

# La prova di trazione diretta nella meccanica della frattura delle rocce

C. SCAVIA\*, A. ZANINETTI\*\*

**SOMMARIO.** La tenacità a frattura della roccia può essere determinata facendo riferimento a diverse metodologie sperimentali. Poiché i risultati ottenuti non sono sempre confrontabili, la Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (ISRM) propone due metodi di prova (*Chevron Bend e Short Rod*) per determinare la tenacità a frattura delle rocce. Le difficoltà che si presentano nella preparazione dei campioni e nella determinazione dei valori di tenacità, possono essere superate, ricorrendo ad un terzo metodo (prova stabile di trazione diretta). Confrontando i risultati delle prove eseguite secondo i tre metodi sui medesimi tipi di roccia, viene presentato e discusso il grado di affidabilità raggiunto con la prova di trazione diretta.

## 1. Introduzione

La tenacità a frattura di una roccia può essere un parametro utile in molte applicazioni di ingegneria delle rocce quali la fratturazione idraulica per la stimolazione dei pozzi geotermici e petroliferi e per la determinazione dello stato tensionale in situ [BARLA e ZANINETTI, 1986], la frammentazione, l'abbattimento con esplosivo, l'analisi di stabilità di cavità sotterranee [INGRAFFEA, 1979] e di pendii [SCAVIA, 1991].

Sono disponibili in letteratura valori di tenacità a frattura ottenuti per molti tipi di roccia. In genere tuttavia, vi sono differenze significative nelle stime di tenacità ottenute da prove eseguite sul medesimo materiale ma con differenti modalità [MEREDITH, 1989].

Perciò la Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (ISRM) suggerisce due metodi (*Chevron Bend e Short Rod*) che sono diventati un punto di riferimento per la determinazione della tenacità a frattura dei materiali rocciosi. Le raccomandazioni della ISRM offrono indubbi vantaggi rispetto ad altre metodologie, anche se alcuni problemi rimangono insoluti, come ad esempio il fatto di non poter eliminare completamente gli effetti delle dimensioni e della geometria del provino sul valore dei parametri sperimentali di tenacità [MATSUKI *et al.*, 1991].

Altri autori, che operano nel campo della ricerca della meccanica della frattura applicata al calcestruzzo ed alle strutture civili, hanno rivolto la loro attenzione ad un approccio energetico, che richiede la determinazione della Energia di Frattura,  $G_f$ , un parametro che, a differenza della tenacità a frattura,

può essere usato anche nell'analisi di problemi di meccanica della frattura non lineare. La quasi totalità di questi studi è stata eseguita su calcestruzzo con prove di «flessione con tre punti di appoggio» e «trazione diretta stabile» [PETERSSON, 1981].

Partendo da queste osservazioni, il Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale dell'ENEL, il Politecnico di Torino e l'ISMES di Bergamo hanno messo a punto un programma di ricerca sperimentale congiunto, al fine di individuare una tecnica, affidabile e semplice da impiegare, per la valutazione sia dell'energia di frattura che della tenacità a frattura.

In tal senso sono state eseguite alcune prove di Trazione Diretta Stabile, Chevron Bend e Short Rod, su quattro litotipi, tutti ampiamente impiegati dall'industria delle costruzioni o comunemente incontrati nell'ingegneria delle rocce.

In questo lavoro, verrà dedicata particolare attenzione alle procedure di prova e ai risultati preliminari della ricerca.

## 2. Descrizione dei litotipi

I quattro tipi di roccia considerati in questo studio sono: marmo, diorite, tonalite ed arenaria.

Il *marmo di Carrara* è un calcare metamorfico, a tessitura saccaroidale, costituito quasi interamente da calcite. La dimensione media dei grani è 0.18 mm (0.05 ÷ 0.40 mm) ed il contenuto di quarzo è inferiore al 5%. Da prove di compressione monoassiale sono stati ricavati i seguenti parametri: resistenza ( $\sigma_c$ ) = 110 MPa; modulo di Young secante ( $E_s$ ) = 60000 MPa e tangente iniziale ( $E_i$ ) = 26000 MPa.

La *diorite di Anzola* è un silicato con componenti granitiche e composizione gabbriica. La dimensione media dei grani è 1.30 mm (0.25 ÷ 2.00 mm) ed il contenuto di quarzo è inferiore al 5%. I parametri

\* Istituto di Scienza delle Costruzioni - Università di Genova.

\*\* ENEL Spa-CRIS - Milano.

geomeccanici principali sono:  $\sigma_c = 220$  MPa;  $E_s = 75000$  MPa e  $E_i = 32000$  MPa.

La tonalite dell'Adamello è una roccia plutonica contenente in massima parte plagioclasio, quarzo (meno del 10%), orneblenda e biotite. La dimensione media dei grani è 1.50 mm (0.70 ÷ 3.00 mm). I parametri geomeccanici principali sono:  $\sigma_c = 150$  MPa;  $E_s = 45000$  MPa e  $E_i = 20000$  MPa.

