico e la distanza orizzontale (Fig. 9b):

$$x_u = \delta_2 - \delta_1 \qquad (25)$$

Si tracci, regolarizzandola, la curva carico-CMOD tra le suddette rette di scarico, ignorando le rette di scarico-ricarico e la curva regolarizzata. Detti F_1 ed F_2 i relativi carichi, si trovi poi il carico medio:

$$\bar{F} = (F_1 + F_2)/2 \qquad (26)$$

Se le linee di scarico contengono F_{max}, allora il maggiore tra F_1 ed F_2 dovrà essere sostituito da F_{max}. Si tracci poi una linea di carico orizzontale a questo livello (Fig. 9b). Questa definisce gli spostamenti di due stati di ugual carico lungo le rette di carico linearizzate. La differenza tra questi spostamenti si indica con x_l. Allora la velocità di spostamento

$$p = x_u/x\ell \qquad (27)$$

definisce il grado di «non-linearità», p[18]. Grandi variazioni di p tra i provini in un campione di prova o un valore di p negativo indicano probabilmente errori inaccettabili nella procedura di valutazione[19].

(f) Se le due linee prescelte di scarico abbracciano il punto di valutazione e se $\bar{F}$ non è minore di 0.98 F_{max}, allora il valore della tenacità a frattura corretto per la non-linearità sarà ottenuto dalla

$$K^c_{SR} = \sqrt{(1+p)/(1-p)} \cdot K_{SR} \qquad (28)$$

L'apice 'c' indica un valore corretto della tenacità a frattura[20].

(g) Se le due linee di scarico prescelte non contengono il punto di valutazione o se $\bar{F}$ è minore di 0.98 F_{max}, allora, mediante interpolazione o estrapolazione lineare, si tracci la linea di scarico con pendenza sc.17 La procedura si baserà su una quantità costante di spostamento recuperato (CMOD), cioè sulla distanza orizzontale x_2 (Fig. 9c).

(h) Dapprima, lungo la linea di scarico passante per F_1, si trovi il punto F'_1 che presenta una quantità di recupero di spostamento allo scarico uguale a quella allo scarico da F_2 lungo la seconda linea di scarico, cioè la quantità x_2. Si tracci poi una retta passante per F'1 con F_2 e si trovi il punto su questa retta il cui carico sia

$$F_e = s_c x_2 \qquad (29)$$

Si tracci poi una retta da questo punto fino ad uno spostamento recuperato, dopo lo scarico x_2. La sua pendenza sarà allora per definizione sc. Infine, si trovi il carico nel punto di valutazione F_c come intersezione tra questa linea e la curva regolarizzata carico-CMOD.

(i) Allora il valore corretto per la non-linearità della tenacità a frattura sarà calcolato con la

$$K^c_{SR} = \frac{F_C}{F_{max}} K_{SR} \cdot \sqrt{(1+p)/(1-p)} \qquad (30)$$

Questa correzione di K_{SR} non richiede che il materiale sia isotropico.

Calcolo del modulo di Young e dell'Energia di Frattura

15. (a) Se è stata eseguita una taratura assoluta degli strumenti per la misurazione degli spostamenti, allora si possono calcolare altri parametri del materiale seguendo le procedure di seguito indicate.

(b) Modulo di Young. Se è nota in termini assoluti la pendenza della tangente iniziale, allora è possibile calcolare il modulo a flessione di Young, E, del materiale costitutivo del provino.21 Si usa l'equazione seguente:

$$E = 84.5\ s_{\text{tangente iniziale}}/D \qquad (31)$$

Se $s_{\text{tangente iniziale}}$ è espressa in kN/mm e D in mm, il valore risultante del modulo di Young sarà in GPa, che è l'unità che si consiglia di usare.

(c) Si deve poi calcolare il seguente fattore di correzione:

$$C_E = [1 + 2.9\ \Delta a_0/D + 2.5\ (t/D - 0.012)]. \qquad (32)$$

Se $0.98 < CE < 1.02$ allora l'eq. (31) è valida, altrimenti il modulo di Young dovrà essere calcolato come:

$$E = C_E 84.5\ s_{\text{tangente iniziale}}/D \qquad (33)$$

(d) Se poi è noto anche il coefficiente di Poisson, n, del materiale del provino, si può trasformare il valore della tenacità a frattura, espresso in termini di intensificazione degli sforzi, $MPa\sqrt{(m)}$, in resistenza alla propagazione della fessura, espressa in termini di energia di frattura:

$$G^c_{SR} = \frac{(1-\nu^2)\ (K^c_{SR})^2}{E} \qquad (34)$$

L'unità che si consiglia per G^c_{SR} è J/m^2. L'influenza del valore di ν è trascurabile. Dato che ν è minore di 0.3 per la maggior parte delle rocce di interesse, lo si può ipotizzare con sufficiente precisione oppure assumerlo uguale a zero, se lo si dichiara espressamente[22].

(e) Infine, se si segue la registrazione della curva carico-CMOD fino a che il provino non abbia praticamente alcuna resistenza residua, allora il lavoro totale W^f_{SR} di frattura, che si richiede per separare il provino intagliato in due metà[3], si può calcolare con la

$$W^f_{SR} = \int_0^\infty Fd(CMOD) \qquad (35)$$

Riferendo W^f_{SR} alla superficie A della parte intat-

ta del provino intagliato[23], si ottiene l'energia di frattura:

$$\bar{R}_{SR} = \frac{W^f_{SR}}{A} \qquad (36)$$

La dimensione di $\bar{R}_{SR}$ è J/m^2 e il suo valore è correlato strettamente con quello di G^c_{SR}.

