

**Sulla risposta dinamica di ammassi rocciosi fratturati.**

CRAWFORD A. M., CURRAN J. H. (1982) - *The influence of rate — and Displacement — Dependent Shear Resistance on the Response of Rock Slopes to Seismic Loads.* Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 19, pp. 1-8.

CRAWFORD A. M., CURRAN J. H. (1981) - *The Influence of Shear Velocity on the Frictional Resistance of Rock Discontinuities.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 18, pp. 505-515.

**1. Introduzione**

L'influenza dei fenomeni viscosi o inerziali sul comportamento degli ammassi rocciosi è da tempo oggetto di ricerca da parte di numerosi cultori di Meccanica delle Rocce.

Allo scopo di approfondire le conoscenze in questo settore, gli AA. hanno messo a punto, presso l'Università di Toronto, una apparecchiatura con la quale è possibile indagare sulla dipendenza della resistenza al taglio lungo superfici di discontinuità delle rocce da alcuni fattori e, in particolare, dalla velocità di applicazione delle sollecitazioni, nonché dall'entità dello scorrimento lungo il piano medio della discontinuità stessa.

Nei due articoli che si recensiscono, gli AA. riportano i risultati di una serie di indagini sperimentali eseguite con tale apparecchiatura su discontinuità artificiali e presentano, relativamente al caso, invero semplice, di un blocco poggiato su un piano inclinato, soggetto a sollecitazioni da sisma, i risultati dell'analisi di stabilità eseguita nell'ipotesi che la resistenza al taglio lungo il contatto blocco-piano inclinato vari in funzione sia dell'entità dello spostamento relativo che della velocità relativa.

I risultati della ricerca pongono in evidenza, in particolare, che la velocità di scorrimento influenza sensibilmente la resistenza al taglio lungo le discontinuità e possono trovare applicazione in tutti i problemi relativi agli ammassi rocciosi nei casi in cui sono da prevedersi sollecitazioni dinamiche.

In tali casi, infatti, gli spostamenti relativi che si verificano tra i blocchi a seguito di forze esterne variabili in brevi intervalli di tempo (sisma), possono alterare la geometria delle discontinuità, dando luogo ad una riduzione della resistenza al taglio. Il fenomeno, certamente non trascurabile per l'interpretazione della cinematica dei processi di rottura e per una corretta progettazione delle opere che interessano gli ammassi rocciosi fratturati, non può tuttavia essere caratterizzato nel dettaglio sulla base dei dati forniti dagli Autori, che si propongono di eseguire altre prove su diversi tipi di rocce e con differenti modalità di applicazione delle sollecitazioni.

Il problema della verifica della stabilità di un pendio costituito di rocce discontinue e soggetto a carichi dinamici è stato affrontato in vari modi. Definita la superficie di rottura, le condizioni di stabilità dell'ammasso vengono valutate, in genere, facendo ricorso ad un coefficiente di sicurezza definito come rapporto fra le forze resistenti e le forze che provocano lo scivolamento; si considerano stabili i pendii, per i quali il coefficiente di sicurezza risulta maggiore dell'unità. In presenza di sollecitazioni dinamiche, e quindi variabili nel tempo, come ad esempio quelle derivanti da un sisma, le forze instabilizzanti possono superare le forze resistenti durante brevi intervalli di tempo; durante tali intervalli i blocchi subiscono spostamenti relativi lungo le discontinuità, al cessare delle sollecitazioni esterne, tuttavia, possono arrestarsi, e la nuova configurazione dell'ammasso può risultare stabile. Pertanto, la valutazione delle condizioni di stabilità di un pendio soggetto a carichi dinamici, sulla base del valore del coefficiente di sicurezza, non è sempre accettabile. Nelle analisi usuali, inoltre, non si tiene conto della variazione della resistenza al taglio indotta dagli spostamenti relativi e dalle velocità relative tra le pareti dei giunti.

Si ricorda qui che CUNDALL [1971] ha elaborato un modello di discretizzazione di un ammasso roccioso, basato sul metodo delle differenze finite, che permette di valutare gli spostamenti dei blocchi dell'ammasso e di definire la superficie di scorrimento non nota a priori. Di tale modello, sviluppato ini-

zialmente nell'ipotesi di carichi applicati staticamente, è stata data, recentemente, dallo stesso CUNDALL [1978] una più generale formulazione per analizzare anche i casi in cui sono presenti sollecitazioni dinamiche.