L'arenaria di Monticello è una roccia sedimentaria composta principalmente da quarzo (dimensioni del grano pari a 0.10 mm); il cementante è carbonatico. I parametri geomeccanici principali sono:  $\sigma_c = 75$  MPa;  $E_s = 13500$  MPa e  $E_i = 8000$  MPa.

### 3. Procedura sperimentale

Le prove sono state eseguite facendo riferimento a tre metodologie sperimentali: *Chevron Bend* (CB), *Short Rod* (SR) e *prova stabile di trazione diretta su provini cilindrici con intaglio anulare* (Cylinder with Anular Notch - CAN).

Le prove CB e SR sono state eseguite seguendo le indicazioni proposte dalla Commissione ISRM sui Metodi di Prova raccolte in «Raccomandazioni per la Determinazione della Tenacità a Frattura di Materiali Rocciosi» [ISRM, 1988].

La prova CAN si basa su esperienze condotte da Hilleborg, sul comportamento a frattura del calcestruzzo. I risultati ottenuti hanno consentito la messa a punto di un modello di meccanica della frattura non lineare, chiamato *Modello della Frattura Fittizia* [HILLEBORG *et al.*, 1976], nel quale le prove stabili di trazione diretta hanno un ruolo fondamentale [PETERSSON, 1981].

#### 3.1. Chevron Bend (CB)

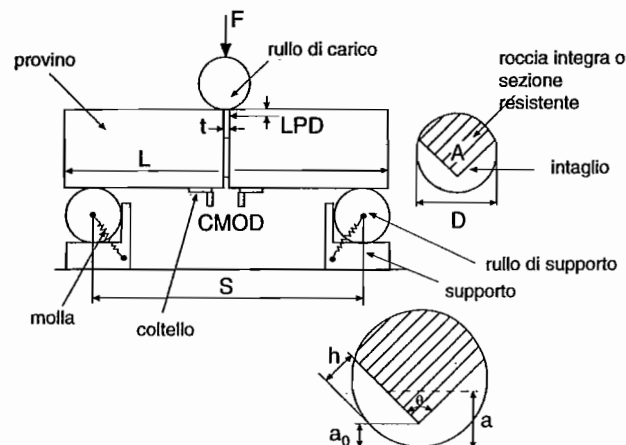
Il provino usato per la prova CB ha un intaglio perpendicolare all'asse della carota, come mostrato in Figura 1, nella quale sono riportati anche geometria e dimensioni.

La macchina di prova adoperata è rigida e servocontrollata elettromeccanicamente, con capacità di carico di 0.2 MN ed è stata usata anche per le prove SR e CAN. Comando, controllo ed acquisizione dei dati di prova sono gestiti automaticamente da calcolatore.

In Figura 2 è riportata l'assonometria esplosa dell'attrezzatura di prova.

Il carico è stato misurato con la cella di carico della macchina di prova; lo spostamento del punto di applicazione del carico e l'apertura dell'intaglio per l'in-

nescio della frattura sono stati misurati rispettivamente con un trasduttore LVDT ed un calibro a grafetta (DD1).



LEGENDA	
D	diametro del provino "chevron bend" (50 mm)
S	distanza tra i punti di appoggio, 3.33 D (166.5 mm)
$\theta$	angolo dello chevron, 90°
$a_0$	distanza dell'apice dello chevron dalla superficie del provino, 0.15 D (7.5 mm)
a	lunghezza della fessura
t	larghezza dell'intaglio (1.3 mm)
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. 1 - Provino Chevron Bend.

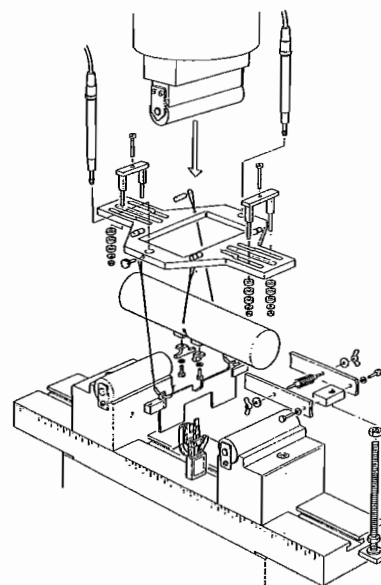


Fig. 2 - Apparecchiatura di prova Chevron Bend.

Sono state eseguite prove sia di livello I che di livello II, come suggerito dalle raccomandazioni ISRM. In particolare, la tenacità a frattura della roccia ( $K_{IC}$ ) è stata calcolata al livello I per mezzo della relazione seguente, basata sul carico massimo ( $F_{max}$ ) raggiunto durante le prove:

$$K_{IC} = \frac{A \cdot F_{max}}{D^{1.5}} \quad (1)$$

dove:

D: diametro del provino;

A: dipende dalla distanza dell'apice della V dalla superficie del provino ( $a_0$ ) e dalla distanza tra i punti di supporto (S).