Osservazioni

Dimensioni e tipo del provino

16. (a) Nelle misure di tenacità a frattura a deformazione piana su materiali metallici si richiede che le prove siano completate e che i risultati siano analizzati prima di poter dichiarare la validità degli stessi[25-26]. Il metodo qui presentato per le rocce evita in parte questo problema, proponendo una correzione per il comportamento non-lineare del materiale, che si basa su misure di spostamento. L'esperienza fatta indica che i valori corretti della tenacità a frattura possono essere ragionevolmente indipendenti dalle dimensioni del provino [42, 44], ma che valori non corretti tendono a diminuire in modo significativo con la diminuzione delle dimensioni del provino. Per non incorrere in questa limitazione, si devono probabilmente usare carote con diametro decisamente superiore a 50 mm

(b) Dato che non viene assegnato alcun criterio preciso di validità in rapporto alle dimensioni del provino, non esiste alcuna garanzia che un valore di tenacità a frattura determinato in base a questo metodo rappresenti con precisione una proprietà del materiale.

(c) Si può ritenere tuttavia che il valore K^c_{SR} di tenacità a frattura, calcolato con la prova di livello II, costituisca una rappresentazione valida di una proprietà del materiale se $p < 0.05$ (vedere il punto 14). In questo caso, il valore K_{sr} di livello I (vedere il punto 13) è inferiore a K^c_{SR} per meno del 5% e la prova di livello I offre una stima precisa.

(d) Un'indicazione più probante che K^c_{SR} sia una rappresentazione valida di una proprietà del materiale la si può ottenere da prove effettuate su almeno due campioni di dimensioni diverse. Il campione di dimensioni maggiori deve avere $p < 0.05$ ed il rapporto tra i diametri deve essere superiore a 2. L'indicazione voluta si ottiene allora se K^c_{SR} non mostra alcuna dipendenza dalle dimensioni dei provini.

(e) Le prove sperimentali eseguite a tutt'oggi dimostrano che valori corretti di non-linearità della tenacità a frattura in campioni di roccia short rod si accordano bene con valori di tenacità a frattura ottenuti con campioni di altra geometria, quando lo stato tensionale nella parte intatta davanti alla fessura è dovuto principalmente a flessione [45, 47]. Anche se i valori di tenacità a frattura ricavati da questo tipo di provini fossero indipendenti dalle dimensioni, non necessariamente si accorderebbero con valori ricavati da provini in cui la parte intatta sia sottoposta principalmente a trazione.

Uso dei valori di tenacità a frattura

17. (a) A proposito dell'uso previsto, i valori corretti della tenacità a frattura per la non-linearità ottenuti con questo metodo si considerano conservativi per le analisi ingegneristiche, a patto che i difetti analizzati siano molto più piccoli di tutte le altre dimensioni strutturali e siano molto maggiori della microstruttura caratteristica del materiale. In caso contrario, questi valori devono essere usati esclusivamente per verificare la resistenza relativa a frattura dei diversi materiali.

Relazione conclusiva e presentazione dei risultati

18. Le relazioni dei risultati devono contenere i seguenti dati:

Dati di carattere generale

19. Particolari delle attrezzature di prova e delle procedure utilizzate. Ci si può riferire al metodo qui presentato, descrivendo e motivando eventuali differenze dalle procedure raccomandate.

Dati relativi al campione di prova

20. Per ciascun campione di prova nel suo insieme, occorre indicare quanto segue:

(a) Il numero del campione, il luogo del prelievo e il tipo di roccia, la natura e l'orientamento in situ di tutti i piani di anisotropia e di debolezza.

(b) L'asse della carota, con riferimento alla geologia e alla struttura in situ e, nel caso di più provini ricavati dalla stessa carota, la direzione di carico.

(c) Le modalità di conservazione, il contenuto d'acqua e il grado di saturazione al momento della prova.

(d) Una tabella dei dati del provino relativi alla determinazione della tenacità a frattura, compresi i parametri ausiliari (vedere punto 21).

(e) Per ciascun provino, una tabella riassuntiva del valor medio di tenacità a frattura e la deviazione standard[27].

(f) Le proprietà indice ottenute da altri tipi di prove e altre grandezze, quali la densità relativa, la granulometria, la porosità e la permeabilità; citando il metodo usato per la determinazione di ciascun valore.

Dati del provino

21. Per ciascun provino del campione i dati riportati devono contenere quanto segue:

(a) Dimensioni del provino: D, W, a_0 e a_1 o θ.

(b) Livello di prova e velocità di carico, cioè $\dot{F}$ o

il tempo di rottura per livello I e lo CMOD per livello II.

(c) Carico massimo F_{max} e, per il livello II, il carico F_c nel punto di valutazione, ove possibile.

(d) Valori di tenacità a frattura espressi per tre parametri significativi, cioè K_{SR} per il livello I e K_{SR} e K^c_{SR} per il livello II, compresi due valori significativi di p.

(e) Parametri ausiliari. (E, ν, σ_t o i moduli di rottura, G^c_{SR} ed $\bar{R}_{SR}$).

Note

1. Queste attrezzature di prova sono conosciute col nome di macchine rigide o servo-comandate. Quando la prova è effettuata in controllo di carico, diventa instabile subito dopo il carico massimo e non è possibile registrare il comportamento post-picco, che è parte della prova di livello II.

2. Questo tipo di attrezzatura nasce col Metodo di Prova della Normativa ASTM per la «Tenacità a Frattura in deformazione piana di materiali metallici» [61].

3. La tenacità a frattura è un parametro direttamente collegato all'energia disponibile all'inizio e durante la propagazione della fessura e quindi al lavoro svolto sul provino dal carico esterno.

