

# Comportamento meccanico a taglio di discontinuità in roccia soggette ad azioni dinamiche

M. BARBERO, G. BARLA\*

**SOMMARIO.** Con particolare interesse allo studio del comportamento meccanico di giunti in roccia soggetti a sollecitazioni di taglio dinamiche, si è esaminata l'influenza, sulla resistenza tangenziale offerta dalla discontinuità al primo scorrimento, di sollecitazioni dinamiche semplici, consistenti in un carico tangenziale impulsivo agente in una sola direzione, in presenza di un carico normale costante.

Si sono eseguite due campagne di prove di taglio ad impulso monodirezionale, in una apparecchiatura di laboratorio appositamente costruita: nella prima il carico impulsivo è stato applicato a partire da condizioni di sollecitazione di taglio iniziale nulla; nella seconda l'impulso ha agito a partire da un certo livello di sollecitazione tangenziale iniziale, pari ad una percentuale della resistenza di taglio statica del campione. Ogni prova è caratterizzata da un particolare valore della velocità con cui il carico impulsivo agisce sulla discontinuità. Le superfici di discontinuità esaminate sono piane e lisce, ottenute artificialmente in campioni di tre litotipi.

I risultati sperimentali, interpretati mediante un semplice modello matematico, hanno mostrato che la resistenza a taglio di primo scorrimento è tanto maggiore del valore statico corrispondente quanto più è elevata la velocità di applicazione del carico orizzontale. Tale effetto tende a diminuire col crescere del livello di sforzo normale applicato e della percentuale di mobilitazione della resistenza a taglio statica.

## 1. Introduzione

A fronte della necessità di verificare la stabilità di strutture in roccia ubicate in zona sismica, assume notevole importanza l'indagine del comportamento degli ammassi rocciosi in presenza di azioni dinamiche.

La ricerca bibliografica sull'argomento [BARBERO, 1992] ha consentito di evidenziare due principali direzioni di indagine, relative a due momenti che caratterizzano l'evoluzione della resistenza al taglio delle discontinuità:

- l'esame della fase che precede il raggiungimento delle condizioni di «picco», prima che avvengano scorrimenti relativi irreversibili tra le superfici. In particolare, l'interesse è rivolto all'andamento della resistenza al taglio all'istante di scorrimento incipiente, in funzione delle caratteristiche del carico applicato (velocità, frequenza, forma). Pochi sono i contributi in merito riportati in letteratura:
  - le indagini sperimentali in laboratorio su interfacce scabre granito-calcestruzzo [NIKITIN *et al.*, 1974], su discontinuità piane in arenaria di Darleydale, arenaria permiana, calcare di Portland e ardesia di Delabole [HENCHER, 1980], su discontinuità scabre di arenaria di Loveland [STURE *et al.*, 1984], volte a studiare l'influenza di un carico ciclico;
  - la sperimentazione su discontinuità in grande scala create in arenaria, tufo, calcestruzzo e granito [BAKHTAR E BARTON, 1981], volta allo stu-

dio dell'influenza di un singolo impulso monodirezionale.

Tutti gli Autori hanno concordemente osservato che la resistenza a taglio, nell'istante di scorrimento incipiente, è maggiore del valore statico corrispondente ed è tanto più elevata quanto maggiore è la velocità con cui viene applicata la sollecitazione tangenziale.

- L'esame delle condizioni di scorrimento relativo. I contributi scientifici su questo argomento sono più numerosi. Fra i primi studi più significativi è da ricordare una campagna sperimentale di prove di taglio su campioni di granito di Westerly [DIETERICH, 1972]. I risultati ottenuti permettono di formulare un modello rappresentativo della resistenza d'attrito allo scorrimento che tiene conto di due importanti fenomeni osservati: la resistenza aumenta nel tempo durante il contatto stazionario, e decresce durante lo scorrimento in modo inversamente proporzionale al logaritmo della velocità.

Osservazioni analoghe vengono fatte successivamente sulla base di prove in cella triassiale su discontinuità artificiali [JOHNSON, 1981].

Una complessa indagine sperimentale [CRAWFORD E CURRAN, 1981a], consistente in prove di taglio ciclico in controllo di spostamento su discontinuità scabre di sienite quarzifera nera, dolomia stratificata grigia, arenaria di Kingston e granito rosa di Tweed, conferma l'influenza della velocità di scorrimento sulla resistenza al taglio delle discontinuità. Gli Autori osservano in particolare che tale influenza dipende dal tipo di roccia (esiste una relazione tra l'effetto della velocità e la durezza

\* Dott. Ing. Monica Barbero; Prof. Ing. Giovanni Barla - Gruppo di ricerca di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce. Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Torino.

del litotipo esaminato) e dal livello di sforzo normale agente. Da queste indagini emerge un ulteriore nuovo fattore: la velocità critica, oltre la quale la resistenza al taglio subisce delle variazioni.

Successivi lavori sperimentali [CRAWFORD e CURRAN, 1981b; CURRAN e LEONG, 1983; CURRAN e CARVALHO, 1983] mirano al superamento di alcune limitazioni dell'indagine di Crawford e Curran e alla valutazione dell'influenza di altri fattori (area di contatto apparente, scabrezza del giunto, presenza del materiale di alterazione) sul comportamento della discontinuità ad elevate velocità di scorrimento. I risultati ottenuti confermano che:

- la resistenza al taglio varia al variare della velocità di scorrimento all'interno di un certo campo di valori della velocità, al di fuori del quale ne rimane essenzialmente indipendente;
- l'andamento della resistenza al taglio dinamica è indipendente dall'area apparente di contatto e dalla presenza di materiale di alterazione.

Discordi sono i risultati ottenuti circa l'influenza del livello di sforzo normale agente sulla resistenza al taglio dinamica.

