

Sulla misura della resistenza a trazione in rocce anisotrope

Tiziana Apuani*

Sommario

Si presentano i risultati ottenuti sottoponendo campioni di ortogneiss a *Hoop Tension Test* – prova di trazione per carico unidirezionale applicato internamente a campioni cilindrici cavi. Si sottolineano le difficoltà e i meriti di questa metodologia di prova, relativamente nuova. I valori di resistenza così ottenuti si confrontano con quelli per trazione diretta e per compressione diametrale.

1. Introduzione

La determinazione della resistenza a trazione in materiali fragili è importante perchè la propagazione di fratture, anche se indotte dall'applicazione di carichi di compressione, sfrutta la coalescenza di fratture di trazione sviluppatesi all'apice di microfratture preesistenti [BIENIAWSKY, 1967a, b; REYS *et al.*, 1991]. Questo vale in particolare per mezzi rocciosi anisotropi le cui tessitura e microfratture sono orientati.

Se la resistenza a trazione è il massimo sforzo di trazione per il quale la roccia giunge a rottura, il più immediato e logico metodo di prova per la determinazione delle resistenze a trazione sembra la trazione diretta (Fig. 1-1). Le difficoltà di esecuzione, specialmente in roccia, sono però notevoli, così come difficoltosa è la preparazione di campioni orientati in diverse direzioni.

Buona parte dell'attività di ricerca dagli anni '60 si è protesa sia al miglioramento della configurazione di prova per trazione diretta sia alla definizione di metodologie alternative che provocano rottura in condizioni di trazione indiretta: prova per compressione diametrale di campioni discoidali (Prova Brasiliana) o di campioni a sezione anulare (*Ring Test*), prova di resistenza a flessione, prove di trazione con carico idraulico o unidirezionale applicato all'interno di campioni cilindrici cavi (*Hoop Tension Test*) (Fig. 1).

In pratica i valori di resistenza a trazione ottenuti mediante prove diverse possono essere differenti e risultano fortemente dipendenti dalla metodologia, oltre che dal volume e dalla geometria del campione. Ciascun metodo di prova ha ricevuto critiche per le difficoltà pratiche o per la risoluzione teorica ma hanno suscitato particolare inte-

resse la prova brasiliana e il *Ring Test* e negli anni Novanta, lo *Hoop Tension Test*. In questo studio si confrontano i risultati ottenuti con lo *Hoop Tension Test*, trazione diretta e prova di compressione diametrale condotte su campioni orientati di ortogneiss Antigorio.

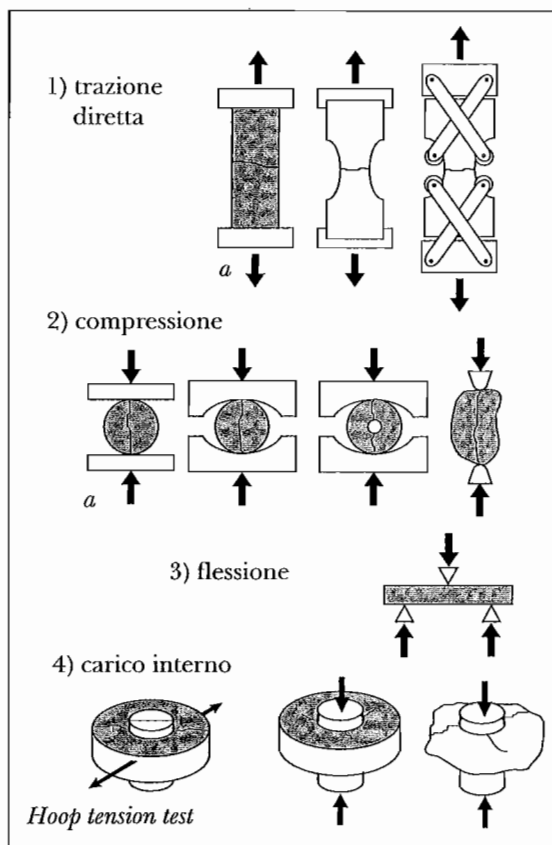


Fig. 1 – Rappresentazione schematica di alcune prove di laboratorio per la determinazione della resistenza a trazione, diretta 1) o indiretta 2), 3), 4) di roccia intatta.
Fig. 1 – Sketch of some laboratory test for the determination of tensile strength of rock samples by direct tension (1) or indirect tests (2, 3, 4).

* Università degli Studi di Milano, Dipartimento Scienze della Terra.

2. Strategia di campionamento

Il materiale oggetto di studio è un ortogneiss granodioritico a grana medio-fine in facies metamorfica anfibolitica, costituito per il 27% da quarzo, 56% da feldspati (prevalentemente plagioclasici), il 15% da miche (biotite e subordinata muscovite) e il 2% di epidoto, zircone, apatite. È caratterizzato da una scistosità penetrativa, tessitura occhiadina e lineazione dovuta all'allineamento di minerali appiattiti e allungati, tessitura che conferisce alla roccia un'anisotropia ortorombica. Appartiene alla Falda Antigorio dell'Unità Pennidica inferiore dell'edificio alpino occidentale. È stato campionato in località Alpiano superiore (Domodossola-VB) presso la cava Moro Serizzo. Il litotipo è commercialmente noto come Serizzo Antigorio, pietra da costruzione e ornamentale dalle ampie applicazioni: edilizia civile ed industriale, arredo urbano, arredamento e arte funeraria.

Un sistema di coordinate di riferimento, X,Y,Z, è scelto in base al fabric, essendo Z la perpendicolare al piano di scistosità, X la direzione di massimo allungamento dei cristalli, Y la direzione ortogonale a X e Z.

Da un volume di circa 2 m³ di ammasso roccioso sono stati estratti mediante perforazione e sparo leggero tre blocchi delimitati dalla superficie di scistosità (piano XY), dal piano a questa perpendicolare e contenente la direzione di massimo allungamento dei cristalli (piano XZ) e dal piano normale ai due (piano YZ). In Fig. 2 è sintetizzata la strategia di campionamento. In ciascuna direzione di riferimento sono stati carotati quattro cilindri e mediante carotaggio coassiale si sono ottenuti: cilindri cavi (diametro esterno ≈ 14 cm; diametro interno ≈ 6 cm, altezza ≈ 30 cm) e le relative carote interne (diametro ≈ 5 cm). Dai cilindri cavi sono stati tagliati due gruppi di quattro campioni ad anello dello spessore di circa 2, 2.7, 3.7, 4.8 cm destinati allo *Hoop Tension Test* e ottenute carote di piccolo diametro (≈ 2.6 cm) per la prova di trazione diretta. Anche tre campioni cilindrici di diametro ≈ 5 cm sono stati utilizzati per la trazione diretta. Dalle carote interne si sono ricavati i dischi da sottoporre a prova di compressione diametrale (diametro ≈ 5 cm e spessore ≈ 2.5 cm). La geometria e le dimensioni dei campioni da sottoporre ad *Hoop Test* è stata scelta in accordo con quanto suggerito da PARK *et al.* [1995].