Dal momento che la definizione di lavoro svolto coinvolge lo spostamento del punto o della linea di carico, e non il CMOD, nel Metodo 1 la misura preferita di spostamento è quella del LPD. Per il provino short rod del Metodo 2, tuttavia, il CMOD coincide praticamente con lo spostamento della linea di carico o dei morsetti. Si noti che anche se il LPD è lo spostamento usato nelle misure di livello II, il segnale di controllo dello spostamento nella macchina di prova può ancora essere il CMOD o la corsa del pistone.

4. Questa modalità ha dimostrato di fornire valori precisi del modulo di Young tangente iniziale rispetto ai risultati ottenuti con estensimetri di deformazione [48].

5. Dal momento che l'allestimento del LVDT utilizza due trasduttori, occorre normalmente un impianto separato di amplificazione.

6. L'estensimetro a morsetti è spesso il sensore standard nel circuito di risposta di controllo di deformazione della macchina di prova servo-assistita e pertanto è facilmente disponibile. Potrebbe però non avere sensibilità sufficiente per lo spostamento relativamente piccolo che si incontra nella prova di tenacità a frattura di rocce dure. In questo caso, si deve usare un tipo diverso di allestimento LVDT.

7. L'allestimento si basa su un'apertura di 10 mm tra i coltelli, valore che non deve essere superato. La lunghezza effettiva dell'estensimetro è talvolta maggiore dell'apertura dei coltelli, a seconda del metodo di serraggio dei coltelli stessi.

8. Il metodo raccomandato è il metodo ISRM «Raccomandazioni per la determinazione del contenuto d'acqua dei campioni di roccia» (Commissione ISRM sui metodi di prova, 1981, pag. 83).

Al fine di evitare che l'essiccazione richiesta del provino abbia ad influenzare la prova di tenacità a frattura, la misura di umidità si può effettuare sia prima della prova su un provino di ugual contenuto d'umidità, ad es. un residuo del taglio, sia dopo la prova su una metà residua del campione.

9. I metodi raccomandati sono quelli riportati nelle «Raccomandazioni per la Descrizione Petrografica delle Rocce» e nelle «Raccomandazioni per la determinazione di porosità/densità mediante tecniche di saturazione e di affioramento» (Commissione ISRM sui metodi di prova, 1981, pagg. 73 e 84).

10. Talvolta il materiale della carota può essere anisotropo, anche se le indicazioni visive sono scarse. In questo caso, è stata proposta la seguente procedura Herziana di impronta per contatto [49] come metodo per la determinazione delle direzioni principali di anisotropia:

(a) Si prendano due pezzi adiacenti di un unico spezzone di carota e su ciascuno si segni e si numeri una serie di punti equidistanti sulla circonferenza, facendo attenzione a che le due serie siano identiche rispetto al segno originale di riferimento.

(b) Si fissino i pezzi di carota in dispositivi metallici identici con incavi fresati e si monti il blocco in una macchina di prova, assicurandosi che gli assi della carota siano reciprocamente perpendicolari e che punti di identica numerazione si trovino di fronte.

(c) Si collochi un foglio di carta copiativa con (o senza) un foglio bianco sul retro tra i provini e si avvicinino a forza i provini stessi. La forza massima usata deve essere grande abbastanza per ottenere un'impronta di contatto di dimensioni sufficienti sul foglio di carta, ma non tale da provocare incisioni sulla roccia, nell'intervallo compreso, ad esempio, tra 0.5 e 1.0 kN.

(d) Si ripeta il procedimento per ciascuna serie di punti, sempre con la stessa forza massima.

(e) Da un confronto delle impronte dei diametri, si possono determinare le direzioni principali di anisotropia che corrispondono alle direzioni di massima e minima uniformità del materiale e di qui la dimensione dell'impronta.

Il diametro di un'impronta simmetrica può, in linea di principio, essere utilizzato per determinare il modulo di elasticità dalle formule di contatto Hertziano.

11. Il metodo raccomandato è riportato nelle «Raccomandazioni per la determinazione della resistenza a trazione dei materiali rocciosi» dell'ISRM (Commissione ISRM sui metodi di prova, 1981, pag. 119). In alternativa, si può utilizzare, come stima approssimata della resistenza a trazione, il modulo di rottura di un provino a flessione privo di intaglio, sottoposto a prova secondo il Metodo 1, una volta dimezzato.

12. Può essere più facile misurare sia θ che a_o dopo la prova quando siano disponibili le superfici della parte integra sulle due metà del provino. Il dispositivo di controllo degli angoli facilita la creazione di angoli θ di 90° con la precisione di $\pm 1°$. La tolleranza di a_o è grande ed è quindi facile rimanere nei limiti, ma può risultare difficoltoso ottenere una misura esatta. Un risultato probabilmente più preciso si potrebbe ottenere misurando la profondità h del taglio (Fig. 3), sui due lati dell'intaglio e convertendo h mediante:

$$a_0 = 1.414h - 0.207D$$

13. In molti casi, basta un adesivo cianoacrilico per riempire il dislivello. Si possono usare anche resine epossidiche, col rischio però di provocare reazioni allergiche se maneggiate senza protezioni adeguate (guanti e lozioni detergenti per le mani).

Un giunto spesso di adesivo aumenta considerevolmente il valore CMOD misurato dall'estensimetro. Ne potrebbero derivare parecchi effetti indesiderati, in primo luogo l'aggiunta di un termine non-lineare al valore CMOD; in secondo luogo, la velocità reale di spostamento potrebbe diventare più bassa del valore prescritto; e, in terzo luogo, il valore calcolato del modulo di Young (Metodo 2) potrebbe diventare troppo basso, ecc.