Nella Prova di livello II, l'incremento dell'apertura dell'intaglio (Crack Mouth Opening Displacement - CMOD) rilevato con il DD1 è stato usato come segnale di controllo al fine di eseguire la prova in controllo di spostamento.

Si sono resi necessari cicli di carico-scarico anche nella parte post rottura del diagramma. Tale *curva completa*, come noto, si può ottenere solamente usando una pressa rigida.

Per tenere conto dell'effetto scala, sono stati determinati graficamente dal diagramma *F-CMOD* due parametri, come mostrato in Figura 3:

$$1) \quad p = \frac{x_u}{x_1} \quad \text{grado di non-linearità}$$

2)  $F_c$ : carico da usare al posto di  $F_{max}$  a causa del comportamento non lineare del provino.

La tenacità al livello II può essere calcolata nel modo seguente:

$$K_{IC}^c = K_{IC} \cdot M \quad (2)$$

dove M, coefficiente di correzione di non-linearità, è dato da:

$$M = \frac{F_c}{F_{max}} \cdot \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \quad (3)$$

Quantunque le *Raccomandazioni* ISRM siano state messe a punto principalmente per il calcolo della tenacità, è possibile stimare l'Energia di Frattura,  $G_f$ , riferendosi all'area della curva completa del diagramma *carico-spostamento del punto di applicazione del carico*, come descritto in seguito nella parte dedicata ai procedimenti di calcolo di prove di trazione diretta stabili.

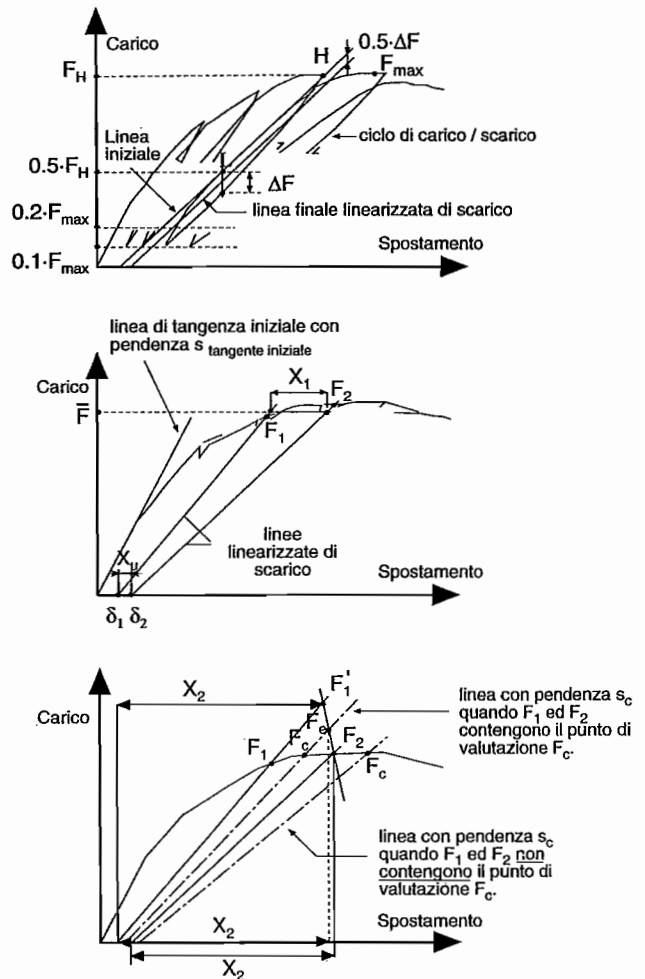


Fig. 3 - Principi della correzione di non-linearità [ISRM, 1988].

### 3.2. Short Rod (SR)

I provini SR usati nella prova presentano un intaglio a forma di V eseguito lungo l'asse della carota, come mostrato in Figura 4. I provini SR impiegati possono derivare dai due pezzi in cui il provino si è rotto durante la prova CB.

Come mostrato in Figura 5, il provino SR è sottoposto a trazione verticale durante la prova per mezzo di due piastre in lega d'acciaio incollate sulle facce terminali del provino. Anche in tal caso, il CMOD è misurato durante la prova mediante un calibro a graffetta (DD1).

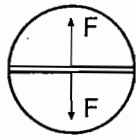
Sono state eseguite prove sia di livello I che di livello II.

Il fattore di intensificazione critica delle tensioni al livello I è stato valutato con la relazione seguente:

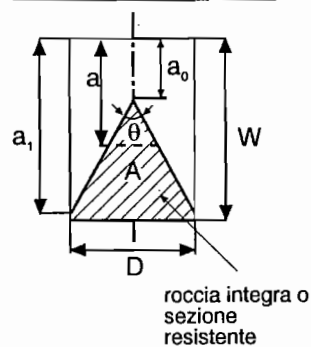
$$K_{IC} = \frac{24F_{max}}{D^{1.5}} \quad (4)$$

Valori corretti di  $K_{IC}$  e di  $G_f$  possono essere ottenuti nello stesso modo descritto per la prova CB.