Una serie di prove di taglio dinamico ciclico su giunti artificiali scabri e piani ricavati in arenaria di Loveland [GILLETTE *et al.*, 1983] fornisce risultati analoghi a quelli di Crawford e Curran, confermando l'influenza del tipo di roccia sulla variazione della resistenza al taglio al crescere della velocità di scorrimento.

I risultati di una campagna di prove triassiali su superfici di discontinuità artificiali create in campioni di granito di Westerly [SOLBERG e BYERLEE, 1984] mostrano che la variazione della resistenza al taglio al variare della velocità di scorrimento dipende dal livello di sforzo normale agente.

L'analisi degli studi condotti rivela che la ricerca è stata generalmente svolta in molteplici direzioni anche a causa della complessità dei fenomeni che governano il comportamento dinamico delle discontinuità; questo rende spesso difficile confrontare ed integrare i risultati ottenuti dai diversi Autori.

Si è quindi ritenuto necessario affrontare in questa sede alcuni aspetti fondamentali di questo comportamento, con riferimento all'innescò dello scorrimento relativo tra le superfici delle discontinuità ed alla variazione della relativa resistenza al taglio in funzione della velocità di applicazione del carico tangenziale.

Lo studio ha pertanto previsto l'esecuzione di una campagna di prove di taglio diretto dinamico ad impulso monodirezionale, allo scopo di ottenere l'andamento della resistenza al taglio di primo scorrimento, su discontinuità lisce e piane, in funzione

della velocità con cui il carico tangenziale impulsivo agisce.

I dati sperimentali così ottenuti sono stati elaborati tramite un semplice modello matematico che ha permesso di individuare gli andamenti della resistenza al taglio dinamica di primo scorrimento delle discontinuità al variare della velocità di applicazione del carico tangenziale.

## 2. Apparecchiatura per prove di taglio diretto dinamico

La macchina per prove di taglio dinamico (Fig. 1) è costituita essenzialmente da (Fig. 2):

- una scatola inferiore fissa (6), di sezione quadrata (lato 12 cm), per l'inserimento della metà inferiore del campione;
- una scatola superiore (7), anch'essa di sezione quadrata, per l'inserimento della metà superiore del campione; questa può scorrere sulla parte inferiore in un'unica direzione orizzontale grazie a due sistemi di slitte alloggiati in apposite guide a «V» (2) che riducono al minimo l'attrito durante lo scorrimento. È garantita la dilatazione verticale libera del campione;
- un attuatore per l'applicazione del carico verticale (9), collegato alla scatola inferiore tramite un telaio di reazione (3); questo trasmette il carico ad una piastra di ripartizione (8), di sezione pari a quella della scatola superiore, tramite uno snodo con cuscinetti a sfere: viene così garantita la verticalità del carico normale per l'intera durata della prova;
- due attuatori per l'applicazione del carico orizzontale (10) incernierati alla scatola inferiore, che agiscono in opposizione di fase.

Allo stato attuale l'apparecchiatura consente di sottoporre a prova campioni di roccia contenenti su-

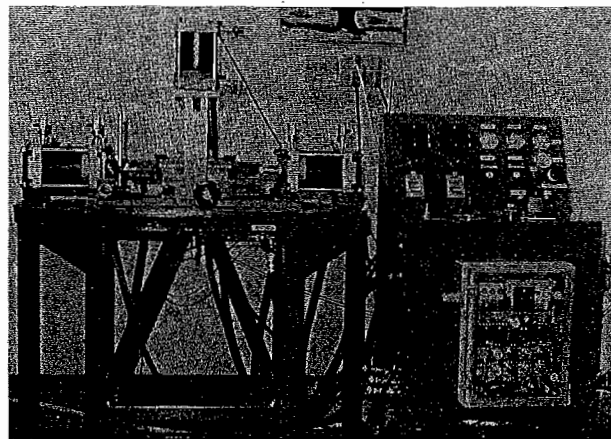


Fig. 1 - Nuova apparecchiatura per prove di taglio diretto dinamico.

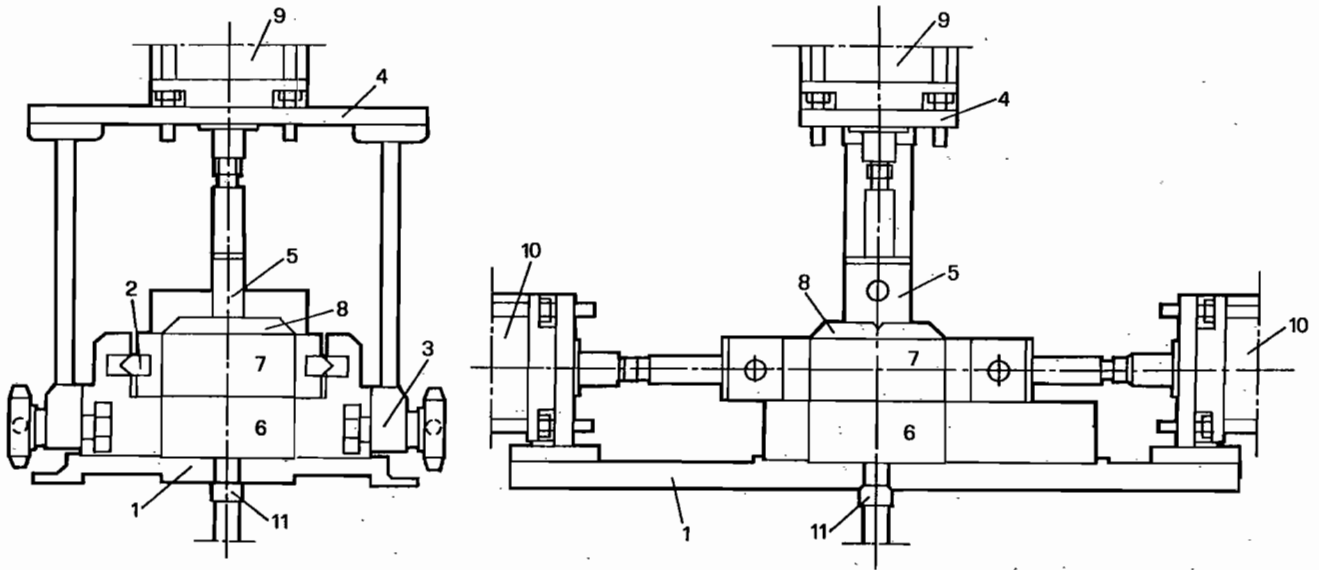


Fig. 2 - Schema della nuova apparecchiatura per prove di taglio diretto dinamico.