14. Lo scarico si definisce come una inversione istantanea della velocità di spostamento controllata dalla macchina di prova. Dal momento che si possono verificare aumenti sostanziali sub-critici della fessura per carichi vicini al punto di scarico, mantenere costante lo spostamento anche per un tempo breve provoca invariabilmente una crescita non necessaria della fessura nel provino [50].

15. Il punto in cui si deve valutare la tenacità a frattura è quello in cui il fattore di intensificazione degli sforzi in funzione della lunghezza della fessura presenta un minimo.

Per il provino chevron bend del Metodo 1, con $a_o = 0.15D$ ciò si verifica a circa 0.15D dall'apice della V, punto nel quale la rigidità del provino è pari al 78-95% (equazione 6) del suo valore originale [51]. Per il provino short rod del Metodo 2, ciò avviene circa a 0.34D dall'apice della V, punto nel quale la rigidità è all'incirca la metà del valore originale.

In circostanze ideali, cioè nel caso di materiale elastico-lineare e fragile, con tenacità a frattura costante, il punto di valutazione coincide col carico massimo e la rigidità è data dalla pendenza di una secante che passa per l'origine. In circostanze diverse da quelle ideali, il punto di valutazione può capitare prima o dopo il carico massimo; nel caso di provini piccoli di roccia tenera capita sostanzialmente prima.

In quest'ultimo caso, occorrerà eseguire due, tre o più cicli di scarico prima del carico massimo. La specifica dei punti 11f (Metodo 1) e 10f (Metodo 2) può allora diventare meno rigida. In ogni caso, una serie di cicli di scarico-ricarico che abbraccino il punto di valutazione darà un valore più preciso della tenacità a frattura rispetto ad una serie che non lo abbracci (vedere anche la Nota 17).

16. Il fattore preliminare 0.006 nell'Eq. (1) ha la dimensione di m/s dato che contiene la velocità minima di fessura richiesta, 0.001 m/s, come fattore. È più conveniente esprimere LPD o CMOD in mm/s, ad esempio, e in questo caso si può usare 6.0 come fattore preliminare. I valori corrispondenti dei fattori preliminari per il Metodo 2 sono 0.017 e 17.0 [52].

In teoria, non si può essere sicuri che l'Eq. (1) sia soddisfatta se non dopo la valutazione effettuata dopo la prova. In pratica, K_{CB} o K_{SR} ed E si possono assegnare con margine sufficiente per soddisfare l'equazione. Cambiare LPD o CMOD di un fattore dieci, produce normalmente un cambiamento di appena il 2-10% nei valori misurati di tenacità a frattura [2].

17. Se le rette finali linearizzate di scarico non abbracciano il punto di valutazione, ulteriori prove su provini dello stesso sotto-campione devono essere accompagnate da più cicli di scarico-ricarico in modo che le rette finali abbraccino il punto di valutazione.

Si può ancora ottenere il punto di valutazione. Se giace prima delle rette finali, si dovranno scegliere come tangente iniziale e prima retta finale le due rette che lo abbracciano ed eseguire conseguentemente i calcoli. In questo caso, Fe nell'Eq. (11) (Metodo 1) o nell'Eq. (29) (Metodo 2) sarà un'interpolazione tra F'1 ed F2 (Fig. 9c).

Se il punto di valutazione giace oltre le rette finali, si dovranno scegliere le ultime due rette finali e il calcolo procederà di conseguenza. In questo caso, Fe sarà un'estrapolazione da F'1 ad F2 e al di sotto (Fig. 9c).

18. Questo modo di considerare il comportamento non-lineare della frattura è stato introdotto da Barker [53-55]. Dal momento che p è adimensionale, la correzione di non-linearità richiede soltanto che gli strumenti di misura dello spostamento siano lineari, e non tarati in modo assoluto.

19. Se esiste una grande variazione di p tra i provini in un campione di prova, la cosa può influenzare negativamente la precisione del valore calcolato della tenacità a frattura di livello II. La ragione potrebbe risiedere in una determinazione poco precisa di X_u. Ciò potrebbe portare a variazioni altrettanto grandi nei valori di p per i cicli di scarico-ricarico di un provino e la correzione potrebbe avvenire in parte creando un valor medio di p per due o tre di questi cicli. Nelle prove successive, le impostazioni registrate devono essere cambiate.

Può risultare un valore negativo di p se esistono sollecitazioni macroscopiche residue di grandezza sufficiente. Sforzi residuali microscopici, presenti a livello granulare nella roccia, non si ritiene possano produrre un effetto simile, a meno che la dimensione dei grani sia dello stesso ordine della lunghezza della fessura nel provino. In ogni caso, la procedura di correzione della non-linearità tiene anche conto di tutti gli effetti degli sforzi residui presenti.

20. Una buona approssimazione del fattore p, di circa il 2%, è data da $(1+p)$ per $p < 0.2$. Questo è anche l'intervallo di validità dell'Eq. (10) (Metodo 1) e dell'Eq. (28) (Metodo 2) per materiali metallici. Nelle prove su rocce si incontrano però spesso valori di $p < 0.2$.

21. Dal momento che il provino è preparato per far iniziare la propagazione della fessura a carichi relativamente ridotti, la curva carico vs LPD (Metodo 1) e quella carico vs CMOD (Metodo 2) saranno di norma piuttosto non-lineari. Una lettura iniziale della tangente di tale curva tenderà pertanto a sottostimare E. Le interfacce adesive relativamente morbide tra il provino e i coltelli tenderanno anch'esse a ridurre il valore misurato di E nel Metodo 2.