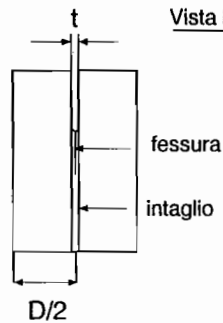
## Vista dell'estremità



## Vista della sezione mediana



## Vista laterale



## LEGENDA

D	diametro del provino short rod (50 mm)
W	lunghezza del provino, 1.45 D (72.5 mm)
$\theta$	angolo della V, 54.6°
a	lunghezza della fessura
$a_0$	distanza dell'apice della V e la superficie del provino, 0.48 D (24 mm)
$a_1$	profondità massima dell'intaglio
t	larghezza dell'intaglio (1.3 mm)
A	area della sezione resistente in proiezione
F	carico sul provino

Fig. 4 - Provino Short Rod.

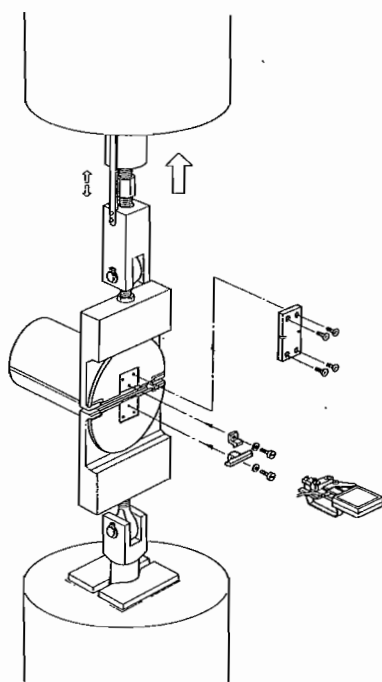


Fig. 5 - Apparecchiatura di prova Short Rod.

## 3.3. Cilindro con intaglio anulare (CAN)

Il provino CAN usato nella prova stabile di trazione diretta ha un intaglio anulare ricavato perpendicolarmente all'asse della carota, come mostrato in Figura 6. Il sistema di fissaggio delle parti terminali del provino è simile a quello normalmente impiegato nelle prove su barre metalliche (coppie opposte di cunei a V, con superfici ruvide per migliorare la presa).

Il CMOD, usato come segnale di *feedback* al fine di eseguire la prova in controllo di spostamento, è stato determinato come valor medio delle letture ottenute da tre calibri a graffetta posti ad intervalli di 120° attorno all'intaglio anulare.

L'intaglio nel provino assieme all'elevata rigidità della macchina di prova ha reso possibile ottenere una curva completa del comportamento della roccia in condizioni di trazione diretta.

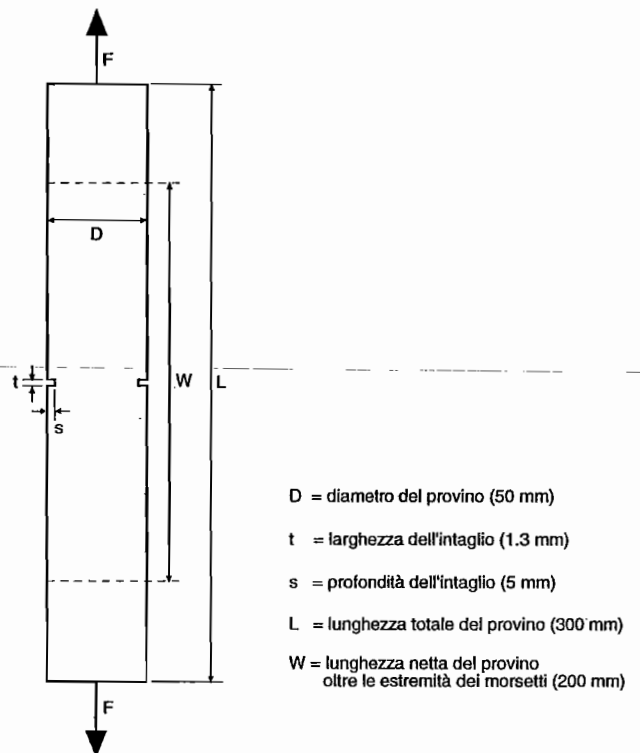


Fig. 6 - Provino cilindrico con intaglio anulare per prova stabile di trazione diretta.