perfici di discontinuità lisce o scabre, di area massima pari a  $78 \text{ cm}^2$  circa. Prima di essere inseriti nella macchina di taglio, tali campioni vengono inglobati in una miscela costituita da malta Pagel Ancorfix 705 extra fine all'89% e acqua all'11%.

Il sistema di azionamento dell'apparecchiatura utilizza attuatori di tipo pneumatico. I carichi massimi ottenibili sono pari a:

- 1050 daN in direzione orizzontale, alla frequenza di 0.5Hz
- 1720 daN in direzione orizzontale, in condizioni statiche
- 951 daN in direzione verticale, in condizioni statiche.

Il campo di frequenze indagabile va da 0.01Hz a 3.5Hz circa. La corsa massima in direzione orizzontale è di 20 mm per ogni direzione, a partire dalla posizione centrale.

È possibile eseguire prove statiche e prove dinamiche in controllo di carico nelle condizioni:

- carico verticale costante, carico orizzontale variabile dinamicamente;
- carico orizzontale costante, carico verticale variabile dinamicamente;
- entrambi i carichi orizzontale e verticale variabili dinamicamente.

### 2.1 Sistema di carico

Il sistema pneumatico per l'azionamento dell'apparecchiatura (Fig. 3) è costituito da due circuiti che permettono l'attivazione del carico orizzontale e verticale rispettivamente. Entrambi i circuiti sono comandati dal circuito pneumatico di pilotaggio. Tale

sistema viene controllato tramite una centralina (Fig. 1) i cui elementi di comando sono essenzialmente:

- due frequenzimetri sui quali si impostano le frequenze dei carichi desiderate;
- due manometri per la rilevazione delle pressioni orizzontale e di pilotaggio;
- due manometri per la rilevazione della pressione verticale;
- due potenziometri e milliamperometri per impostare la pressione ai trasduttori relativi ai due attuatori orizzontali;
- due contatori di cicli, con rispettivi inseritori, sui quali si imposta il numero desiderato dei cicli di carico;
- un commutatore che può assumere tre posizioni, relative alle tre combinazioni di carichi statici e dinamici descritte.

### 2.2 Sistemi di misura e rilevamento dati

- Allo stato attuale il sistema di misurazione delle grandezze relative ad una prova di taglio comprende:
  - tre trasduttori di pressione con campo 0-5 MPa: due misurano le pressioni orizzontali ed il terzo quella verticale;
  - un trasduttore di spostamento di tipo induttivo;
  - un amplificatore che alimenta i quattro trasduttori e riceve da questi i segnali di misura.
- Il sistema di rilevamento e registrazione dei dati comprende:
  - un analizzatore di segnali che converte la tensione in uscita dall'amplificatore in segnali digitali;