Allo scopo di aumentare la precisione della determinazione di E, si raccomanda di effettuare parecchie registrazioni X-Y di cicli di scarico-ricarico separati con maggior risoluzione prima di iniziare la prova a frattura. Il carico in questi cicli iniziali non deve superare il 20% del carico massimo registrato nel corso della prova a frattura.

22. Sia l'equazione di E che la sua conversione valgono per materiali isotropi. L'errore nel fattore di conversione può risultare sostanzialmente maggiore dell'effetto di non conoscere n se il grado di anisotropia è forte [48].

23. L'area (proiettata) del legamento del provino chevron bend (metodo 1, Eq. 17) è data da:

$$A = 0.25\ [\arcsin \beta + \beta\ (1 - 2a_0/D)]D^2$$

dove

$$\beta = 0.5\ [1 - 2a_0/D + \sqrt{(1 + 4a_0/D - 4(a_0/D)^2)}].$$

L'area del legamento del provino short rod (Metodo 2, Eq. 36) è data approssimativamente da

$$A = 0.5\ (w - a_0)D$$

La precisione di questa espressione dovrebbe essere sufficiente per provini che rientrano nei limiti specificati di tolleranza.

24. La RILEM ha preparato una bozza di raccomandazione per la «Determinazione dell'energia di frattura di malta e calcestruzzo mediante prove a flessione in tre punti su provini intagliati» [57]. La grandezza è indicata con G_F ed è misurata esattamente come $\bar{R}$.

G_F rappresenta essenzialmente la stessa proprietà del materiale della tenacità a frattura. Se si converte quest'ultima in energia di frattura rilasciata, le due diventano compatibili. Hanno tuttavia giustificazioni in qualche modo diverse, essendo la tenacità a frattura riferita ad un vertice acuto della fessura e l'energia di frattura ad una zona coesiva della retta, di lunghezza finita [58].

La RILEM trova che l'influenza delle dimensioni del provino sui valori G_F misurati per il calcestruzzo sembra accettabile, rilevando un aumento medio del 20% quando le dimensioni raddoppiano e del 30% quando triplicano [59]. Si veda anche Wittman [60]. Misure riferite alle rocce non sono altrettanto conclusive [2].

25. Simili criteri di validità valgono per le dimensioni del provino, per la lunghezza della fessura, per la geometria e l'acutezza e l'aspetto della registrazione della prova. Si veda la normativa ASTM E399 per «Tenacità a frattura in deformazione piana K_{IC} di materiali metallici» [61].

Il principale criterio stabilisce che la lunghezza della fessura e lo spessore del provino devono superare $2.5\ (K_{IC}/\sigma_{ys})^2$, dove σ_{ys} è lo 0.2% del limite apparente di elasticità del materiale. Prove su rocce dimostrano che lo spessore è relativamente ininfluente, ma che un criterio di lunghezza della fessura, basato sulla resistenza a trazione, è importante [2].

26. Non esistono, al momento attuale, dati sufficienti ricavati da prove chevron bend su rocce per stabilire un criterio di validità per le dimensioni minime dei provini per il Metodo 1, neppure in termini qualitativi.

Quanto al Metodo 2, prove recenti short rod su materiali metallici dimostrano che la tenacità short rod K_{SR} corretta per la lunghezza della fessura si avvicina a K_{IC} all'aumento delle dimensioni del provino e che una dimensione minima accettabile è $D\ 1.25\ (K_{IC}/\sigma_{ys})^2$ [62].

Campioni più piccoli hanno dato valori di K_{SR} almeno altrettanto piccoli dei valori di tenacità ottenuti su provini validi e i valori di tenacità corretti per la non-linearità, , erano almeno altrettanto grandi dei valori di tenacità su provini validi. Pertanto $K^{\S}_{SR}$ non era necessariamente indipendente dalle dimensioni del provino, ma sembrava esserlo per provini molto più piccoli di taluni materiali.

La dimensione limite di cui sopra corrisponde ad un grado di non-linearità, p, di circa 0,05, il che dà un valore di $K^{\S}_{SR}$ circa il 5% maggiore rispetto a K_{SR} e un'incertezza rispetto alla tenacità su provini validi inferiore a $\pm$ 2,5%. Un valore più piccolo di p indica una prova valida, ma anche se la prova è tecnicamente non valida, K_{SR} e $K^{\S}_{SR}$ stabiliscono il confine inferiore e superiore per la tenacità a frattura.

Non si posseggono al momento neppure dati sufficienti da prove short rod di rocce che permettano di stabilire un criterio valido per le dimensioni minime dei provini per il Metodo 2.

27. Se i valori medi devono servire alla classificazione di provini di piccole dimensioni per la tenacità a frattura, i valori estremi del provino non devono essere compresi (Commissione ISRM sui metodi di prova [63], Par. 14).

28. Si è usata un'apparecchiatura martinetto piatto come macchina di prova rigida per condurre con successo la prova di livello II [46]. Il martinetto piatto è una membrana riempita di mercurio, di metallo sottile, che viene inserita nell'apertura della fessura e che sottopone a pressione le facce della fessura mentre si espande. La pressione può essere fornita sia con una pompa manuale che con una pompa a vite a motore. Si tratta di un'apparecchiatura molto semplice e poco costosa, rispetto ad una macchina di prova servo-assistita. Questo metodo di applicazione del carico è stato brevettato da Terra Tek Systems di Salt Lake City, Utah, USA. Terra Tek vende impianti a martinetto piatto per l'esecuzione di prove di tenacità a frattura col nome di «Fractometer» (che è un marchio registrato).