In accordo con l'approccio proposto dalla Scuola Svedese per la meccanica della frattura del calcestruzzo e considerando le modifiche introdotte attraverso il provino CAN per tener conto della forma usuale delle carote di roccia, da una curva completa *carico di trazione-CMOD*, del tipo di quella riportata in Figura 7, è possibile fare le seguenti considerazioni:

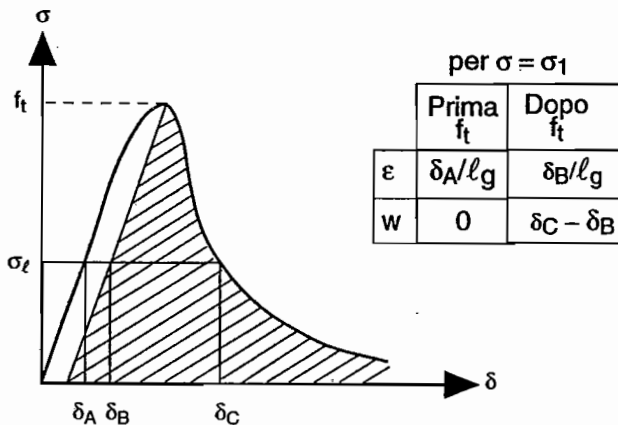


Fig. 7 - Determinazione dell'Energia di Frattura da prova stabile di trazione diretta.

- 1) L'energia di frattura è legata solamente all'apertura effettiva della frattura, mentre durante la fase elastica iniziale fino alla rottura il carico è sopportato dall'intera lunghezza del provino al di fuori della zona di frattura; per tale motivo  $G_f$  si calcola come:

$$G_f = \frac{w_t}{A} \quad (5)$$

dove:

$w_t$ : area tratteggiata di Figura 7;

$A$ : area della sezione resistente.

- 2) Nel calcolo di  $w_t$ , la parte di area non tratteggiata non viene considerata per tenere conto degli effetti di plasticità; tale area residua si ottiene graficamente tracciando una retta passante per il punto di picco del diagramma e parallela alla pendenza iniziale della curva.

Il corrispondente fattore di amplificazione delle tensioni,  $K_{IC}$ , si può ricavare dalla relazione [CARPINTERI, 1986]:

$$K_{IC} = \sqrt{G_f E} \quad (6)$$

dove:

$E$ : modulo elastico del provino di roccia;

$G_f$ : energia di frattura.

### 3.4. Note sulla preparazione dei provini e sull'apparecchiatura di prova

Una prima osservazione riguarda la preparazione dei provini, in particolare dell'intaglio a V per le prove CB e SR e anulare per la prova CAN.

Per creare intagli della forma desiderata, oltre ad una sega circolare molto sottile, facilmente disponibile, occorrono una grande cura e speciali utensili.

Considerazioni simili si possono fare riguardo agli speciali accorgimenti adottati nelle prove CB e SR sia per assicurare un corretto allineamento del provino e un corretto posizionamento delle selle rispetto agli LVDT, sia per adattare i coltelli sul provino.

Tutti questi aspetti influenzano molto la procedura di prova, sia in termini di tempo che di qualità dei risultati.

Da questo punto di vista, le prove su provini CAN sono più semplici e veloci da eseguire.

## 4. Risultati

Nella Tabella I sono riportati i valori dell'Energia di Frattura,  $G_f$ , e della Tenacità,  $K_{IC}$ , determinati per i quattro litotipi in esame con modalità di prova CAN, CB e SR. Nella tabella vengono confrontati solamente i valori di tenacità non corretti (livello I), poiché solo pochi casi di sequenze di carico-scarico erano adatti per la determinazione del coefficiente di correzione di non-linearità. I valori calcolati del coefficiente  $M$  sono riportati nella Tabella II. In Tabella III sono invece riportati i rapporti tra i valori dei parametri ottenuti con i tre metodi di prova.

Dall'analisi di tali risultati e considerando le metodologie seguite per la loro determinazione, si può osservare quanto segue:

- 1) tutti i litotipi presentano un comportamento non lineare, a prescindere dal metodo di prova; in particolare i provini CB mostrano il grado di non linearità maggiore (Tab. II). Da ciò deriva la grande attenzione che si deve prestare per evitare errori legati alla valutazione grafica dei coefficienti  $M$ , a causa di:
  - a) la grande dipendenza di  $M$  dall'angolo di tangenza iniziale (ad esempio, una variazione angolare di  $4^\circ$  può portare ad un errore anche superiore al 40%);
  - b) grande dipendenza dell'angolo di tangenza iniziale dal precarico applicato ad inizio prova e dal tracciamento della tangente iniziale, sempre piuttosto soggettivi.
- 2) In termini di valori medi di tenacità ed energia di frattura (Tab. III) si è trovato un buon accordo nei risultati per quanto riguarda il marmo e, in misura minore, la diorite; si registrano differenze anche significative per la tonalite e, soprattutto, per l'arenaria.
- 3) Generalmente i valori di tali grandezze ottenuti con le prove SR sono minori dei corrispondenti CB, fino al 50% nel caso dell'arenaria, mentre i valori ottenuti da prove CAN si collocano tra i dati SR e CB.

Tabella I - Valori medi e deviazione standard della tenacità a frattura  $K_{IC}$  [MPa·√m], e dell'Energia di Frattura  $G_f$  [N/m].