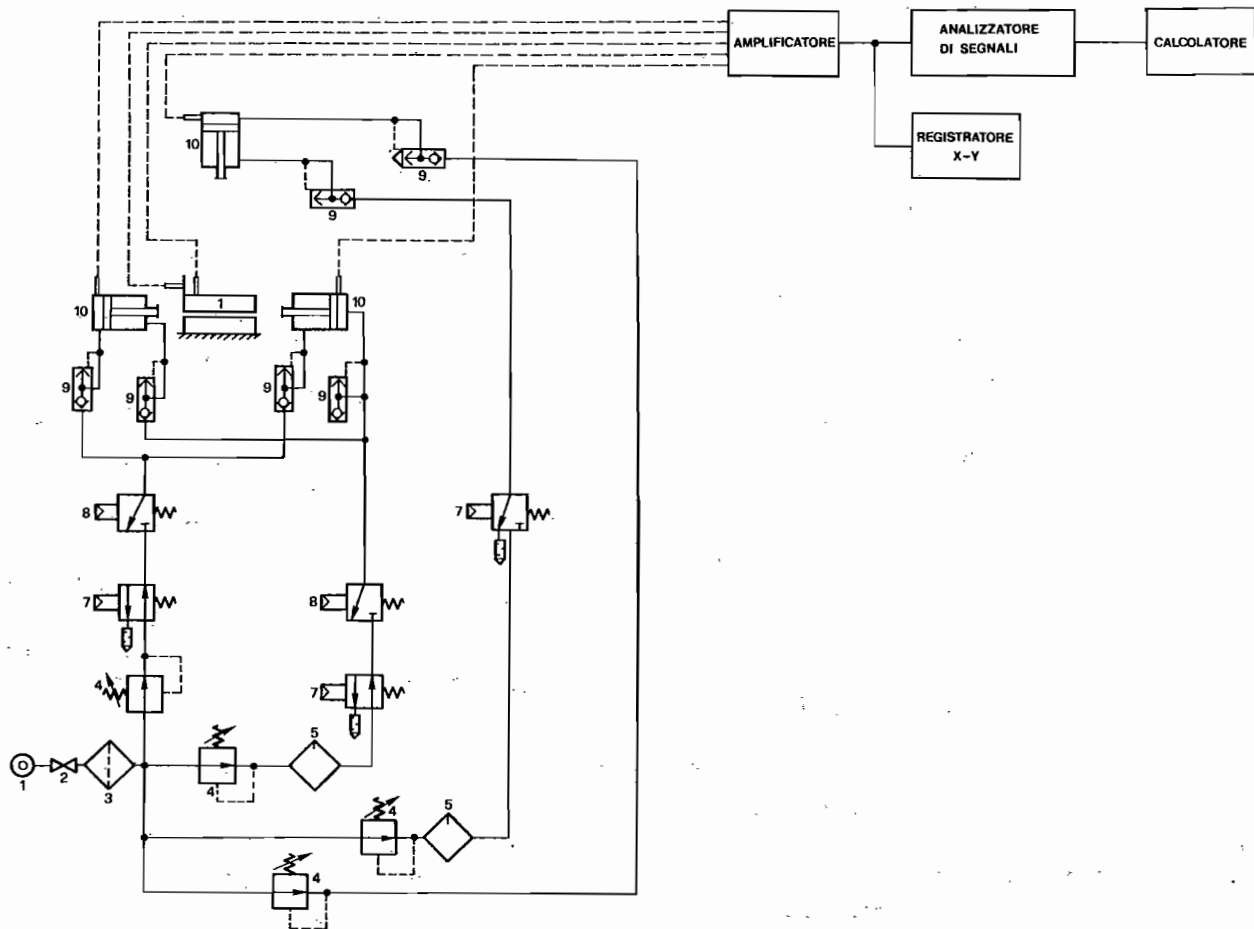


Fig. 3 - Schema del sistema pneumatico per l'azionamento dell'apparecchiatura.

- un registratore X-Y, gestito dall'analizzatore di segnali;
- un calcolatore per la memorizzazione dei dati trasmessi dall'analizzatore di segnali.

### 3. Prove di taglio diretto dinamiche ad impulso monodirezionale

Lo studio sperimentale del comportamento delle discontinuità in roccia soggette ad azioni dinamiche è iniziato con l'esecuzione di prove concettualmente semplici, consistenti nell'applicare al giunto in esame un carico tangenziale di tipo impulsivo, in una sola direzione, e un carico verticale costante. Lo scopo è stato quello di valutare la resistenza tangenziale offerta dalla discontinuità al primo scorrimento, al variare della velocità con cui la sollecitazione di taglio incide sul campione.

In una successiva campagna di determinazioni sperimentali si è voluto estendere l'indagine al caso in cui la discontinuità, al momento di subire l'azione impulsiva del carico tangenziale, abbia già raggiunto un certo livello di mobilitazione della sua resistenza

al taglio. In queste prove l'impulso tangenziale monodirezionale agisce quindi a partire da un livello di sollecitazione di taglio pari ad una certa percentuale del valore di resistenza al taglio statica del campione in esame.

Al fine di ridurre al minimo il numero delle variabili in gioco si è operato, in entrambe le campagne di prove, su superfici di discontinuità lisce create artificialmente in laboratorio con taglio alla sega circolare e successiva rettifica, e si è eliminato il materiale fine eventualmente prodotto durante la prova. Sono stati così esaminati:

- superfici di discontinuità, aventi area di 50.26 cm<sup>2</sup>, create in campioni di tre litotipi: granito di Montorfano, arenaria di Finale Ligure e arenaria di Monticello;
- tre diverse condizioni di sollecitazione a taglio iniziale: sforzo di taglio nullo e sforzo tangenziale pari al 50% ed al 75% della resistenza al taglio statica del campione esaminato;
- tre livelli di sforzo normale (0.5 MPa, 0.75 MPa e 1.0 MPa), mantenuto costante per l'intera durata della prova;

- diversi livelli di velocità di applicazione del carico tangenziale (variabili da 2.5 MPa/s a 12 MPa/s).

Per tener conto della variabilità dei risultati sperimentali le prove sono state ripetute, per ogni livello di sollecitazione a taglio iniziale, su tre campioni per ciascun litotipo. Il totale delle prove è stato di 189 per ogni litotipo.

#### 4. Litotipi oggetto di indagine

Per avere una visione il più possibile generale del comportamento al taglio delle discontinuità in roccia si sono esaminati tre litotipi aventi caratteristiche di resistenza meccanica differenti: il granito di Montòrfano, l'arenaria di Monticello e un'arenaria di Finale Ligure a bassa resistenza del tipo «Lara».

- Granito di Montòrfano.

I componenti essenziali sono: feldspato potassico, plagioclasio, quarzo, mica biotite, minerali opachi. La struttura del granito risulta di tipo cristallino con leggeri fenomeni di alterazione che interessano alcuni dei suoi costituenti. Le caratteristiche fisico-meccaniche possono essere così riassunte:

- massa volumica apparente: 2.61 kg/dm<sup>3</sup>
- resistenza a compressione monoassiale: 134 MPa
- modulo elastico tangente: 47000 MPa
- angolo di resistenza al taglio statica di base: 36°.

- Arenaria di Monticello.

È costituita fondamentalmente da: quarzo, feldspati, muscovite, biotite e clorite. Sono presenti in quantità accessorie: ossidi di ferro, granati, orneblenda e sericite. La matrice è carbonatica, essendo costituita da calcite e dolomite a grana fine; contiene ossidi di ferro. Il cemento è costituito da calcite. Le caratteristiche fisico-meccaniche sono:

- massa volumica apparente: 2.49 kg/dm<sup>3</sup>
- resistenza a compressione monoassiale: 77 MPa
- modulo elastico tangente: 13300 MPa
- angolo di resistenza al taglio statica di base: 27°.

- Arenaria di Finale Ligure «Lara».