McKINNON [1979] ha studiato le condizioni di stabilità di un ammasso roccioso in cui si propagano onde di pressione causate da esplosioni. Il modello stato tensionale lungo le discontinuità sul metodo delle differenze finite e consente di valutare l'andamento dello stato tensionale lungo le discontinuità. Con tale modello, tuttavia, gli spostamenti relativi fra i blocchi lungo le discontinuità non possono essere calcolati.

NEWMARK [1965] propone un metodo di calcolo degli spostamenti di un blocco rigido poggiato su un piano e soggetto a sollecitazioni dinamiche. Con tale metodo, sviluppato sulla base di considerazioni di equilibrio limite, ed utilizzando gli accelerogrammi di terremoti registrati in quattro località degli Stati Uniti, viene valutato lo spostamento massimo del blocco, nell'ipotesi che la resistenza al taglio lungo la superficie di contatto blocco-piano segua una legge di tipo rigido-plastico.

Successivamente, FRANKLIN e CHANG [1977] hanno esteso l'analisi di Newmark considerando altri accelerogrammi.

L'esame dei vari metodi per la valutazione delle condizioni di stabilità di un ammasso roccioso fratturato pone in evidenza che la conoscenza della resistenza al taglio lungo le discontinuità è indispensabile per la risoluzione del problema. D'altra parte la relazione di dipendenza di tale resistenza dalla velocità di scorrimento e dalla entità degli spostamenti relativi non potrà essere definita nel dettaglio se non quando saranno disponibili i risultati di ulteriori prove su discontinuità naturali. Parallelamente all'indagine sperimentale è necessario ricavare delle relazioni che consentano di determinare il valore della resistenza al taglio lungo superfici di discontinuità di materiali lapidei. Le relazioni utilizzate a tale proposito da Crawford e Curran, ricavate sulla base dei risultati delle prove eseguite, rappresentano il primo tentativo di formulazione di una legge matematica che esprima il comportamento meccanico delle di-

scontinuità in presenza di sollecitazioni dinamiche.

Nel seguito, la velocità di scorrimento relativa e lo spostamento relativo fra le superfici verranno, per brevità, indicati rispettivamente con i simboli  $V_r$  e  $X_r$ .

## 2. Dispositivo sperimentale e risultati delle indagini.

L'apparecchiatura messa a punto dagli AA., permette di determinare la resistenza al taglio lungo discontinuità naturali o artificiali di materiali lapidei; la dimensione massima nei provini può raggiungere i 200 mm; la parte inferiore della scatola di taglio è rettangolare con dimensioni di 300 x 200 mm. È possibile in tal modo semplificare la conduzione delle prove poiché, anche nel caso di spostamento relativo di 100 mm, la tensione normale media sulla superficie di contatto non varia se il carico verticale rimane costante; l'apparecchiatura utilizzata, peraltro, consente di far variare sia i carichi normali che quelli tangenziali nel corso della prova. Le sollecitazioni normale e tangenziale vengono applicate per mezzo di due attuatori della capacità di 250 kN e possono essere variate, indipendentemente l'una dall'altra, secondo differenti leggi. Lo sforzo normale è applicato sulla scatola superiore, quello tangenziale sulla scatola inferiore; quest'ultima scorre sulla base di appoggio per mezzo di un cuscinetto a rulli e nel corso della prova viene spostata dapprima in un senso e quindi in senso opposto (andata e ritorno); lo spostamento massimo relativo fra le due metà della scatola (coincidente con lo spostamento assoluto, poiché la metà superiore è fissa) è di 100 mm in andata e 100 mm in ritorno. Con le apparecchiature adoperate dagli AA. un ciclo di spostamento (A + R) può essere compiuto alla velocità massima di scorrimento di 200 mm/sec (ciclo completo in 1 sec). La resistenza tangenziale viene misurata mediante due celle di carico collegate alla metà superiore della scatola, mentre gli spostamenti orizzontali della scatola inferiore e gli spostamenti verticali di quella superiore sono misurati con trasduttori di spostamento e per controllo con comparatori. È possibile, inoltre, determinare l'angolo di rotazione della parte superiore della scatola.