Prova		Diorite	Tonalite	Arenaria	Marmo
	n. di prove	10	8	6	13
CB	$K_{IC}$ (± D.S.)	1.571 (0.101)	1.766 (0.212)	1.215 (0.092)	1.270 (0.334)
	n. di prove	13	10	8	21
SR	$K_{IC}$ (± D.S.)	1.402 (0.328)	1.340 (0.191)	0.681 (0.158)	1.061 (0.307)
	n. di prove	4	4	4	5
CAN	$K_{IC}$ (± D.S.)	1.341 (0.174)	1.406 (0.224)	0.991 (0.188)	1.187 (0.166)
	n. di prove	2	6	4	13
CB	$G_f$ (± D.S.)	106.34 (-)	160.08 (23.60)	142.75 (13.88)	62.88 (-)
	n. di prove	8	7	6	16
SR	$G_f$ (± D.S.)	117.10 (33.40)	98.71 (9.96)	71.89 (16.94)	62.18 (11.00)
	n. di prove	4	4	4	5
CAN	$G_f$ (± D.S.)	89.96 (11.29)	104.91 (5.56)	116.87 (22.44)	64.49 (8.97)

Tabella II - Valori medi del fattore di correzione di non-linearità, M, per prove CB e SR.

Litotipo	M (CB)	M (SR)
Diorite	2.36	1.44
Tonalite	2.10	1.32
Arenaria	1.53	1.57
Marmo	1.98	1.53

4) In accordo con le esperienze condotte da Meredith [1989], i valori di tenacità a frattura sono funzione della composizione mineralogica della roccia, aumentando al crescere delle dimensioni dei grani della roccia e diminuendo all'aumentare del contenuto di quarzo e calcite.

### 5. Discussione dei risultati

Sono stati presentati alcuni risultati sperimentali di prove CB, SR e CAN, eseguite su quattro litotipi. A causa del carattere preliminare dei risultati, non

si possono fare valutazioni conclusive. Come contributo alla discussione, si può tuttavia osservare che:

- 1) I valori di Tenacità e di Energia di Frattura ottenuti con i tre metodi di prova sono compresi entro un intervallo ragionevole. Tuttavia sono state osservate alcune differenze, qualche volta considerevoli (Tab. III).
- 2) La prova CB è affetta da un alto grado di non-linearità.
- 3) 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.
- 4) La determinazione grafica del coefficiente di correzione della non-linearità è spesso influenzata dall'interpretazione soggettiva del punto di tangenza iniziale alla curva sperimentale.

Tutte le difficoltà incontrate nelle prove CB e SR possono essere superate ricorrendo alla prova di Trazione Diretta Stabile su provini con intaglio anulare (CAN).

Tabella III - Rapporti tra i valori di tenacità ed energie di frattura ottenuti con i tre metodi di prova.

	Diorite		Tonalite		Arenaria		Marmo	
	$K_{IC}$	$G_f$	$K_{IC}$	$G_f$	$K_{IC}$	$G_f$	$K_{IC}$	$G_f$
CB/CAN	1.17	1.18	1.26	1.53	1.23	1.22	1.07	0.98
SR/CAN	1.05	1.30	0.95	0.94	0.69	0.62	0.89	0.96
CAN	1.341	89.96	1.406	104.91	0.991	116.87	1.187	64.49
CB/SR	1.12	0.91	1.32	1.62	1.78	1.99	1.20	1.01

Lo studio è tutt'ora in corso di svolgimento e molti degli effetti che influenzano le prove CB, SR e CAN dovranno ancora essere studiati; in particolare sarà eseguito lo stesso tipo di prove sugli stessi litotipi con diverse dimensioni dei provini per individuare l'entità dell'influenza della dimensione dei provini sui parametri di tenacità.

## Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano l'ISMES-DPM di Bergamo per la fattiva collaborazione prestata nella messa a punto delle metodologie di prova impiegate.

## BIBLIOGRAFIA

- BARLA G. e ZANINETTI A. (1986) - *Hydraulic fracturing testing method for rock stress measurements in Italy*. Int. Symp. on Rock Stresses, Stoccolma, Svezia.
- CARPINTERI A. (1986) - *Mechanical damage and crack growth in concrete*. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- HILLEBORG A. et al. (1976) - *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*. Cement and Concrete Res., 6, pp. 773-782.
- INGRAFFEA A.R. (1987) - *Theory of crack initiation and propagation in rock*. Fracture Mechanics of Rock. Academic Press, Londra, pp. 71-110.
- ISRM (1988) - *Suggested methods for determining fracture toughness of rock*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25, pp. 433-483.
- MATSUKI K. et al. (1991) - *Specimen size requirements for determining the inherent fracture toughness of rock according to the ISRM Suggested Methods*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 28, pp. 365-374.
- MEREDITH P.G. (1989) - *Comparative fracture toughness of rocks*. Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy. Balkema, pp. 265-277.
- PETERSSON P.E. (1981) - *Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials*. Report TVBM, 1006, Lund Inst. of Technology.
- SCAVIA C. (1990) - *Fracture mechanics approach to stability analysis of rock slopes*. Engineering Fracture Mechanics, 35, pp. 899-910.