La struttura è costituita da cemento carbonatico in cui sono immersi frammenti di minerali, di rocce e resti fossili. Le parti detritiche sono costituite per la maggior parte da quarzo. I frammenti di roccia sono in maggioranza di origine sedimentaria (calcarei) e metamorfica. Scarse sono le miche sia di tipo muscovitico che biotitico; molto abbondanti sono invece i resti fossiliferi. Sia i granuli di quarzo che le miche mostrano un'orientazione preferenziale. Si notano, inoltre, fratture riempite da calcite secondaria. Si sono rilevate le seguenti caratteristiche fisico-meccaniche:

- massa volumica apparente: 2.15 kg/dm<sup>3</sup>

- resistenza a compressione monoassiale: 46 MPa
- modulo elastico tangente: 13800 MPa
- angolo di resistenza al taglio statica di base: 34°.

#### 5. Interpretazione dei dati sperimentali

L'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti è stata svolta ricorrendo ad un semplice modello matematico.

Le grandezze sperimentali note, per ogni prova, sono le masse mobili (elementi mobili dell'apparecchiatura e mezzo campione inglobato) e gli andamenti del carico orizzontale e dello spostamento corrispondente nel tempo.

Si vuole ricavare la resistenza al taglio offerta dalla superficie di discontinuità al primo scorrimento.

Con riferimento alle Figure 4 e 5, che rappresentano i tipici diagrammi sperimentali di pressione orizzontale applicata e spostamento orizzontale in funzione del tempo, si ipotizza che l'andamento del carico orizzontale P nel tempo t sia approssimabile con le funzioni:

- sforzo di taglio mobilitato iniziale nullo:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{P}{2}(1 - \cos \frac{\pi t}{T}) & \text{per } t_i < t < t_f \\ \text{costante} & \text{per } t > t_f \end{cases} \quad (1)$$

- sforzo di taglio mobilitato iniziale non nullo:

$$P(t) = \begin{cases} P' + \frac{P}{2}(1 - \cos \frac{\pi t}{T}) & \text{per } t_i < t < t_f \\ \text{costante} & \text{per } t > t_f \end{cases} \quad (2)$$

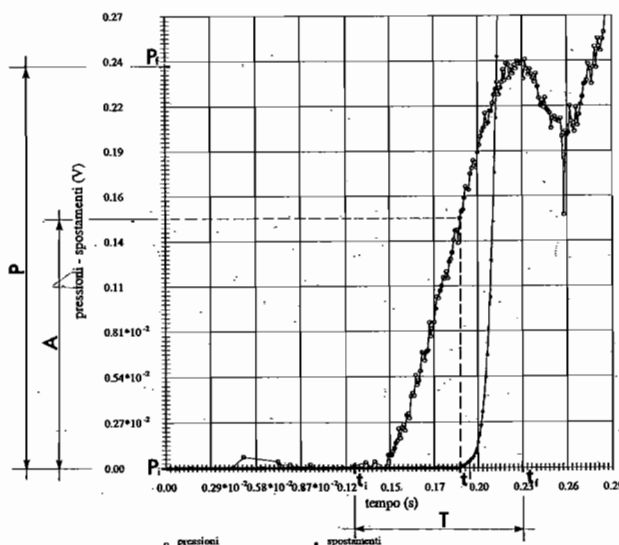


Fig. 4 - Tipico diagramma pressione orizzontale applicata-spostamenti orizzontali in funzione del tempo, ricavato da una prova dinamica ad impulso (sforzo di taglio mobilitato nullo).



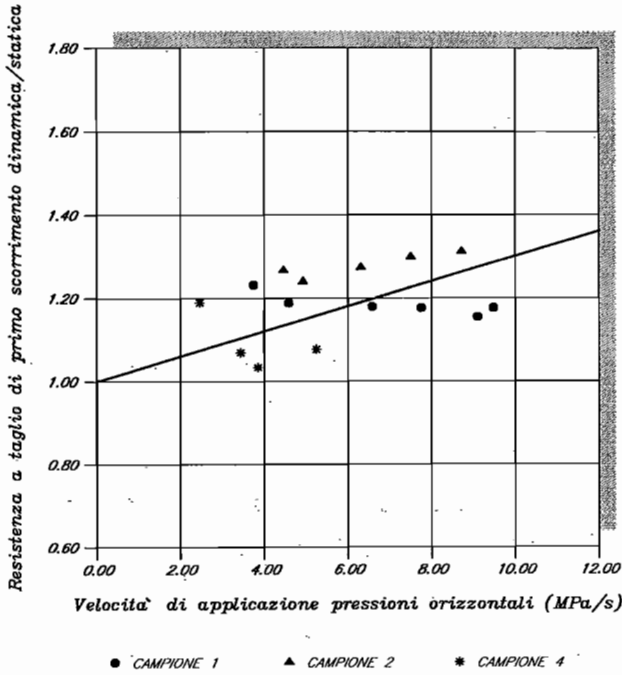


Fig. 6 - Andamento del rapporto tra le resistenze a taglio dinamica e statica, in funzione della velocità di applicazione della sollecitazione tangenziale, relativo ai tre litotipi, per valore nullo della sollecitazione a taglio iniziale e per sforzo normale pari a 0.5 MPa.

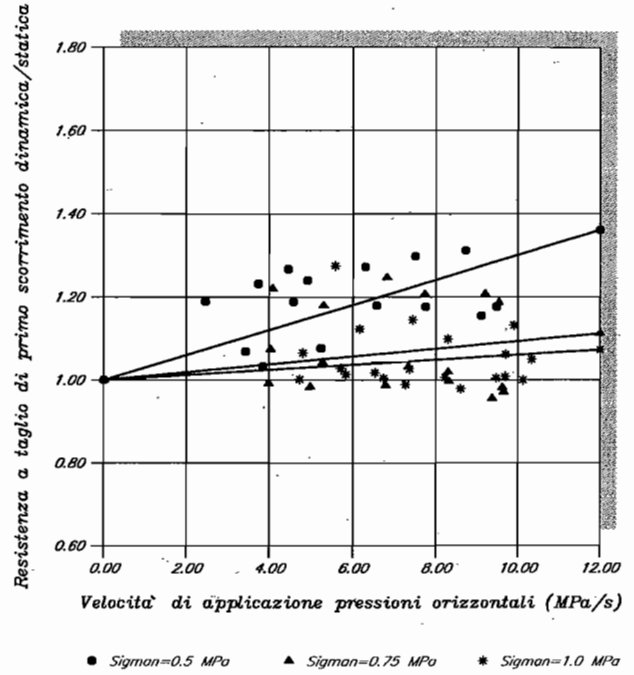


Fig. 8 - Andamento del rapporto tra le resistenze a taglio dinamica e statica, in funzione della velocità di applicazione della sollecitazione tangenziale, relativo all'arenaria di Finale, per valore nullo della sollecitazione a taglio iniziale e per i tre livelli di sforzo normale.