Gli AA. hanno condotto una serie di prove di taglio su discontinuità preparate in laboratorio. I materiali lapidei utilizzati per le esperienze sono dolomia, sienite, granito e arenaria. Le superfici di discontinuità sono state spianate e ricoperte con materiale abrasivo, realizzando giunti essenzialmente piani e di scabrezza nota. Il valore delle velocità di scorrimento im-

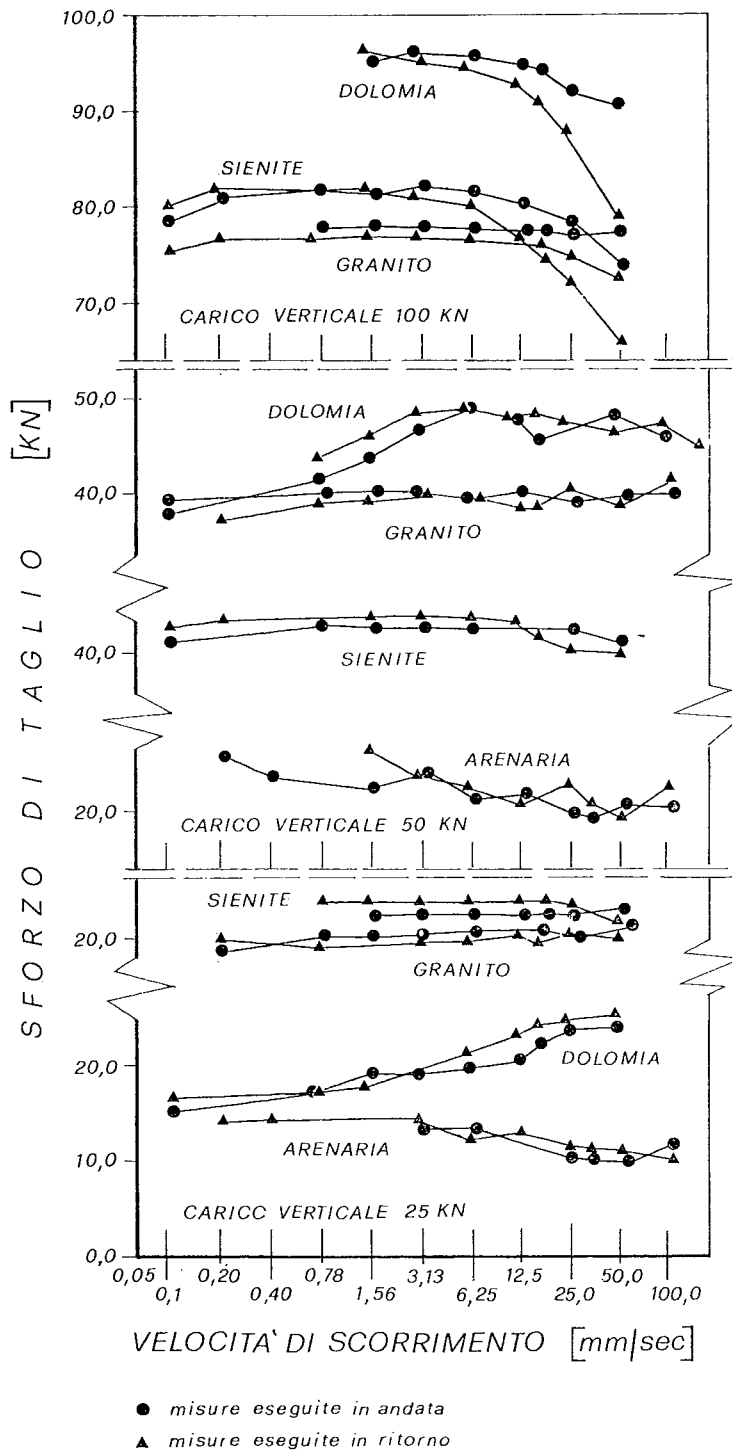


Fig. 1. - Valori di resistenza al taglio misurata al variare della velocità di scorrimento e del carico verticale.

prese ai provini nel corso delle esperienze è compreso tra 0,05 e 200 mm/sec.