Tutti i campioni di roccia sono stati sottoposti a prova solo dopo essiccazione mediante P₂O₅.

3. Hoop Tension Test

3.1. Principi-strumentazione e procedure sperimentali

XU *et al.* nel 1988 introducono, con il nome di *Hoop Tension Test*, una nuova metodologia di prova,

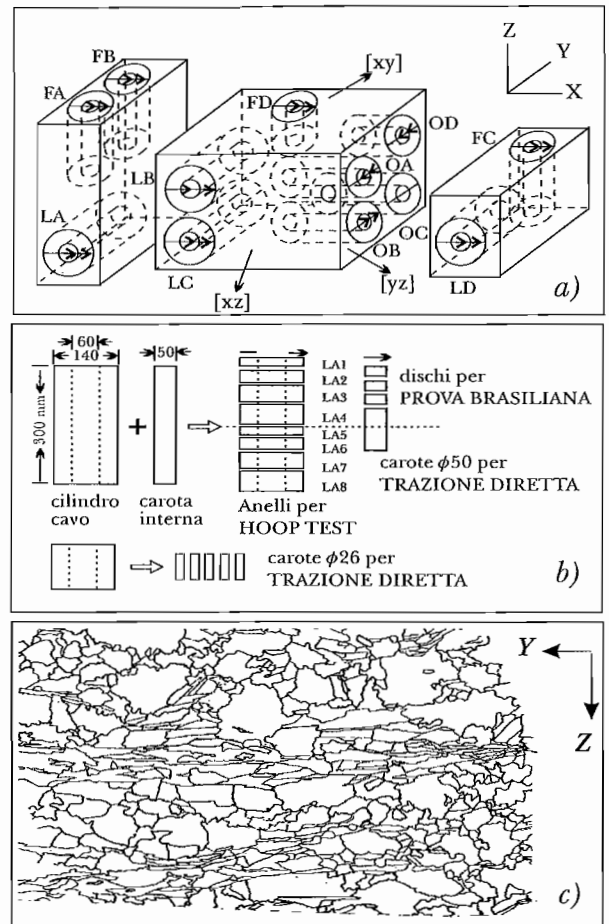


Fig. 2 - Strategia di campionamento: a) orientazione relativa dei cilindri di roccia; b) relazione geometrica tra i campioni; c) schizzo della tessitura dello gneiss Antigorio sul piano ZY (scala: × 10).

Fig. 2 - Sketch of sampling strategy: a) relative orientation of rock cylinders with respect to the reference co-ordinate system; b) geometrical relationship among samples; c) textural characters of an Antigorio ZY thin section (scale × 10).

sviluppata presso il Department of Geology, Imperial College-London, per determinare la resistenza a trazione di campioni di roccia sagomati ad anello portati a rottura applicando una forza di carico sulla loro superficie laterale interna.

Due piastre semicilindriche rigide, con all'interno un pistone di carico connesso ad una pompa idraulica, sono inserite nell'anello di roccia e separate normalmente alla direzione di applicazione della forza. In Fig. 3a si riporta uno schema della strumentazione. La prova è eseguita fissando incrementi di carico (σ^*) costanti; nel nostro caso si è scelto $\sigma^* = 3.3$ MPa/min. Le pressioni e la posizione del pistone sono monitorate durante la prova grazie al sistema di controllo digitale di cui è fornita la pompa e trasferiti su personal computer con intervallo di acquisizione di 1.2 secondi. Il movimento

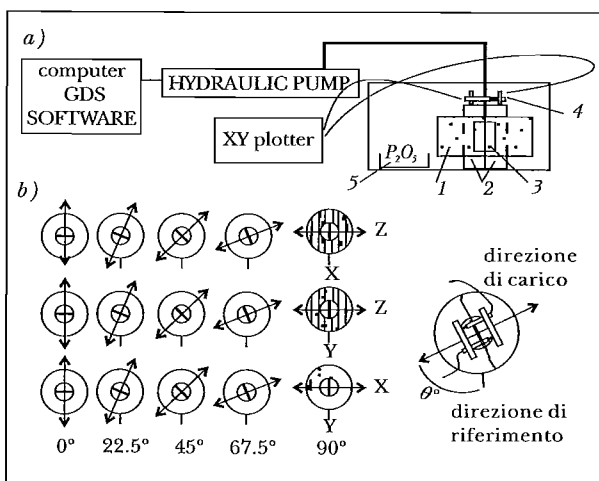


Fig. 3 - a) Schema della strumentazione per Hoop Tension Test: 1- campione, 2- piastre di carico, 3- pistone di carico, 4- LVDT, 5- agente essiccante; b) quindici direzioni di trazione.

Fig. 3 - a) Hoop Test Apparatus: 1-sample, 2-loading platens, 3-loading jack, 4-linear variable displacement transducers, 5-drying agent; b) plan view of sample set up and loading directions.

delle piastre, parallelo alla linea di carico, è rilevato da due misuratori di spostamento (LVDT- Linear Variable Displacement Transducers) montati sulla base superiore delle piastre e collegati ad un registratore grafico a due canali (XY plotter).

Per descrivere la distribuzione degli sforzi in un campione così sottoposto a prova JOHN *et al.* [1991] assumono il problema simmetrico rispetto a due piani diametrali ortogonali, quello che contiene la direzione di carico e quello di separazione delle piastre, ammettendo che i) tutta la superficie del campione sia uniformemente in contatto con le piastre

e che ii) la forza impressa unidirezionalmente si distribuisca in modo uniforme su tutta la superficie. Lo stato finale di sforzo è considerato la combinazione di trazione diretta e sollecitazione per flessione (Fig. 4a) e l'equazione che lo descrive è

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{N}{A} + \frac{M_x(A - rA_m)}{A_r(RA_m - A)} \quad (1)$$

dove: $\sigma_{\theta\theta}$ =sforzo circonferenziale, N=trazione normale; A=area trasversale dell'asta curva $= (r_o - r_i) * h$; h=spessore, r_o =raggio esterno, r_i =raggio interno del campione; $A_m = h * \ln(r_o/r_i)$; $R = (r_o + r_i)/2$; M_x =momento flettente sulla sezione che forma un angolo θ con il piano di separazione delle piastre.