L'applicazione del carico mediante martinetto piatto presenta oggi

alcuni piccoli inconvenienti a fronte del metodo di applicazione del carico usato nelle Raccomandazioni. In primo luogo, è stato sottoposto ad un lavoro di taratura molto meno lungo. Non sono pertanto disponibili formule di correzione e le tolleranze dei provini sono, di conseguenza, assai più critiche. In secondo luogo, la profondità di penetrazione del martinetto piatto nell'intaglio deve essere in proporzione costante con le dimensioni del provino, altrimenti la taratura cambia. È pertanto necessaria una regolazione accurata della profondità, specie se si devono sottoporre a prova provini di dimensioni diverse. In terzo luogo, per la taratura, è stato usato un dispositivo di corrispondenza K_I e tale sistema deve essere usato con cautela [64]. Perciò, la precisione del fattore di taratura non sarà altrettanto buona del ± 0.25 per il fattore 24,0 ± 0.25 nel par. 13 del Metodo 2. Infine, anche se è nota la formula di tenacità a frattura di livello I, la base per la prova di livello II non è altrettanto completa.

Le questioni di brevetto non impediranno l'inserimento del metodo di carico a martinetto piatto del provino short rod nel Metodo 2, quando esisteranno dati di taratura migliori.

29. Questo sistema di collegamento si può applicare anche alla determinazione della resistenza a trazione diretta della roccia, si veda la Nota 11.

30. Il metodo raccomandato è quello di Haas [65].

31. Sia θ che a_0 e a1 possono essere più facilmente misurate dopo la prova quando si disponga delle superfici della sezione resistente delle due metà del provino. Il dispositivo di preparazione rende facile il taglio di θ a 54.6° entro $\pm$ 1°.

La misurazione di θ può, se a1 $<$ w, basarsi sulla formula:

$$\theta = 2 \text{ atan}[0.5D/(a_1 - a_0)]$$

D'altra parte, se gli intagli sono stati ricavati nella faccia posteriore del provino, in modo che $a_1 > w$ (Fig. 10), allora

$$\theta = 2 \text{ atan}[0.5D_1/(w - a_0)]$$

dove $D_1 < D$ è la distanza da apice ad apice dell'intaglio, misurata sul diametro della faccia posteriore. In questo caso, $a_1 = w + (D - D_1)$ tan $(\theta/2)$.

32. La snellezza relativa dei bracci a mensola del provino short rod può indurre sforzi di flesso-trazione di entità sufficiente a provocare la diramazione della fessura e il cedimento trasversale dei bracci prima che sia possibile effettuare la valutazione della tenacità a frattura (K_{SR}). Una semplice stima [52] dimostra che il diametro del provino deve essere scelto

$$D > 1.15 \, (K_{SR}/\sigma_t)^2$$

se la fessura deve rimanere nel piano della V fino a che si raggiunga il punto voluto per la valutazione. La presenza di piani di debolezza orientati sfavorevolmente aumenta il rischio di rottura prematura dovuta a trazione al di fuori del piano dell'intaglio.