## SUMMARY

### Direct tensile test for the evaluation of rock fracture mechanics parameters

The principal aim of this research is to make a contribution to the identification of a reliable and easy to perform testing technique for evaluating both fracture toughness and energy release rate. To this end, several Stable Direct Tensile, Chevron Bend and Short Rod tests were performed on four types of rock, all of them widely used in the building industry or commonly encountered during excavation in Italy.

Four types of rock were considered in this study: marble, diorite, tonalite and sandstone.

*Carrara Marble* is a metamorphic calcareous rock, with saccharoidal texture, consisting almost entirely of calcite. Average grain size is 0.18 mm (0.05-0.40 mm) and quartz content is lower than 5%. The following parameters were determined from uniaxial compression tests: strength ( $\sigma_c$ ) = 110 MPa; secant ( $E_s$ ) and initial tangent ( $E_i$ ) Young modulus = 60,000 and 26,000 MPa, respectively.

*Anzola Diorite* is a silicate rock with granite features and gabbro composition. Mean grain size is 1.30 mm (0.25-2.00 mm) and quartz

content is lower than 5%. The main geomechanics parameters are:  $\sigma_c = 220$  MPa,  $E_s = 75.000$  MPa and  $E_i = 32.000$  MPa.

*Adamello Tonalite* is a plutonic rock containing major plagioclase, quartz (less than 10%), hornblende and biotite. Mean grain size is 1.50 mm (0.70-3.00 mm). The main geomechanics parameters are:  $\sigma_c = 150$  MPa,  $E_s = 45.000$  MPa and  $E_i = 20.000$  MPa.

*Monticello Sandstone* is a sedimentary rock composed mainly of quartz (grain size = 0.10 mm); cement is carbonatic. The main geomechanics parameters are:  $\sigma_c = 75$  MPa,  $E_s = 13.500$  MPa and  $E_i = 8.000$  MPa.

The tests were performed by three methods, and namely: *Chevron Bend* (CB), *Short Rod* (SR) and *stable direct tensile testing on Cylindrical specimens with Annular Notch* (CAN).

CB and SR tests were performed according to the Suggested Methods for Determining the Fracture Toughness of Rock Materials proposed by the ISRM Commission on Testing Methods [ISRM, 1988]. Can tests were carried out on the basis of the investigation conducted by Hillerborg and his colleagues on the fracture behaviour of concrete. They developed a new non-linear fracture model, called *Fictitious Crack Model* [HILLERBORG et al., 1976], where the stable direct tensile test plays a fundamental role [PETERSSON, 1981].

The CB specimens used in the tests had a notch cut perpendicularly to the core axis as shown in Figure 1, where geometry and sizes are also given. The specimens were tested in an electro-mechanical servo-controlled stiffness testing machine with a loading capacity of 0.2 MN. The same machine was also used for all the SR and CAN tests. An exploded view of the testing set-up is given in Figure 2.

The load was measured with the load cell of the testing machine; load point displacement and crack mouth opening displacement (CMOD) were measured by means of an LVDT transducer and a clip gauge, respectively. The experimental programme included both level I and II tests.

Fracture toughness of the rock ( $K_{IC}$ ) was determined from level I tests on the basis of the maximum load ( $F_{max}$ ) attained, as follows:

$$K_{IC} = \frac{A \cdot F_{max}}{D^{1.5}} \quad (1)$$

where: D is specimen diameter and A depends on the Chevron tip distance from specimen surface ( $a_0$ ) and the distance between support points (S).

In level II testing, crack-mouth opening displacement (CMOD) was used as a feedback signal to run the tests at a constant displacement rate.

Loading-unloading cycles need to be performed even in the post-failure part of the diagram. This so-called *complete curve* can be determined only by using a stiffness machine.

Two parameters were determined graphically from the *F-CMOD* diagram (as summarised in Figure 3) in order to take into account size effects, and namely: the degree of non-linearity, p ( $x_u/x_l$ ), and the load,  $F_c$ , to be used in lieu of  $F_{max}$  due to the non-linear behaviour of the specimen.

Level II toughness,  $K_{IC}^c$  can be computed as:

$$K_{IC}^c = K_{IC} \cdot M \quad (2)$$

where the non-linearity correction coefficient, M, is given by:

$$M = \frac{F_c}{F_{max}} \cdot \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \quad (3)$$

Even though the *ISRM Suggested Methods* were developed primarily for toughness computations, an estimate of the Fracture Energy,  $G_f$ , can be obtained by referring to the area of the load-load point displacement complete curve, as described later for computational procedures of stable direct tensile tests.

The SR specimens used in the tests had a chevron notch cut along the core axis, as shown in Figure 4. They were produced from the CB specimens that split during Chevron testing.

As shown in Figure 5, the SR specimen was held in a vertical position in the testing machine by means of two end plates of alloyed

steel glued to the end faces of the specimen. CMOD was measured by means of a clip gauge.