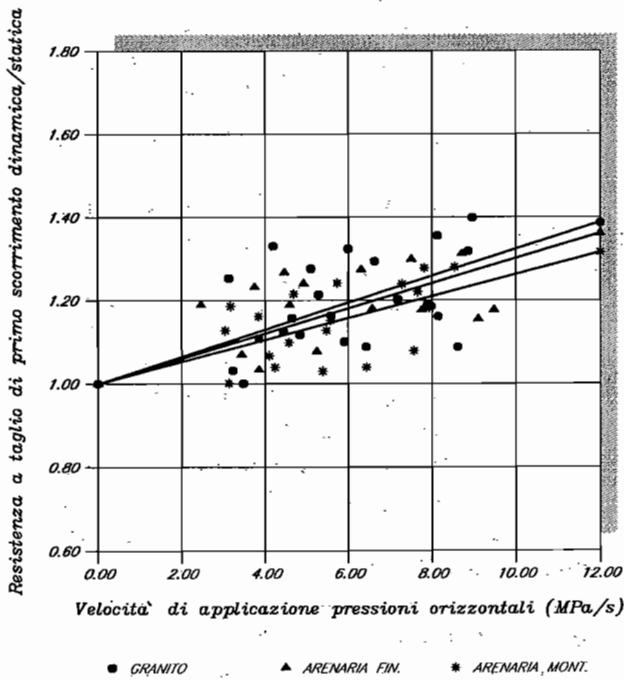


Fig. 7 - Andamento del rapporto tra le resistenze a taglio dinamica e statica, in funzione della velocità di applicazione della sollecitazione tangenziale, relativo ai tre litotipi, per valore nullo della sollecitazione a taglio iniziale e per sforzo normale pari a 0.5 MPa.

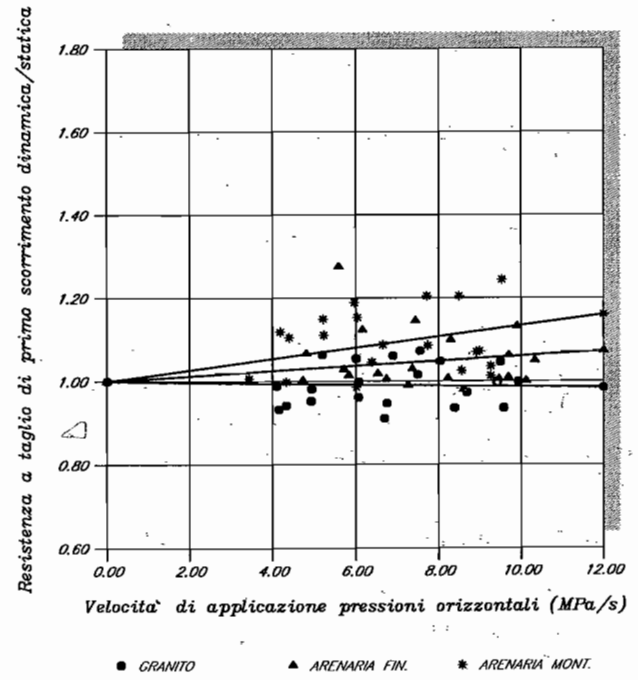


Fig. 9 - Andamento del rapporto tra le resistenze a taglio dinamico e statica in funzione della velocità di applicazione della sollecitazione tangenziale, relativo ai tre litotipi, per valore nullo della sollecitazione a taglio iniziale e per sforzo normale pari a 1.0 MPa.



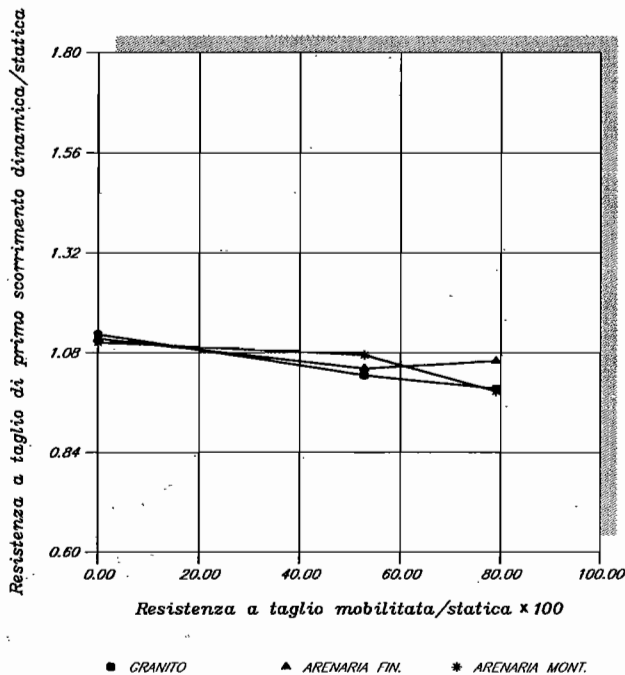


Fig. 10 - Andamento del rapporto tra le resistenze a taglio dinamica e statica, in funzione della percentuale di mobilitazione della resistenza al taglio statica, relativo ai tre litotipi, per velocità di carico pari a 4 MPa/s e per sforzo normale pari a 0.5 MPa.

normale (Fig. 8). Per qualsiasi livello di mobilitazione della resistenza statica di taglio, dunque, una crescita dello sforzo normale tende a riportare il valore della resistenza dinamica di primo scorrimento al valore della resistenza statica corrispondente. Litotipi con più elevata resistenza al taglio di base risentono maggiormente dell'effetto della sollecitazione normale (Fig. 9).