BIBLIOGRAFIA

1) Bieniawski Z.T. (1981) - *Rock materials under mixed mode fracture.* In Mixed Mode Fracture Propagation (Edited by Sih G.C. and Theocaris P.S.), Sijthoff & Noordhoff, The Netherlands, pp. 333-347.
2) Ouchterlony F. (1982) - *Review of fracture toughness testing of rock.* SM Archs 7, pp. 131-211.
3) Rossmanith H.P. (Editor) (1983) - *Rock Fracture Mechanics.* CISM Courses and Lectures, n. 275, Springer, Vienna.
4) Ingraffea A.R. (1985) - *Fracture Propagation in Rock.* In Mechanism of Geomaterials, Rocks, Concretes, Soils (Edited by Bazant Z.P.), Wiley, Chichester, pp. 219-258.
5) Kanninen M.F. and Popelar C.H. (1985) - *Advanced Fracture Mechanics.* Oxford Engineering Science Series, vol. XV, Oxford University Press, New York.
6) Wittman F.H. (Editor) (1983) - *Fracture Mechanics of Concrete.* Developments in Civil Engineering, vol. VII, Elsevier, Amsterdam.
7) Shah S.P. (Editor) (1985) - *Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites.* NATO ASI Series E: Applied Sciences, vol. XCIV, Nijhoff, Dordrecht.
8) Griffith A.A. (1921) - *The phenomena of rupture and flow in solids.* Proc. Trans. R. Soc., A221, pp. 163-198.
9) Griffith A.A. (1924) - *The theory of rupture.* Proc. 1st Int. Congr. Applied Mechanics, Delft, pp. 55-63.
10) Lawn B.R. and Wilshaw T.R. (1975) - *Fracture of Brittle Solids.* Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, Cambridge.
11) Irwin G.R. (1957) - *Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate.* J. appl. Mech., n. 24, pp. 361-364.
12) Gunsallus K.L. and Kulhawy F.H. (1984) - *A comparative evaluation of rock strength measures.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., n. 21, pp. 233-248.
13) Lindqvist P.-A. (1982) - *Rock fragmentation by indentation and disc cutting.* Doctoral Thesis, 20D, Luleå Univ. Techn., Luleå, Sweden.
14) Nelson P.P. and Fong F.L.C. (1986) - *Characterization of rock for boreability using fracture material properties.* Proc. 27th U.S. Symp. Rock Mechanics SME, Littleton, CO., pp. 846-852.
15) Rustan R.A., Vutukuri V.S. and Naartijärvi T. (1983) - *The influence from specific charge, geometric scale and physical properties of homogeneous rock on fragmentation.* Proc. 1st Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, vol. I, Luleå Univ. Techn., Luleå, pp. 115-142.
16) Saouma V.E. and Kleinosky M.J. (1984) - *Finite element simulation of rock cutting: a fracture mechanics approach.* Proc. 25th U.S. Symp. Rock Mechanics, AIME, New York, NY, pp. 792-799.
17) Rummel F. and Winter R.B. (1982) - *Application of laboratory fracture mechanics data to hydraulic fracturing field tests.* Proc. 1st Japan-U.S.A. Seminar on Geothermal Energy and Hydraulic Fracturing, pp. 31-39.
18) Roegiers J.C., McLennan J.D. and Schultz L.D. (1982) - *In-situ stress determinations in northeastern Ohio.* Proc. 23rd U.S. Symp. Rock Mechanics, AIME, New York, NY, pp. 219-229.
19) Takahashi H. (1983) - *In Hydraulic fracturing and geothermal energy.* (Edited by Nemat-Nasser S. *et al.*), Nijhoff, Amsterdam, pp. 291-305.
20) Nilson R.H., Proffer W.J. and Duff R.E. (1985) - *Modelling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., n. 22, pp. 3-19.
21) Nilson R.H. and Griffiths S.K. (1986) - *Similarity analysis of energy transport in gas-driven fractures.* Int. J. Fracture, n. 30, pp. 115-134.
22) Travis B.J. and Davis A.H. (1980) - *Calculation of gas-driven fracture propagation in rocks.* Proc. 21st U.S. Symp. Rock Mechanics, University of Missouri, Rolla, MO, pp. 356-361.
23) McHugh S. and Keough D. (1982) - *Use of laboratory-derived data to predict fracture and permeability enhancement in explosive-pulse tailored field tests.* Proc. 23rd U.S. Symp. Rock Mechanics, AIME, New York, NY, pp. 504-514.
24) Warpinski N.R. Schmidt R.A., Cooper P.N., Walling H.C. and Northrop D.A. (1981) - *High energy gas frac: multiple fracturing in a wellbore.* Proc. 20th U.S. Symp. Rock Mechanics, University of Texas, Austin, pp. 143-152.
25) Grady D. (1985) - *The mechanics of fracture under high-rate stress loading.* In Mechanics of Geomaterials, Rocks, Concretes, Soils (Edited by Bazant Z.P.), Wiley, Chichester, pp. 129-156.
26) Adams T.F., Demith R.B., Keller C.F., Margolin L.G. and Nicholas B.D. (1985) - *Simulation of dynamic rock breakage with the shale code.* In Fragmentation by Blasting (Edited by Fourney W.L. *et al.*), 1st edn., SEM, Littleton, CT, pp. 147-157.
27) Ingraffea A.R. (1979) - *The strength ratio effect in the fracture of rock structures.* Proc. 20th U.S. Symp. Rock Mechanics, University of Texas, Austin, pp. 153-159.
28) Kemeny J. and Cook N.G.W. (1985) - *Formation and stability of steeply dipping joint sets.* Proc. 26th U.S. Symp. Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, vol. 1, pp. 471-478.
29) Pollard D.D., Segall P. and Delaney P.T. (1982) - *Formation and interpretation of dilatant echelon cracks.* Geol. Soc. Am. Bull., n. 93, pp. 1291-1303.