Tale combinazione ha come risultato l'esistenza di un asse neutro (na) ortogonale alla direzione di carico che separa un campo di trazione e uno esterno di compressione (Fig. 4c); campi confermati da studi di fotoelasticità, da misure di deformazione mediante strain gauges [GENTIER *et al.*, 1991], da osservazioni e fractografia delle superfici di rottura [BUTENUTH *et al.*, 1994]. La posizione dell'asse neutro è funzione delle proprietà elastiche e delle caratteristiche geometriche del campione e varia con l'applicazione del carico. La distribuzione degli sforzi principali e di taglio, ottenuta dagli autori mediante analisi ad elementi finiti in 2D, in mezzo continuo, omogeneo isotropo a comportamento elastico lineare è in Fig. 4d-4e. Secondo tale stato di sforzi, la superficie di rottura ha origine dove la forza di trazione è massima ed è normale alla direzione di carico sul proseguimento del piano di separazione delle piastre. Per simmetria la rottura del campione ad anello dovrebbe avvenire simultaneamente sui lati opposti. Tale comportamento è stato sperimentalmente provato in alcuni

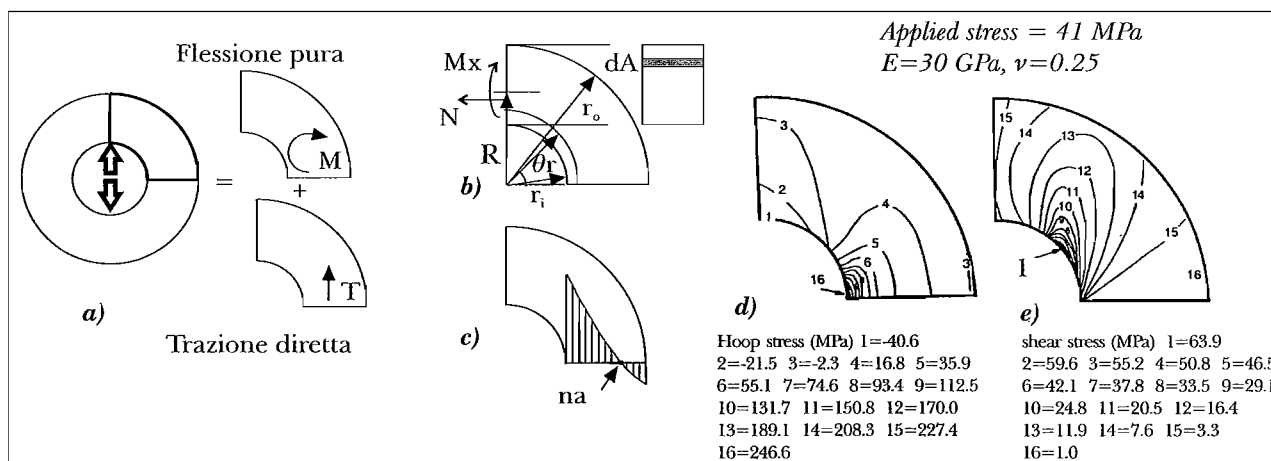


Fig. 4 - a) Hoop Tension Test: combinazione di trazione diretta e flessione; b) barra curva soggetta a flessione pura; c) distribuzione degli sforzi indotti; d) distribuzione degli sforzi principali (trazioni positive); e) di taglio dall'analisi ad elementi finiti. [da JOHN *et al.* 1991 - modificata].

Fig. 4 - a) Hoop Tension Test: direct tension plus pure bending; b) curved beam in pure bending, N= normal traction; c) d) hoop stress distribution (positive traction) and e) shear stress distribution from finite element analysis.

materiali naturali: arenaria, marmo [AL-SAMAHJI, 1992], calcare e granito [PARK *et al.*, 1994].

Nei casi semplici con fratture prossime a quelle teoriche, la resistenza a trazione per ciascuna direzione di carico si ricava come rapporto $\sigma_t = \Delta F / \Delta A$ [BUTENUTH *et al.*, 1993] ottenuto dal diagramma forza massima (F) – area di rottura teorica (A_c) di un gruppo di campioni di spessore crescente e quindi differente area. Materiali anisotropi mostrano invece un sistema di fratture più complesso che richiede ulteriori osservazioni.

3.2. Interpretazione dei risultati

Sono stati sottoposti a prova 60 campioni di roccia: gruppi di quattro campioni di diverso spessore carotati in ciascuna delle tre direzioni di riferimento (X,Y,Z), provati con carico applicato in cinque differenti direzioni (ogni 22.5° rispetto ad uno degli assi X,Y o Z – angolo θ) (Fig. 3b).

Solo in certe direzioni di carico i campioni mostrano superfici di rottura analoghe a quelle teoriche definite per mezzi isotropi. In base al numero e all'orientazione delle fratture rispetto alla direzione di carico, si possono riconoscere quattro tipologie di rottura, che risultano tipiche di una particolare configurazione di carico (Fig. 5).

Per calcolare la resistenza a trazione è necessario definire l'area di frattura relativa alla forza massima registrata, operazione non immediata nei casi di frattura multipla. Il riconoscimento della sequenza di rottura, visivamente rilevata durante la prova o ricostruita grazie ai due grafici spostamento piastre-tempo, ha consentito di considerare "fratture primarie", la cui area è da relazionarsi alla forza massima, la somma delle aree designate con lettera *a* e *b* in Fig. 5. L'area di ciascuna superficie di rottura è stata calcolata considerando la sua direzione rispetto alla teori-

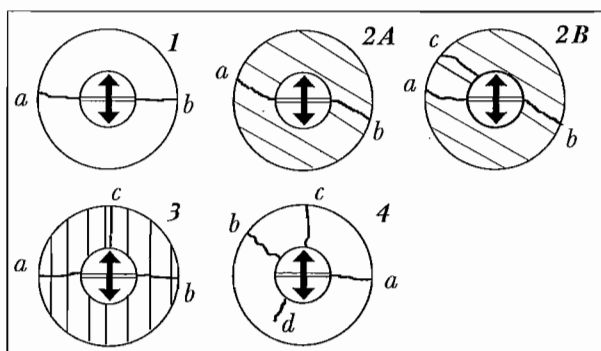


Fig. 5 – Rappresentazione schematica delle diverse tipologie di rottura da *Hoop Tension Test*. *a* e *b* fratture utilizzate per il calcolo delle resistenze.