- Le superfici di discontinuità che hanno subito precedentemente una sollecitazione di taglio statica che ha mobilitato una certa percentuale della loro resistenza, reagiscono ad un impulso tangenziale mostrando una resistenza tanto minore di quella relativa alle condizioni di mobilitazione nulla, quanto più elevata è la percentuale di mobilitazione. Questo fenomeno è ben rappresentato nel diagramma della Figura 10 in cui si riportano i valori dei rapporti tra le resistenze al taglio di primo scorrimento dinamica e statica, in funzione della percentuale di mobilitazione della resistenza al taglio statica, per i tre litotipi e per un basso livello di tensione normale.

Si nota che tale rapporto tende a diminuire al crescere della percentuale di mobilitazione, fino a raggiungere il valore unitario. Esiste quindi un valore limite della percentuale di mobilitazione oltre il quale la discontinuità non risente più di effetti dinamici.

I fenomeni osservati possono essere interpretati concentrando l'attenzione sullo stato delle superfici di discontinuità. La loro struttura subisce, durante la prova, delle trasformazioni: si possono osservare disgregazioni della matrice, distacchi di alcuni grani dalla loro sede nonchè, in alcuni casi, una probabile riorientazione degli stessi nella direzione dello scorrimento.

Lo stato iniziale di queste superfici di discontinuità macroscopicamente lisce, inoltre, è caratterizzato da un certo livello di microscabrezza non trascurabile, variabile a seconda dei litotipi, che contribuisce a determinare la resistenza al taglio della superficie: nel caso trattato si ha un livello di microscabrezza decrescente dal granito all'arenaria di Monticello.

Nelle superfici di discontinuità sottoposte ad un certo livello di sforzo normale l'impulso tangenziale agisce quindi su microasperità combacianti e contenute lateralmente. Considerando che la resistenza di un materiale è tanto maggiore quanto più elevata è la velocità con cui viene applicata la sollecitazione, se ne deduce che tanto più elevata è la velocità con cui l'impulso tangenziale incide sulla superficie tanto maggiore è la resistenza al taglio offerta dalle microasperità allo scorrimento.

Proseguendo secondo questo punto di vista, una crescita dello sforzo normale tende a distruggere le microasperità e a riportare di conseguenza il valore di resistenza dinamica verso il corrispondente valore statico.

Se alla superficie di discontinuità viene applicato staticamente un carico tangenziale fino a raggiungere una certa percentuale del valore di resistenza al taglio statica, viene mobilitata una corrispondente percentuale di deformazione delle microasperità. Il carico dinamico agisce quindi su microasperità parzialmente deformate, che reagiscono di conseguenza con una resistenza allo scorrimento minore di quella che avrebbero avuto partendo da condizioni di deformazione iniziale nulla. Per elevati livelli di mobilitazione della resistenza al taglio, il valore della resistenza dinamica tende ad eguagliare quello della corrispondente resistenza statica. Esiste dunque una percentuale di mobilitazione oltre la quale la discontinuità non risente più di alcun effetto dinamico.

## 7. Conclusioni

Nel presente studio è stato indagato il comportamento meccanico a taglio delle discontinuità in roccia nella fase che precede lo scorrimento relativo tra le superfici, al variare della velocità con cui un carico dinamico agisce sulle stesse.

Per l'esecuzione dell'indagine sperimentale è stato



necessario realizzare un'apparecchiatura di taglio diretto da laboratorio che permette di eseguire prove statiche e dinamiche in controllo di carico.

Sulla nuova macchina di taglio è stata condotta una campagna di prove di taglio ad impulso mono-direzionale, eseguite su superfici di discontinuità lisce artificiali. Si sono considerati tre diversi livelli di sforzo normale agente (0.5, 0.75 e 1.0 MPa), tre condizioni di sollecitazione al taglio iniziale (sforzo di taglio nullo, e pari al 50% ed al 75% della resistenza a taglio statica del campione esaminato), tre litotipi differenziati in base alle loro caratteristiche meccaniche, e più livelli di velocità di applicazione del carico tangenziale (variabili da 2.5 a 12 MPa/s).

Per l'elaborazione dei dati sperimentali è stato sviluppato un modello matematico che permette di ottenere, noti i valori della sollecitazione e degli spostamenti tangenziali nel tempo, gli andamenti della resistenza al taglio offerta dalle discontinuità al primo scorrimento, al variare della velocità di applicazione del carico tangenziale.

I risultati ottenuti hanno mostrato che:

- per bassi valori dello sforzo normale e valore nullo dello sforzo di taglio iniziale la resistenza dinamica è tanto maggiore del valore statico corrispondente quanto più elevata è la velocità di applicazione del carico tangenziale;
- all'aumentare della percentuale di mobilitazione della resistenza al taglio statica, la resistenza dinamica tende a diminuire fino a raggiungere il valore statico relativo;
- al crescere dello sforzo normale, ogni effetto dinamico osservato si smorza fino all'annullamento.

I fenomeni osservati possono trovare una giustificazione se si considera la microscabrezza delle superfici macroscopicamente lisce esaminate, e si concentra l'attenzione sullo stato delle superfici e le trasformazioni che queste subiscono durante la prova.

## Ringraziamenti

Il presente studio è stato svolto con il contributo finanziario MURST 40%. Al riguardo è stato anche definito un contratto di ricerca tra il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino e l'ENEL DSR CRIS di Milano, ove si è svolta l'attività sperimentale. Si ringraziano l'ing. A. Zaninetti ed il personale tecnico del Laboratorio di Geomeccanica dell'ENEL DSR CRIS per l'importante aiuto prestato, senza il quale la ricerca non avrebbe potuto essere condotta.