30) THARP T.M. (1983) - *Mechanics of failure for rock masses subjected to long term tensile loading-analysis of large naturally occurring cantilevers.* Proc. 24th U.S. Symp. Rock Mechanics, Texas A&M University, College Station, pp. 309-318.
31) ABÉ H. and TAKAHASHI H. (1984) - *Crustal rock fracture mechanics for design and control of artificial subsurface cracks in geothermal energy extraction engineering (Γproject).* Proc. 9th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Report SGP-TR-74, Stanford University, CA.
32) TAKAHASHI H., SHOJI T. and ABÉ H. (1986) - *Recent progress and future of Γ project at Tohoku University, Japan.* E.E.C./U.S. Workshop on Hot Dry Rock, Brussels.
33) BARTON C.C. (1982) - *Variables in fracture energy and toughness testing of Rock.* Proc. 23rd U.S. Symp. Rock Mechanics, AIME, New York, pp. 449-462.
34) KARFAKIS M.G., CHONG K.P. and KURUPPU M.D. (1986) - *A critical review of fracture toughness testing of rock.* 27th U.S. Symp. Rock Mechanics, Chapter 1, SME, Littleton, CO, pp. 3-10.
35) OUCHTERLONY F. (1980) - *A new core specimen for the fracture toughness testing of rock.* SveDeFo Report DS 1980, 17, Swedish Detonic Research Foundation Stockholm.
36) BARKER L.M. (1977) - *A simplifield method for measuring plane strain fracture toughness.* Engng Fract. Mech., n. 9, pp. 361-369.
37) PECK L. (1983) - *Stress corrosion and crack propagation in Sioux quartzite.* J. geophys. Res., n. B88, pp. 5037-5046.
38) PECK L., NOLEN-HOEKSMA R.C. BARTON C.C. and GORDON R.B. (1985) - *Measurement of the resistance of imperfectly elastic rock to the propagation of tensile cracks.* J. Geophys. Res., n. B90, pp. 7827-7836.
39) PECK L., BARTON C.C. and GORDON R.B. (1985) - *Microstructure and the resistance of rock to tensile fracture.* J. Geophys. Res. n. B90, pp. 11533-11546.
40) LABUZ J.F., SHAH S.P. and DIOWDING C.H. (1985) - *Experimental analysis of crack propagation in granite.* Int. J. Rock Mechs. Min. Sci. & Geomech. Abstr., n. 22, pp. 85-98.
41) LABUZ J.F., SHAH S.P. and DOWDING C.H. (1987) - *The fracture process zone in granite: evidence and effect.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., n. 24, pp. 235-246.
42) OUCHTERLONY F. and SUN Z. (1983) - *New methods of measuring fracture toughness on rock cores.* Proc. 1st Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, Luleå Univ. Techn., Luleå, vol. I, pp. 199-223.
43) INGRAFFEA A.R., GUNSALLUS K.L., BEECH J.F. and NELSON P.P. (1984) - *A short-rod based system for fracture toughness testing of rock.* Chevron-notched specimens: testing and stress analysis, ASTM STP 855, Philadelphia, pp. 152-166.
44) YI X. (1987) - *Fracture toughness and crack growth in short rod specimens of rock.* Licentiate Thesis, 06L, Luleå Univ. Techn., Luleå, Sweden.
45) COSTIN L.S. (1981) - *Static and dynamic fracture behaviour of oil shale.* Fracture mechanics for ceramics, rocks, and concrete, ASTM, STP 745, Philadelphia, pp. 581-590.
46) MEREDITH P.G. (1983) - *A fracture mechanics study of experimentally deformed crustal rocks.* Unpublished Ph.D. Thesis, University of London.
47) SUN Z. and OUCHTERLONY F. (1986) - *Fracture toughness of round specimens of stripa granite.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., n. 23, pp. 399-409.
48) OUCHTERLONY F. (1983) - *Fracture toughness testing of rock.* In Rock fracture Mechanics (Edited by Rossmanith H.P.), CISM Courses and Lectures n. 275, Springer, Vienna, pp. 69-150.
49) BOBROV G.F. (1986) - *Personal communication.* The Mining Institute of the Sibirian Branch of the U.S.S.R. Academy of Sciences, Novosibirsk.
50) ATKINSON B. (1984) - *Subcritical crack growth in geological materials.* J. Geophys. Res., n. B89, pp. 4077-4114.
51) OUCHTERLONY F. (1986) - *A core bend specimen with chevron notch for fracture toughness measurements.* 27th U.S. Symp. Rock Mechanics, Chapter 28, SME, Littleton, pp. 177-184.
52) OUCHTERLONY F. (1986) - *Evaluation formulas for rock fracture toughness testing with standard core specimens.* Proc. 1986 SEM Spring Conf. Session 6, SEM, Bethel, pp. 115-124.
53) BARKER L.M. (1977) - *K_{Ic} Measurement using short rod-specimens the elastic plastic case.* Terra Tek report 77-91R, Salt Lake City, UT.
54) BARKER L.M. (1979) - *Theory for determining K_{Ic} from small non-LEFM specimens, supported by experiments on aluminium.* Int. J. Fracture, n. 15, pp. 515-536.
55) BARKER L.M. (1980) - *Data analysis methods for short rod and short bar fracture toughness tests of metallic materials.* Terra Tek Report TR 80-12, Salt Lake City.
56) BARKER L.M. (1981) - *Residual stress effects on fracture toughness measurements.* Proc. 5th Int. Conf. Fracture ICF 5, Pergamon Press, Oxford, vol. V, pp. 2563-2570.
57) *RILEM.* Technical Committee TC-50 on Fracture Mechanics of Concrete (1985) - *Determination of the fracture energy of mortal and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, draft recommendation.* Mater. Struct., 18, n. 106.
58) HILLERBORG A. (1985) - *The theoretical basis of a method to determine th fracture energy G_F of concrete.* Mater. Struct., 18, n. 106.
59) HILLEBORG A. (1985) - *Results of three comparative test series for determining the fracture energy G_F of concrete.* Mater. Struct., 18, n. 107.
60) WITTMAN F.H. (Editor) (1986) - *Fracture Toughness and fracture Energy of Concrete.* Developments in Civil Engineering, vol. XVIII. Elsevier, Amsterdam.
61) ASTM (1986) - *Standard Test Method For «Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials».* Annual Book of Standards 03.01, ASTM, Philadelphia, P. 522-557.
62) BARKER L.M. (1984) - *Specimen size effects in short rod fracture toughness measurements.* Chevron-notched specimens: testing and stress analysis, ASTM STP 855, Philadelphia, pp. 117-133.
63) ISRM COMMISSION ON TESTING METHODS (1985) - *Suggested method for determining point load strength.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., n. 22, pp. 51-60.
64) NEWMAN J.C.J. (1984) - *A review of chevron-notched fracture specimens.* Chevron-notched specimens: testing and stress analysis, ASTM STP 855, Philadelphia, pp. 5-31.
65) HAAS C.J. (1983) - *Proposed new standard test method for dimensional shape tolerance of rock core specimens.* Geotech. Testing J., n. 6, pp. 226-229.
66) MÜLLER W. and RUMMEL F. (1984) - *Bruchzähigkeitsmessungen an Gesteinen.* Berich zu den BMFT-FE-Vorhaben 03E-3068-B. Ruhr University, Bochum, F.R.G.
67) TAKAHASHI H., HASHIDA T., and FUKAZAWA T. (1986) - *Fracture toughness tests by use of core based specimens.* GEEE Research Report, n. T-002-86, Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan.
68) OUCHTERLONY F. (1987) - *A presentation of the ISRM Suggested Methods for determining fracture toughness of rock material.* Proc. 6th Int. Congr. Mechanics, vol. II, Balkema, Rotterdam, PP. 1181-1186.
69) OUCHTERLONY F. (1987) - *Unreported data.* Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm, Sweden.
70) ABRAHAMSSON S., NIKLASSON B. and OUCHTERLONY F. (1987) - *Fragmentation monitoring of production blasts at Mrica.* SveDeFo Report DS 6, Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm.
71) MATSUKI K., NOZUYAMA Y. and TAKAHASHI H. (1987) - *Size effect in the fracture toughness testing of rocks using a boring core.* Proc. Spring Meeting Min. Metall. Inst. Japan, pp. 193-194.