I risultati delle prove eseguite dagli AA., tralasciando di riportarli dettagliatamente, mostrano che: la resistenza al taglio dei provini di sienite ed arenaria diminuisce con la velocità relativa  $V_r$  ed è tanto più accentuata quanto più elevato è lo sforzo normale; la resistenza al taglio delle discontinuità del granito risulta pressoché in-

dipendente dalla velocità relativa, mentre per la dolomia tale resistenza cresce con  $V_r$  per valori bassi del carico verticale applicato e diminuisce con  $V_r$  per i valori più alti del carico verticale. In tutti i casi esaminati gli AA. hanno osservato che per  $V_r < 10$  mm/sec la velocità di scorrimento non ha alcuna influenza sulla resistenza al taglio ed inoltre che questa dipende dall'entità dello spostamento relativo  $X_r$ .

Nella figura 1 sono riportati per diversi valori dello sforzo normale e della velocità di scorrimento i valori medi di resistenza al taglio misurata sia in andata che in ritorno. Gli AA., inoltre, hanno valutato, per ciascuna prova, lo scarto massimo dal valor medio. In alcuni casi tale scarto è notevole ed è dovuto, secondo gli AA., ad una variazione della resistenza al taglio al variare della posizione relativa delle superfici di contatto ovvero a fenomeni di « stick-slip » (avanzamento a scatti) osservati anche da altri sperimentatori in prove di taglio su metalli [BOWDEN, TABOR, 1964]. I risultati ottenuti da Crawford e Curran mostrano che la resistenza al taglio mobilitata al contatto fra le due superfici è funzione della velocità relativa, della composizione mineralogica del materiale lapideo nonché dello sforzo normale. Gli AA. hanno osservato, inoltre, che la riduzione di resistenza al taglio è essenzialmente dovuta alla velocità di scorrimento  $V_r$  ed allo spostamento relativo  $X_r$  ed è pressoché indipendente dalla scabrezza delle superfici di contatto. Le prove eseguite non consentono, tuttavia, di descrivere il fenomeno nel dettaglio né di valutare l'influenza di diversi parametri, quali l'ampiezza dell'area di contatto, la durata del contatto, nonché la temperatura raggiunta dal materiale a causa dello scorrimento. Nella figura 2 sono rappresentate schematicamente le curve resistenza al taglio-velocità di scorrimento per provini di roccia di diversa durezza.

Risultati analoghi sono stati ottenuti con prove di taglio a velocità di scorrimento impressa variabile, da RABINOWICZ [1964], che ha sperimentato su metalli. Anche in tal caso si osserva che la resistenza al taglio è legata sia alla velocità di scorrimento relativa tra le superfici che alle caratteristiche fisiche dei materiali a contatto; per alcuni metalli la resistenza al taglio diminuisce con  $V_r$  all'aumentare di  $V_r$ , mentre per altri cresce con  $V_r$  per valori bassi di  $V_r$  e si mantiene costante per valori più alti di  $V_r$ . Si ricorda in proposito che Bowden e Tabor (1964),

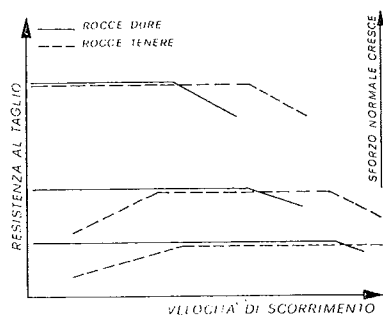


Fig. 2. - Andamento schematico della resistenza al taglio in funzione della velocità di scorrimento.

nel volume già citato, riportano i risultati di prove di laboratorio per la determinazione del coefficiente di attrito tra superfici metalliche. Tali risultati mostrano che il coefficiente di attrito varia con la velocità di scorrimento relativa tra le superfici, secondo le caratteristiche dei materiali a contatto.

### 3. Stabilità di un ammasso fratturato sottoposto a sollecitazioni dinamiche.

I risultati ottenuti da Crawford e Curran con prove di taglio lungo discontinuità artificiali di materiali lapidei ed i risultati analoghi ottenuti da altri autori mediante prove eseguite su metalli mostrano chiaramente che la resistenza al taglio, che si sviluppa lungo la superficie di contatto di due materiali in presenza di sollecitazioni dinamiche, può essere espressa da una relazione del tipo

$$\tau = f(\sigma, X_r, V_r, \dots)$$

Al momento, tuttavia, tale relazione non è stata ancora esplicitata, né è stata valutata l'influenza dei diversi fattori che intervengono nel fenomeno. Una completa analisi delle condizioni di stabilità di un ammasso roccioso fratturato in presenza di sollecitazioni dinamiche risulta, pertanto, alquanto complessa.