Fig. 5 – Schematic presentation of different failure patterns for samples tested by *Hoop Tension Test*. *a*) and *b*) are the surface area used to calculate tensile strength.

ca (angolo α) e la sua immersione (angolo β) (Fig. 6a). Per simmetria, considerando un solo quadrante, α varia da 0° a 90°. La forza di trazione normale a ciascuna superficie di rottura è calcolata come $F'' = F' \sin \beta$, dove $F' = F \cos(90^\circ - \alpha)$ è la componente di *F* agente sul piano *xy* [BUTENUTH *et al.*, 1994] (Fig. 6b). Tranne che in pochi casi, in tutti i campioni si riconoscono due superfici "allineate" ($\alpha_a \approx \alpha_b$; $\beta_a \approx \beta_b$). È possibile calcolare $F''_{(a+b)}$ come media delle due $F''_{(a)}$ e $F''_{(b)}$ e considerare questa la forza da diagrammare verso $A_{(a+b)}$. I risultati di campioni sottoposti a prova nella stessa direzione di carico si allineano su una retta passante per l'origine con coefficiente di correlazione $R^2 > 0.99$ (fatta eccezione per due casi – gruppo OAI,2,3,4; gruppo OC1,2,3,4).

In Fig. 7 sono riportati i diagrammi F'' verso $A_{(a+b)}$ che si ottengono variando la direzione di carico su ciascun piano di riferimento (XY, XZ, YZ) e tre esempi di calcolo della resistenza. I valori di resistenza così calcolati sono compresi tra 2.78 MPa e 0.94 MPa.

Da quanto esposto risulta chiara la necessità di riconoscere la sequenza di fratturazione per ciascun campione sottoposto a *Hoop Tension Test*, così da poter comparare risultati ottenuti per meccanismi di rottura analoghi.

Quando sono presenti più di due fratture l'area misurata (*a*+*b*) può non essere quella da imputare alla forza massima registrata. È quanto accade per il campione LB8 con rottura di tipo 2B. Le fratture principali, che sembrano svilupparsi pressoché contemporaneamente, sono *a* e *c*, solo in fase tardiva *b*. Tutte sono parallele alla scistosità. (Fig. 8a). Caso analogo si verifica per il gruppo OAI-4. Solo i dati del campione OA4 (rottura tipo 3) sono affidabili tutti gli altri campioni del gruppo mostrano rottura tipo 4.

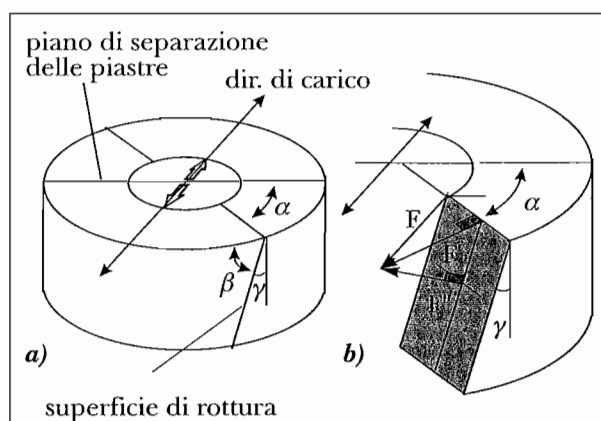


Fig. 6 – Parametri per il calcolo dell'area a rottura. *b*) Componenti della forza di carico *F*; F'' = forza normale alla superficie di rottura.

Fig. 6 – Geometrical parameters to calculate the failure area. *b*) Components of the loading force *F*; F'' = force component normal to the failure surface.

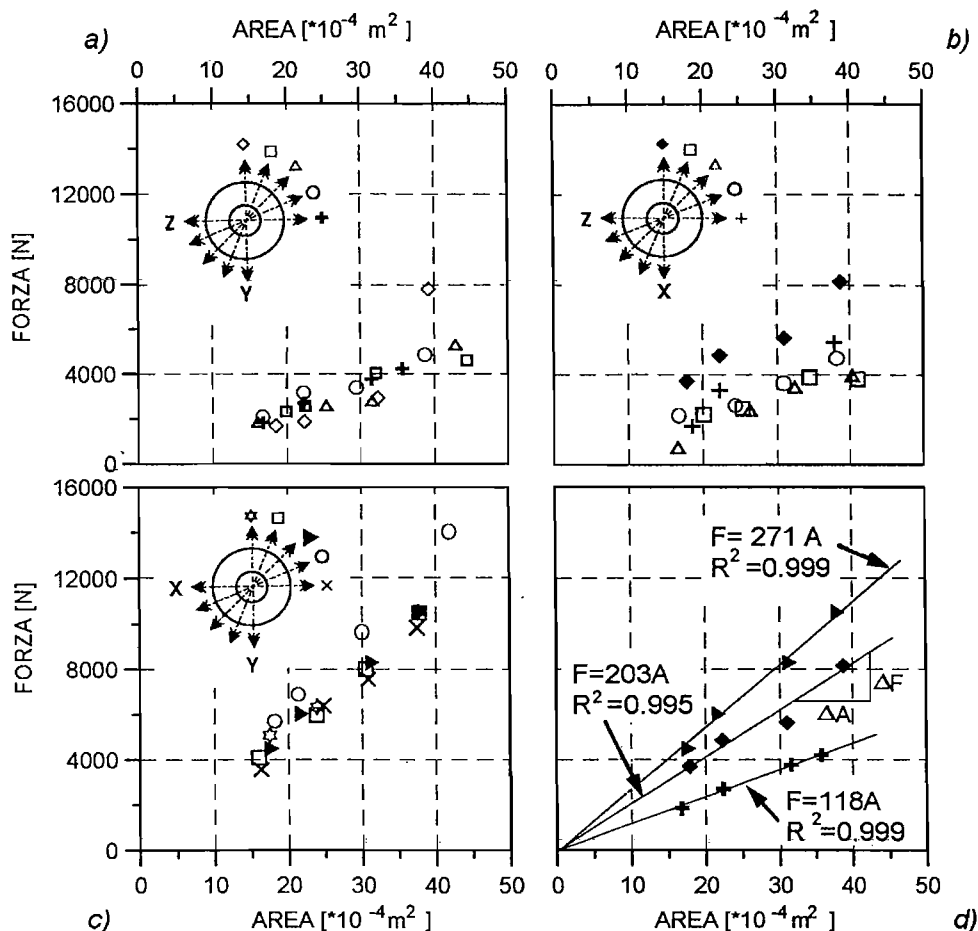


Fig. 7 – Diagramma F'' verso $A(a+b)$ relativa a carichi sul piano YZ a), XZ b); XY c). Esempio di calcolo della resistenza a trazione d).