Level I and II tests were performed. Level I critical stress intensity factor was evaluated as follows:

$$K_{IC} = \frac{24F_{max}}{D^{1.5}} \quad (4)$$

The *CAN specimens* used in stable direct tensile tests had an annular notch cut perpendicularly to the core axis as shown in Figure 6. The gripping system applied to the ends of the specimen was similar to that normally used for tests on metallic rods (opposite pairs of chevron wedges, with rough surfaces for improved grip). CMOD, used as a feedback signal to run the test at a constant rate, was determined as the mean value of the readings obtained from three clip gauges located at 120° intervals around the annular notch.

The notch, combined with the stiffness of the machine, made it possible to obtain a stable complete curve of rock behaviour under direct tensile test.

According to the approach proposed by the Swedish School for Concrete Fracture Mechanics and by considering the modification introduced through the *CAN* specimen in order to take into account the usual core shape of rocks, from a load vs. CMOD complete curve tensile (Figure 7) it is possible to draw the conclusions summarised below:

- 1) fracture energy is related only to effective crack opening, while during the initial elastic phase up to failure, the load is carried by the entire length of the specimen outside the fracture zone is working; for this reason  $G_f$  must be calculated as:

$$G_f = \frac{w_t}{A} \quad (5)$$

- where  $w_t$  is the shaded area in Figure 7 and  $A$  is the ligament area;
- 2) in the computation of  $w_t$  the remaining portion of the total area is disregarded in order to take into account plasticity effects; this residual area is obtained graphically by drawing a straight line running parallel to the initial slope of the curve and passing through the peak point of the diagram.

The corresponding stress intensity factor,  $K_{IC}$ , may be obtained through the following relationship:

$$K_{IC} = \sqrt{G_f E} \quad (6)$$

where  $E$  is the elastic modulus of the rock specimen and  $G_f$  is the fracture energy.

We can make a few comments on specimen preparation and testing set-up. A first observation concerns specimen preparation, and especially notch cutting for *CB*, *SR* and *CAN* tests. In addition to a very thin diamond wheel saw, which is readily available, it takes great care and special tools to produce chevron cuts of the desired shape.

The same applies to the special devices employed in *CB* and *SR* tests to ensure correct specimen alignment, to position the saddles

with respect to LVDT gauges and fit the knife edges to the specimens. All these aspects affect *CB* and *SR* testing procedures greatly, in terms of time consumption and quality of the results. Tests on *CAN* specimens are easier and faster to perform.

Let us now briefly examine the results obtained. Table I gives the Fracture Energy,  $G_f$ , and Toughness,  $K_{IC}$ , values determined for the four rock types according to *CAN*, *CB* and *SR* testing methods. Only non corrected toughness values are compared in the table because only a few loading/unloading sequences were suitable for the determination of the non-linearity correction coefficient. Computed,  $M$ , values are given in Table II.

From an analysis of these results the following observations can be made:

- 1) For all types of rock, whatever the testing method, a non linear behaviour was observed, *CB* specimens showing the highest degree of non-linearity. Special attention should be paid to possible errors made in the graphical evaluation of the  $M$  coefficients because of the:
  - a. great dependence of  $M$  on the initial tangent angle (e.g., a 4° variation in the angle was seen to lead to an error of up to 40%);
  - b. great dependence of the initial tangent angle on pre-loading and initial tangent plotting.
- 2) In terms of  $K_{IC}$  or  $G_f$  average values, a good agreement in the results was found for marble and, at a lesser extent, for diorite; differences were found for tonalite and, above all, for sandstone.
- 3) Generally *SR* test results are lower than the corresponding ones obtained from *CB* tests; *CAN* test results are somewhere in between *SR* and *CB* values.
- 4) As already observed by Meredith [1989], fracture toughness values increase with increasing rock grain sizes; as a function of the mineralogical composition of rocks, fracture toughness values decrease with increasing quartz and calcite content.

On account of the provisional nature of the results, no conclusions can be drawn. As a contribution to the discussion, the following observations can be made:

- 1) Fracture Energy and Toughness values obtained through the three testing methods are comprised in a reasonable interval. Nevertheless a few differences, sometimes very considerable ones, were observed.
- 2) *CB* testing gives results which, for the specimen sizes tested, seem to be less reliable than those obtained from other tests; this fact can be ascribed to a high degree of non-linearity.
- 3) The preparation of chevron notched specimens, their alignment in special devices and arrangement in the loading machine, are not simple, easy and fast to perform.
- 4) The testing procedures (level I and II) employed for *CB* and *SR* testing are not always easy to carry out.
- 5) The graphical determination of the non-linearity correction coefficient is often influenced by the subjective interpretation of the initial tangent.

The difficulties encountered in *CB* and *SR* testing can be overcome by resorting to the stable direct tensile test on *CAN* specimens.

The matter will be investigated further, and many of the effects influencing *CAN* tests will have to be assessed; in particular, the same types of tests are being carried out on the same types of rock with different specimen sizes, in order to assess the significance of the «scale effect» on toughness parameters.