Un primo passo in questa direzione è stato compiuto dagli autori delle memorie che si recensiscono i quali hanno affrontato il problema della verifica di stabilità in presenza di sollecitazioni dinamiche relativamente al semplice caso di un blocco poggiato su un piano inclinato. L'analisi di stabilità è stata eseguita nell'ipotesi che la resistenza al taglio che si sviluppa lungo la superficie di contatto sia funzione dello spostamento relativo  $X_r$  ovvero della velocità relativa  $V_r$  tra le superfici, introducendo nel calcolo relazioni sperimentali.

Lo schema di riferimento adottato è riportato nella fig. 3. Siano  $m$  la massa del blocco,  $\alpha$  l'angolo formato dal pendio con l'orizzontale e  $\varphi$  l'angolo di attrito, per sollecitazioni di tipo statico, al contatto blocco-pendio. Siano inoltre,  $N$  ed  $S$  rispettivamente le forze normale e tangente alla superficie di scivolamento. Se  $S \leq N \tan \varphi$  il blocco è in equilibrio. Il coefficiente di sicurezza in assenza di forze d'inerzia e per pressioni neutre nulle è dato da:

$$\eta = \frac{(m g \cos \alpha) \operatorname{tg} \varphi}{m g \operatorname{sen} \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (1)$$

Se per effetto di un sisma il complesso blocco-pendio è soggetto ad una accelerazione  $A g$  la cui direzione forma

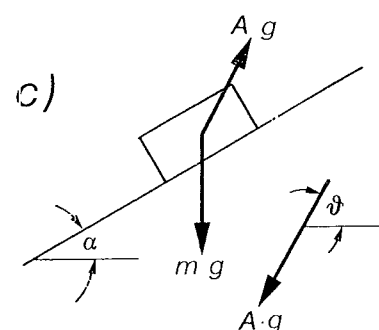
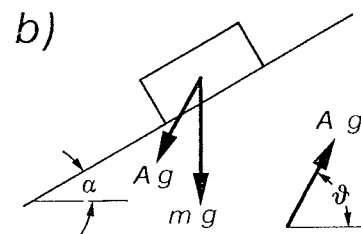
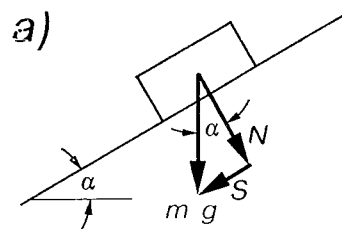


Fig. 3. - Schema fisico di riferimento per la verifica di stabilità in presenza di forze sismiche.

un angolo  $\theta$  con l'orizzontale ed ha il verso segnato in fig. 3b, il coefficiente di sicurezza risulta:

$$\eta = \frac{(\cos \alpha - A \operatorname{sen}(\alpha - \theta)) \operatorname{tg} \varphi}{A \cos(\alpha - \theta) + \operatorname{sen} \alpha} \quad (2)$$

Se l'accelerazione ha il verso indicato in fig. 3c si ha:

$$\eta = \frac{(\cos \alpha + A \operatorname{sen}(\alpha - \theta)) \operatorname{tg} \varphi}{A \cos(\alpha - \theta) - \operatorname{sen} \alpha} \quad (3)$$

Si può definire *accelerazione critica* o *di soglia* il valore dell'accelerazione esterna per cui il blocco si trova in condizioni di equilibrio limite; ponendo  $\eta = 1$  nelle (2) e (3) si trova, per i due versi del vettore accelerazione:

$$A'_c = \frac{\cos \alpha \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{sen} \alpha}{\cos(\theta - \alpha) - \operatorname{sen}(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \varphi} \quad (4)$$

$$A''_c = \frac{\cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{sen} \alpha}{\cos(\theta - \alpha) + \operatorname{sen}(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \varphi} \quad (5)$$

A mezzo delle (4) e (5) si può calcolare il valore massimo dell'accelerazione esterna  $A'_c g$  o  $A''_c g$  agente sul sistema per il quale non si verificano spostamenti relativi lungo la superficie di contatto. Si osserva che il valore dei coefficienti  $A'_c$  e  $A''_c$  dipende dal valore degli angoli  $\alpha$  e  $\theta$  e dall'angolo di attrito  $\phi$  della superficie di contatto.