Fig. 7 – Force at failure F'' versus failure area $A(a+b)$ diagrams: load in the YZ plane a), in the XZ plane b), in the XY plane c). Example of tensile strength calculation d).

L'area $A_{(a+b)}$ calcolata per OA1,2,3 è sovrastimata: si sviluppano, forse insieme o di poco sfasate, le fratture a , normale alla scistosità, b e c . Superata la resistenza a trazione indotta da compressione, la superficie c , parallela alla scistosità, si propaga più velocemente. Fenomeni di flessione disturbano la frattura b la cui area è solo in parte da computare (Fig. 8b).

Una volta ricostruita la sequenza di fratturazione si è assunto che, comunque orientata, l'intera superficie "primaria" sia soggetta alla componente ortogonale della forza massima F'' . Questo può non essere vero sia per il meccanismo stesso con cui opera l'*Hoop Test* (esistono campi di compressione) sia per interferenza delle fratture primarie con fratture secondarie, con induzione di compressioni e sollecitazioni di taglio non previste. Ispezionando le superfici di rottura esse appaiono piane; solo due casi mostrano un andamento piuttosto tortuoso con brusche variazioni di α e β . Si è pertanto ritenuto tale semplificazione accettabile. In altri casi è suggerita l'analisi fractografica delle superfici per consentire una zonazione dell'area in campi di compressione e

di trazione pura, consentendo di correggere aree e forze [BUTENUTH *et al.*, 1994].

4. Trazione diretta

Cinque campioni cilindrici di diametro $\phi = 26$ mm e lunghezza $l = 70 \div 78$ mm più un campione di $\phi = 49$ mm, lunghezza $l = 101$ mm sono stati sottoposti a prova di trazione diretta in ciascuna direzione X, Y e Z. I campioni sono stati fissati al centro di ancoraggi cilindrici (Fig. 1a) mediante incollante epossidico a due componenti. La prova è condotta a controllo di spostamento, fissando una velocità di spostamento costante di 0.2 mm/h.

Per ciascun campione la resistenza a trazione è $\sigma_t = F/A$ (F = forza massima, A = area della sezione del cilindro indeformato a metà della sua altezza). Solo 5 dei 17 campioni hanno superfici di rottura localizzate in prossimità di metà della loro altezza (rottura tipo 1). Tale comportamento è più probabile quando la direzione di trazione è normale ai naturali piani di

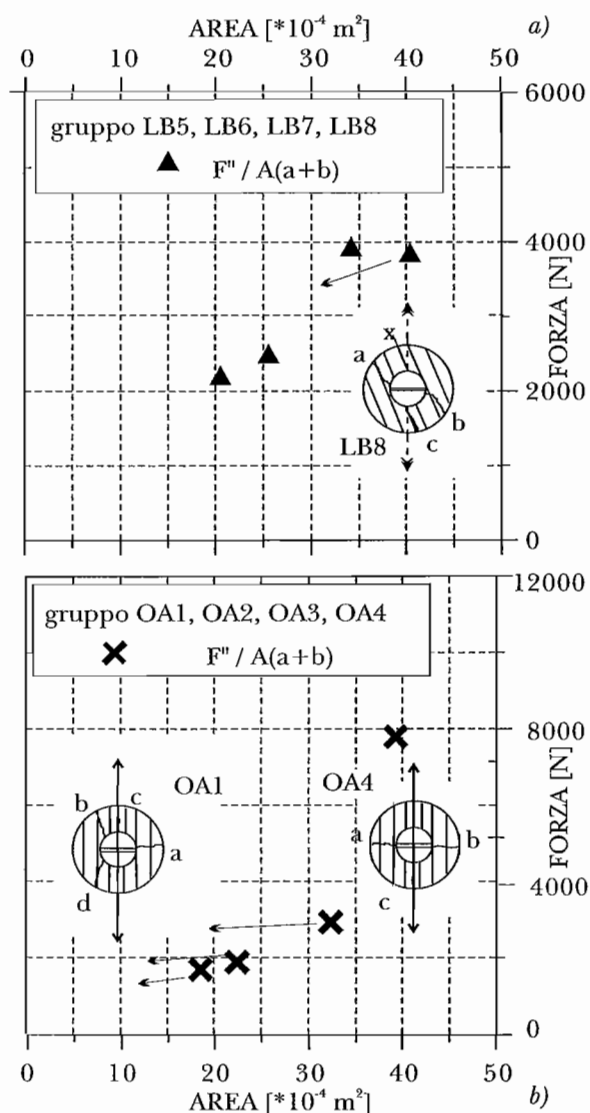


Fig. 8 – Diagramma F'' verso $A(a+b)$: a) anomala posizione del punto LB8 dovuta ad una diversa sequenza di fratturazione. b) Pessimo allineamento dei punti per differenti meccanismi di fratturazione.

Fig. 8 – Force at failure F'' versus failure area $A(a+b)$ diagrams: a) anomalous position of sample LB8 due to a complex sequence of fractures. b) Example of bed alignment for samples failed not in tension.

debolezza (superfici di scistosità), per valori di resistenza a trazione minori. Tre campioni riportano superfici di rottura così vicine agli ancoraggi da interessare l'incollante (rottura tipo 3) e rendere dubbia la validità del valore di resistenza calcolato. Sono questi i campioni caricati nella direzione di massimo allungamento dei cristalli, direzione X di massima resistenza. I restanti campioni hanno rottura che non si localizza a metà lunghezza ma non interessa comunque l'incollante (rottura tipo 2). Nei casi 1 e 2 la superficie di rottura si presenta "pulita", in genere poco rugosa, senza fratture secondarie o ramificazioni associate, la chiara risposta a sollecitazioni di trazione

pura. Vengono pertanto considerate valide entrambe le tipologie di rottura (tipo 1 e 2).