## BIBLIOGRAFIA

- BAKHTAR J., BARTON N. (1981) - *Large scale static and dynamic friction experiments*. Proceedings of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Evanstone, pp. 457-466.
- BARBERO M. (1992) - *Comportamento meccanico a taglio di discontinuità in roccia soggette ad azioni di tipo dinamico*. Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Geotecnica, Torino.
- BARLA G., BARBERO M., SCAVIA C., ZANINETTI A. (1990) - *Direct shear testing of single joints under dynamic loading*. Rock Joints: Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, pp. 447-454.
- CRAWFORD A.M., CURRAN J.H. (1981a) - *The influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. XVIII, pp. 505-515.
- CRAWFORD A.M., CURRAN J.H. (1981b) - *Rate-dependent behaviour of rock joints-Black quartz syenite*. Proceedings of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, pp. 291-296.
- CURRAN J.H., CARVALHO J.L. (1983) - *Influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities*. Publication of Department of Civil Engineering - University of Toronto, Toronto, n. 83-11.
- CURRAN J.H., LEONG P.K. (1983) - *Influence of shear velocity on rock joint strength*. Proceedings of International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, pp. A235-A240.
- DIETERICH J.H. (1972) - *Time-dependent friction in rocks*. Journal of Geophysical Research, vol. LXXVII, pp. 3690-3697.
- FORLATI F. (1987) - *Analisi sperimentale del comportamento al taglio dei giunti in roccia con riempimento*. Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Geotecnica, Torino.
- GILLETTE D.R., STURE S., KO H.Y., GOULD M.C., SCOTT G.A. (1983) - *Dynamic behavior of rock joints*. Proceedings of the 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 163-179.
- HENCHER S.R. (1980) - *Friction parameters for the design of rock slopes to withstand earthquake loading*. Design of dams to resist earthquake, Londra, ICE, pp. 65-73.
- JOHNSON T. (1981) - *Time-dependent friction of granite: implications for precursory slip on faults*. Journal of Geophysical Research, vol. LXXXVI, pp. 6017-6028.
- NIKITIN A.A., SAPIGIN D.D., UVAROV L.A. (1974) - *Shear resistance of rock along joint planes under static and impulse loads*. Proceedings of the 3rd Congress ISRM, vol. XIA, pp. 302-305.
- SOLBERG P., BYERLEE J. (1984) - *Experimental strain rate dependent frictional stress and fault creep*. Journal of Geophysical Research, pp. 4203-4205.
- STURE S., SCOTT G.A., KO H.Y. (1984) - *Dynamic behavior of jointed rock*. Proceedings of 8th World conference on Earthquake Engineering, San Francisco, pp. 437-443.

## SUMMARY

### Mechanical shear behaviour of rock joints under dynamic loading

The shear testing of rock discontinuities under dynamic loading has been studied in the present paper.

Following a comprehensive bibliographic survey, consideration has been given to the following topics:

- mechanical behaviour of rock discontinuities prior to peak strength, in a stage where no irreversible shearing has yet occurred;
- study of the shearing behaviour in a stage where the shearing strength is dependent upon the shearing velocity.

In particular, most of the attention has been posed on the shearing strength under impulsive shear loading, with the normal stress being maintained constant during testing.

The first step of the study undertaken consisted in the design and construction of a novel shear equipment (Fig. 1) which allows the shear test to be carried out under both static and dynamic loading conditions. The size of the specimen is 10 cm in diameter; the dyna-

mic tests can be performed in a frequency range from 0.01 Hz to 3.5 Hz.

Following a complex and careful calibration study of the new shear equipment, the following impulsive shear tests under unidirectional loading have been carried out:

- testing of a rock discontinuity with no mobilized shear strength prior to dynamic loading;
- testing of a rock discontinuity with a known level of mobilized shear strength prior to dynamic loading;

in both cases, the normal stress has been kept constant during testing.

The following testing conditions have been considered:

- plane and smooth discontinuity surfaces obtained by saw cutting of three different rocks (Montorfano granite, Finale sandstone, Monticello sandstone);
- three different levels of the applied normal stress: 0.5 MPa, 0.75 MPa e 1.0 MPa;
- two diversified values of the mobilized shear strength: 50 per cent and 75 per cent of the static shear strength of each discontinuity surface;
- each test characterized by a known value of the shear velocity of the impulsive load being applied to the rock discontinuity, ranging from 2.5 MPa/s to 12 MPa/s approximately.

A total of 189 tests have been performed for each rock type.

With the purpose to interpret the experimental results obtained

with each test, a simplified theoretical model has been used. The objective is to describe the initial dynamic shear strength of a rock discontinuity versus the shearing stress velocity applied during the test. The results obtained have shown that:

- under low normal stress and no initially mobilized shearing strength, the dynamic shear strength is greater than the corresponding static value and is greater in relation to a higher shearing stress velocity being applied (Fig. 6); this phenomenon is even more pronounced for rocks having a greater basic frictional strength (Fig. 7);
- the dynamic to static shear strength ratio has a tendency to decrease as the mobilized shear strength prior to loading increases; the tendency is for this ratio to become unity (Fig. 10);
- with the normal stress increasing, the dynamic influence on the shearing strength appears to become gradually negligible; the dynamic to static shear strength ratio becomes closer to unity as the normal stress increases (Fig. 8). This influence appears to be more significant for rocks having a greater basic frictional strength (Fig. 9).

The phenomena that have been observed to take place during testing may be justified in terms of a microscopic roughness of the macroscopically smooth discontinuity surfaces. Most of the attention need be paid to the roughness conditions of these surfaces and to the changes they undergo during testing.