Se l'accelerazione esterna  $A g$  è maggiore della  $A_c g$  il blocco si pone in movimento. Scegliendo un sistema di riferimento cartesiano ortogonale solidale al pendio, con asse X parallelo alla superficie di contatto l'equazione del moto del blocco è:

$$F - mx = 0 \quad (6)$$

con F risultante delle forze agenti sul blocco ed x accelerazione relativa del blocco rispetto al pendio. Se  $A g$  ha il verso indicato nella fig. 3b si ha:

$$m \chi = m A g [\cos(\theta - \alpha) - \sin(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \phi] +$$

$$- m g [\cos \alpha \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha]$$

$$\frac{\cos(\theta - \alpha) - \sin(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \phi}{\cos(\theta - \alpha) - \sin(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \phi}$$

$$m \chi = m A g [\cos(\theta - \alpha) - \sin(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \phi] +$$

$$- m g A'_c [\cos(\theta - \alpha) - \sin(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \phi]$$

$$\chi = g \frac{\cos(\alpha - \theta - \phi)}{\cos \phi} (A - A'_c) \quad (7)$$

Secondo SARMA [1975] sia il coefficiente di sicurezza che gli spostamenti relativi variano in misura trascurabile al variare di  $\theta$ ; si può quindi, in prima approssimazione, supporre  $\theta = \alpha$  e la (7) diviene:

$$\chi = g (A - A'_c) \quad (8)$$

Il termine  $(A - A'_c)$  evidenzia l'influenza dell'accelerazione di soglia  $A'_c g$ . La velocità relativa e gli spostamenti del blocco si ottengono integrando la (8).

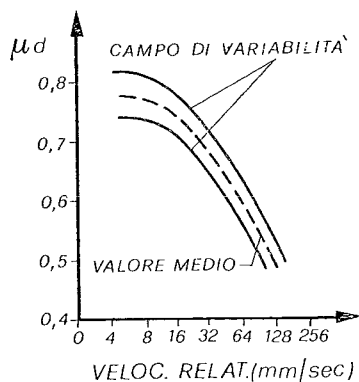


Fig. 4. - Valori del coefficiente di attrito dinamico in funzione della velocità di scorrimento per discontinuità piane in provini di sienite.

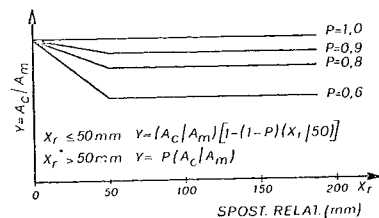


Fig. 5. - Valori del rapporto  $A_c/A_m$  fra l'accelerazione critica e l'accelerazione esterna massima in funzione dello spostamento relativo  $X_r$  al variare del parametro P.

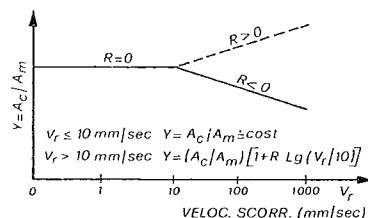


Fig. 6. - Valori del rapporto  $A_c/A_m$  fra l'accelerazione critica e l'accelerazione esterna massima in funzione della velocità relativa  $V_r$  al variare del parametro R.

Nei terremoti il valore di A varia nel tempo,  $A = A(t)$ . Lo spostamento complessivo del blocco si può ricavare come somma degli spostamenti corrispondenti agli intervalli di tempo durante i quali l'accelerazione esterna  $A g$  supera l'accelerazione critica  $A_c g$ . Se  $A g$  diminuisce e diviene minore della  $A_c g$  la velocità  $V_r$  e gli spostamenti  $X_r$  si riducono sino ad annullarsi.

Per determinare gli spostamenti del blocco rispetto al pendio è necessario conoscere il valore dell'accelerazione critica  $A_c g$ . Tale accelerazione, legata alla resistenza al taglio che può svilup-

parsi lungo la superficie di contatto è funzione sia di  $V_r$  che di  $X_r$ . Nella fig. 4 sono riportati i risultati ottenuti da prove di taglio diretto eseguite dagli autori delle memorie che si recensiscono, su discontinuità artificiali in provini di sienite; si osserva, in particolare, che il coefficiente di attrito si riduce notevolmente all'aumentare della velocità di scorrimento.