La resistenza a trazione nella direzione X è $\sigma_x = 8.30 \text{ MPa}$, nella direzione Y $\sigma_y = 7.03 \text{ MPa}$, e nella direzione Z $\sigma_z = 1.87 \text{ MPa}$.

5. Prova di compressione diametrica

Campioni carotati nella stessa direzione di riferimento, di diametro $\phi = 49 \text{ mm}$ e spessore $t = 20 \div 30 \text{ mm}$, sono stati caricati ogni 45° rispetto ad uno degli assi X, Y o Z. La prova è eseguita a controllo di spostamento, fissando spostamenti costanti di $10 \mu\text{s}$. La resistenza a trazione è calcolata dall'espressione $\sigma_t = 2F/\pi dt$ (F = forza massima a rottura).

Le superfici di rottura sono sostanzialmente di quattro tipi in funzione della morfologia e della riconosciuta zona di sviluppo (Fig. 9). Rotture di tipo 1 partono dal centro del campione e si propagano sul piano di carico, in genere coincidente con piani di scistosità; la superficie si presenta piana e "pulita". Rottura tipo 2: la rottura primaria diametrica è associata a rotture secondarie in zona di massima compressione, tipica di campioni carotati nella direzione Z. Rottura di tipo 3: la superficie segue il piano di massima compressione ma si presenta rugosa con tratti paralleli ai letti micacei connessi da ponti in letti quarzoso-feldspatici. Rottura tipo 4: la superficie si discosta dal piano di massima compressione; i letti micacei controllano il meccanismo di propagazione, caso tipico di campioni caricati a 45° dal piano di scistosità. I valori di resistenza calcolati sono compresi tra 12.19 MPa e 3.62 MPa.

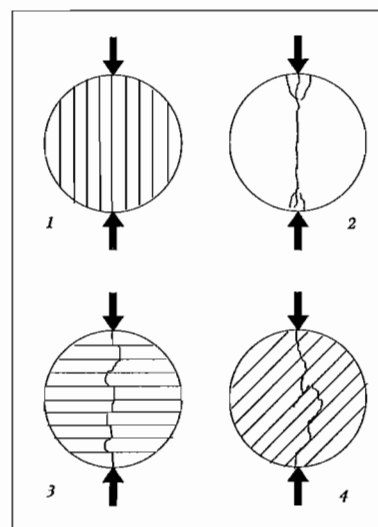


Fig. 9 – Diverse tipologie di rottura in campioni sottoposti a compressione diametrica

Fig. 9 – Different failures in samples tested by diametrical compression test.

Tab. I – Valori di resistenza (σ_t) a trazione diretta e compressione diametrale per ciascun campione sottoposto a prova. I valori di resistenza relativi a *Hoop Tension Tests* (HTT) si riferiscono a gruppi di campioni secondo quanto descritto in Fig. 7. Tab. I – Tensile strength values (σ_t) for each sample tested by direct tension and diametrical compression. Strength values by Hoop Tension Tests refer to group of samples according Fig. 7.

Prove di Trazione Diretta				Prove di Compressione Diametrale				Hoop Tension Tests				
campione	direzione di trazione	rottura tipo	$\sigma_t = F/A$ [MN/m ²]	campione	asse di trazione	rottura tipo	$\sigma_t = F/A$ [MN/m ²]	gruppo di campioni	direzione di trazione	$\sigma_t = \Delta F''(a+b)/\Delta A(a+b)$ [MN/m ²]	superficie di rottura	
FD1	Z	2	1,87	LC1	Y	X \equiv 0°	3	12,30	LA1-4	X \equiv 0°	2,03	(yz)
FD2	Z	1	1,25	LC2	Y	X \equiv 0°	3	11,90	LB5-7	X+22.5°Z	1,08	
FD3	Z	2	2,04	LC3	Y	X \equiv 0°	3	11,08	LB1-4	X+45°Z	0,95	
FD4	Z	1	2,07	LB1	Y	X+45°Z	4	6,82	LC1-4	X+67.5°Z	1,18	
FD5	Z	1	2,00	LB2	Y	X+45°Z	4	5,60	LA5-8	Z \equiv 90°	1,44	(yx)
FCa	Z	2	1,97	LA1	Y	Z \equiv 90°	1	4,83	OA1-4	Y \equiv 0°	(1.98)	(xz)
				LA2	Y	Z \equiv 90°	1	4,91	OB1-4	Y+22.5°Z	1,12	
LD1	Y	2	7,62	LA3	Y	Z \equiv 90°	1	5,03	OC1-4	Y+45°Z	1,10	
LD2	Y	1	6,69	OB1	X	Y \equiv 0°	3	10,15	OC5-8	Y+67.5°Z	1,24	
LD3	Y	2	6,90	OB2	X	Y \equiv 0°	3	10,00	OA5-8	Z \equiv 90°	1,18	(xy)
LD4	Y	2	7,27	OB3	X	Y \equiv 0°	3	9,99	FA1-4	X \equiv 0°	2,53	(zy)
LD5	Y	2	6,26	OD1	X	Y+45°Z	4	5,66	FC1-4	X+22.5°Y	(3.26)	
LAB	Y	2	7,42	OD3	X	Y+45°Z	4	4,24	FB1-4	X+45°Y	2,71	
				OA1	X	Z \equiv 90°	1	4,14	FB5-8	X+67.5°Y	2,67	
OD1	X	3	7,09	OA2	X	Z \equiv 90°	1	3,87	FA5-8	Y \equiv 90°	2,78	(zx)
OD2	X	1	8,39	OA3	X	Z \equiv 90°	1	2,75				
OD3	X	3	8,14	FB1	Z	X \equiv 0°	2	12,89				
OD5	X	2	8,83	FB2	Z	X \equiv 0°	2	11,61				
OAb	X	3	9,04	FB3	Z	X \equiv 0°	2	12,09				
				FC2	Z	X+45°Y	2	10,00				
				FC3	Z	X+45°Y	2	10,71				
				FA1	Z	Y \equiv 90°	2	11,09				
				FA2	Z	Y \equiv 90°	2	10,81				
				FD1	Z	Y \equiv 90°	2	10,76				

6. Confronto dei risultati

I dati ottenuti dalle tre metodologie di prova vengono riassunti in Tab. I. I valori medi rappresentativi della resistenza a trazione nelle diverse direzioni di sollecitazione sono graficamente comparati in Fig. 10.

Si considerano trazioni sul piano XZ, YZ e XY. In ascisse θ° è l'angolo tra una direzione di riferimento e la direzione di trazione, coincidente con la direzione di carico in *Hoop Tension Test* e nelle prove di trazione diretta e con la normale alla direzione di carico nelle prove di compressione diametrale.

I valori di resistenza ottenuti mediante *Hoop Test* sono sempre minori di quelli ottenuti dalle altre prove.

Considerando la variazione di σ_t su ciascun piano si osserva quanto segue: metodologie di prova diverse evidenziano differenti direzioni critiche di minima resistenza. Sul piano XZ la direzione critica di carico, rivelata da *Hoop Test*, è prossima a X+32°Z, mentre le prove di compressione diametrale indicano la direzione di trazione teorica Z essere quella di minima resistenza.

Andamento simile si osserva sul piano YZ (Tab. II). La distribuzione dei dati relativi ad *Hoop Test* sul piano XY è meno chiara. Il risultato di campioni caricati nella direzione X+22.5°Y deve essere trascurato per provata disomogeneità degli stessi rispetto agli altri -confermata da misure delle velocità soniche-. Si intuisce comunque un andamento opposto a quello rivelato da prove di trazione diretta e compressione diametrale: $\sigma_{tx}(\text{HTT}) < \sigma_{ty}(\text{HTT})$ mentre $\sigma_{tx}(\text{CD}) > \sigma_{ty}(\text{CD})$.

Con i dati disponibili è stato calcolato un coefficiente di anisotropia alla "trazione" su ciascun piano di carico e per ogni tipologia di prova: CA (%) = $(\sigma_{t_{\max}} - \sigma_{t_{\min}})/(\sigma_{t_{\max}})$. In genere i massimi valori di anisotropia sono rivelati da prove di trazione diretta, i minimi da *Hoop Test*. (Tab. II).

7. Conclusioni

I valori di resistenza ottenuti sono fortemente dipendenti dalla metodologia di prova.

L'ampia variabilità dei risultati si spiega considerando:

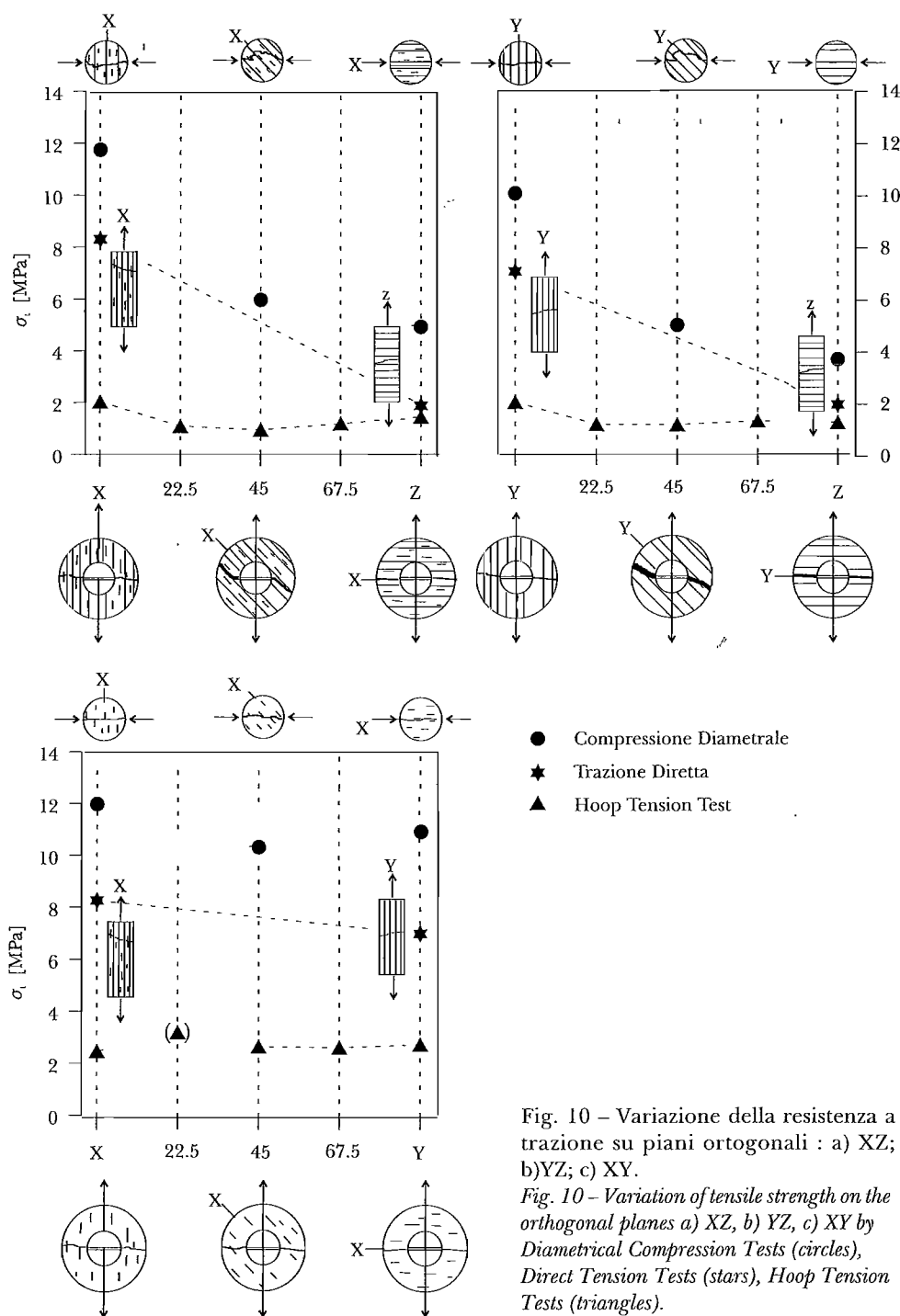


Fig. 10 - Variazione della resistenza a trazione su piani ortogonali : a) XZ; b) YZ; c) XY.