Per tenere conto della riduzione della resistenza al taglio durante il processo di scorrimento, gli AA. hanno proposto e utilizzato due relazioni che legano l'accelerazione critica agli spostamenti relativi,  $A_c g = A_c g(X_r)$ , ed alle velocità relative,  $A_c g = A_c g(V_r)$ . Tali relazioni, riportate nei grafici delle fig. 5 e 6, permettono di valutare l'accelerazione critica  $A_c g$  in funzione di  $A_c/A_m$  rapporto fra l'accelerazione critica  $A_c g$  relativa alla condizione statica ed il valore massimo  $A_m g$  dell'accelerazione esterna dedotto dall'accelerogramma del sisma considerato. Tali relazioni sono state ricavate sulla base di prove di taglio dinamiche eseguite da vari autori [GOODMAN, 1976; CRAWFORD e CURRAN, 1981]; le prove hanno mostrato che la resistenza al taglio diminuisce all'aumentare degli spostamenti relativi raggiungendo il valore minimo per uno spostamento massimo di 50 mm circa ed inoltre che la resistenza al taglio varia in funzione della velocità di scorrimento. Poiché, inoltre, tale resistenza dipende dal valore dello sforzo normale applicato e dalla composizione mineralogica della roccia presente in corrispondenza della superficie di discontinuità, le relazioni  $A_c g = A_c g(X_r)$  e  $A_c g = A_c g(V_r)$  sono state espresse in funzione di due parametri P ed R, i quali assumono valori diversi al variare delle condizioni di carico e della natura delle superfici in contatto.

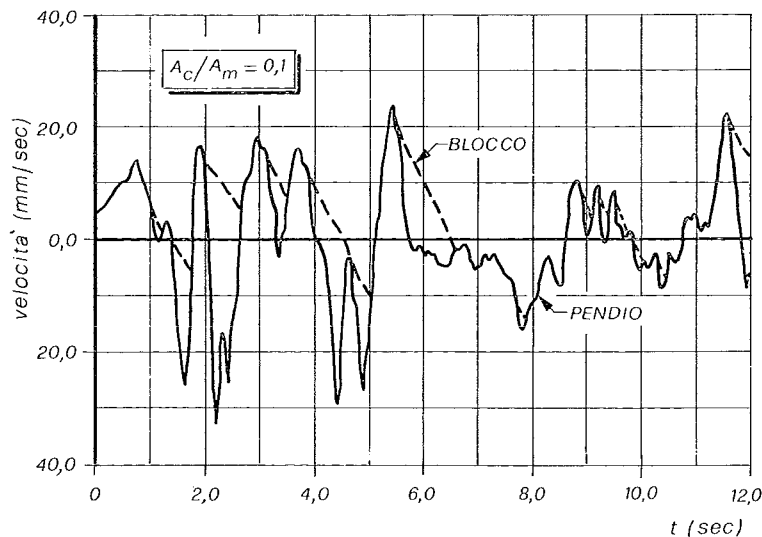


Fig. 7. - Andamento nel tempo della velocità relativa blocco-pendio in presenza di un'accelerazione esterna: data dall'accelerogramma del terremoto di El Centro e per resistenza al taglio funzione della velocità relativa.

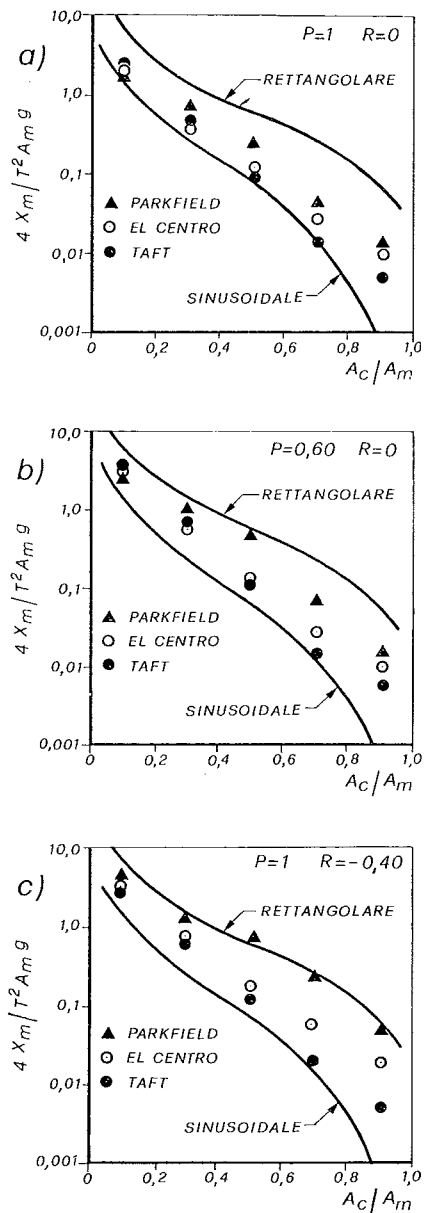


Fig. 8. - Relazione adimensionale fra la velocità massima relativa blocco-pendio e l'accelerazione critica.