Fig. 10 - Variation of tensile strength on the orthogonal planes a) XZ, b) YZ, c) XY by Diametrical Compression Tests (circles), Direct Tension Tests (stars), Hoop Tension Tests (triangles).

- i) la "natura probabilistica" della resistenza;
- ii) la differenza che può esistere tra sforzo di inizio frattura e di propagazione;
- iii) l'assunzione utopica di materiale continuo perfettamente elastico nel calcolo degli sforzi;
- iv) per combinazione dei fattori precedenti.

Volumi maggiori di roccia hanno probabilità maggiore di contenere microfrazioni e di giungere a rottura per sforzi minori. In generale le normative di prova fanno però riferimento alla dimensione dei cristalli.

Non deve essere trascurato l'effetto che possono avere avuto velocità di carico differenti. Prove eseguite con alti gradienti di carico o di spostamento forniscono valori di resistenza maggiori. I campioni sottoposti a prova di compressione diametricale giungono a rottura in circa 1 min, quelli a trazione diretta ($\phi \approx 2.6$ cm) in circa 1 h, quelli a Hoop Test dopo 15-30 min.

La semplificazione di mezzo isotropo nel calcolo degli sforzi può avere ripercussioni più o meno gravi in prove diverse.

Tab. II – Valori di resistenza massimi (σ_{\max}) e minimi (σ_{\min}), rispettive direzioni di trazione diretta o indotta, da *Hoop Tension Test* (HTT), prove di trazione diretta (TD) e compressione diametricale (CD). Coefficiente di anisotropia a trazione (CA%).

Tab II – Tensile strength values for different directions of tension. σ_{\max} and σ_{\min} = maximum and minimum value.

HTT = Hoop Tension Test, TD = direct tension test, CD = diametrical compression test. Anisotropy coefficient (CA%).

		dir. di trazione indotta		dir. di trazione indotta		CA [%]
		$\sigma = \sigma_{\max}$ [MPa]		$\sigma = \sigma_{\min}$ [MPa]		
Carichi sul piano ZX	HTT	X	2,03	X+32Z	< 0.94	53,69
	TD	X	8,30	Z	1,87	77,50
	CD	X	11,75	Z	4,92	58,13
Carichi sul piano YX	HTT	Y	1,98	Y+32Z	< 1.10	44,44
	TD	Y	7,03	Z	1,87	73,40
	CD	Y	10,04	Z	3,62	63,94
Carichi sul piano XY	HTT	Y	2,78	X	2,53	8,99
	TD	X	8,30	Y	7,03	15,30
	CD	X	12,19	X+58Y	10,35	15,09

Alcune prove meglio si prestano all'analisi di materiali anisotropi. L'*Hoop Tension Test* ha il vantaggio di consentire la facile applicazione di carichi in qualsiasi direzione; di rivelare direzioni di resistenza minima non evidenti in compressione diametricale.

La scelta della metodologia di prova per ottenere parametri di utilizzo pratico deve essere il più possibile fedele allo stato di sollecitazione del caso applicativo. Potrebbe essere conveniente studiare quanto le differenze tra i valori ottenuti da prove diverse influiscano sulla risoluzione di problemi reali e sul calcolo di parametri derivati.

Ringraziamenti:

L'autore desidera ringraziare il Department of Engineering Geology, Imperial College – London – e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano per la generosa disponibilità di tecnici e mezzi, il Prof. A. Cancelli per la guida scientifica e la lettura critica dello scritto. Il lavoro è stato presentato V Convegno dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata (8-11 Ott. 1996 – Cagliari).

Bibliografia

- AL-SAMAHJI D.K. (1992) – *Experimental investigation of the tensile failure of rock in extension*. PhD. Thesis, Imperial College, Univ. of London.
- BIENIAWSKY Z.T. (1967 a; b) – *Mechanism of brittle fracture of rock*, Part I: Theory of the fracture process, Part III: *Fracture in tension under long term loading*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 4, pp. 395-406, 425-430.
- BUTENUTH C., DE FREITAS M.H., AL SAMAHJI D., PARK H.D., COSGROVE J.W., SCHEDELIG K. (1993) – *Observation on the measurement of tensile strength using the hoop test*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30, 2, pp. 157-162.
- BUTENUTH C., DE FREITAS M.H. (1995) – *The character of rock surfaces formed in mode I*. in "Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis", AMeen M.S.; Geological Society Special Publication, England, 92, pp. 83-96.
- BUTENUTH C., DE FREITAS M.H., PARK H.D., SCHEDELIG K., VAN LENT P., GRILL B. (1994) – *Observation on the use of Hoop Test for measuring the tensile strength of Anisotropic Rock*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 31, pp. 733-741.
- GENTIER S., POINCLOU C., BERTRAND L. (1991) – *Essai de traction sur anneaux, application aux schistes ardoisiers*, B.R.G.M. Report n° 623 RP BRG90-016, Service sol et sous-sol, France.
- PARK H.D. & DE FREITAS M.H. (1994) – *The application of the Hoop Tension Test to a study of the residual stored strain energy with a jointed rock mass*. Proc. 7th. Int. Cong. Int. Assoc. of Eng. Geol. Lisboa, pp. 645-650.
- PARK H.D. & DE FREITAS M.H. (1995) – *The tolerances for sample preparation in the Hoop Tension Test*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 32, 2, pp.165-169.
- REYES O. & EINSTEIN H.H. (1991) – *Failure mechanism of fractured rock- A fracture coalescence model*. Proc. 7th. Int. Cong. ISRM, Aachen, pp. 333-340.
- XU S., DE FREITAS M.H., CLARKE B.A. (1988) – *The measurement of tensile strength of rock*. Proc. ISRM Symp., Rock Mechanics and Power Plants, Madrid, pp. 125-132.

On the measurement of tensile strength of anisotropic rocks

Summary

The results obtained by Hoop Tension Test, Direct Tension Test and Diametral Compression Test on rock samples are presented. The rock investigated is the Antigorio orthogneiss, which is characterised by an orthotropic petrographical anisotropy. The calculated tensile strength is strongly dependent on the testing methodology. Diametrical Compression Tests give the higher values and the Hoop Tension Test the lower ones. The Hoop Tension Test reveals critical loading directions, corresponding to minimum tensile strength, which are different to that identify by diametrical compression test. It seems to provide a quite easy way for testing rock in different directions.