Gli AA. non presentano, tuttavia, alcuna definizione dei parametri P ed R, che vengono fissati sulla base dei risultati delle prove eseguite. In particolare, nell'analisi di stabilità presentata essi assegnano a P ed  $(1 - R)$  valori compresi fra 1 e 0,6 relativi alle due condizioni, rispettivamente, di resistenza al taglio indipendente dalla velocità di scorrimento e dagli spostamenti e di riduzione di resistenza con  $X_r$  e  $V_r$  del 40%.

Gli AA. hanno messo a punto un programma di calcolo automatico che permette di valutare gli spostamenti relativi e le velocità relative del blocco rispetto al piano inclinato in presenza di sollecitazioni dinamiche. In tale programma sia la velocità che lo spo-

stamento del blocco sono ottenuti integrando numericamente, per intervalli di tempo finiti di 0,001 sec l'equazione del moto

$$F - m \ddot{x} = 0$$

nell'ipotesi che nel generico intervallo di tempo l'accelerazione critica ( $A_c g$ ), sia costante. La ( $A_c g$ ), è valutata sulla base dei valori di  $V_r$  e  $X_r$  calcolati nell'intervallo di tempo  $t - 1$ . Nei calcoli gli AA. hanno fatto riferimento agli accelerogrammi dei terremoti di El Centro, Taft e Parkfield.

Nel diagramma di fig. 7 sono riportate in funzione del tempo la velocità del pendio e la velocità del blocco relativa al pendio, nell'ipotesi che la resistenza al taglio sia funzione di  $V_r$ ,  $A_c g = A_c g (V_r)$ , e che l'accelerazione esterna vari nel tempo secondo l'accelerogramma di El Centro. Il diagramma pone in evidenza che al variare della velocità relativa blocco-pendio varia la resistenza al taglio e di conseguenza la pendenza della curva velocità del blocco-tempo.

Nei grafici delle figg. 8 e 9 sono riportati in forma adimensionale i valori dello spostamento massimo relativo  $X_m$  e della velocità massima relativa  $V_m$  in funzione del rapporto  $A_c/A_m$  fra l'accelerazione critica  $A_c g$  relativa alle condizioni statiche e l'accelerazione esterna massima  $A_m g$  per i tre accelerogrammi utilizzati nel calcolo. Negli stessi grafici sono riportati per confronto i risultati che si ottengono nell'ipotesi che l'accelerazione esterna abbia andamento rettangolare o sinusoidale con ampiezza pari a  $A_m g$  e durata pari a  $T/2$ , T essendo il periodo predominante ottenuto dall'accelerogramma. Nei grafici delle figg. 10 e 11 sono riportati i valori massimi di spostamento relativo e velocità relativa, espressi rispettivamente in mm e mm/sec, in funzione dei parametri di resistenza P ed R e del rapporto  $A_c/A_m$ . Gli AA. hanno fatto riferimento ai primi nove secondi di ciascuna registrazione ed hanno condotto l'analisi relativamente a tre situazioni tipiche: resistenza indipendente da spostamenti e velocità relativi,  $P = 1$ ,  $R = 0$ , resistenza funzione solo degli spostamenti relativi  $P = 0,60$ ,  $R = 0$ , e resistenza funzione solo della velocità relativa  $R = -0,40$ .

Dalle figg. 8 e 10 risulta che per piccoli valori del rapporto  $A_c/A_m$  gli spostamenti massimi relativi che si ottengono nei due casi  $A_c g = A_c g (X_r)$  e  $A_c g = A_c g (V_r)$  sono dello stesso ordine di grandezza. E da notare, tuttavia, che se l'accelerazione esterna cresce, come nel caso del terremoto di Parkfield, le velocità relative aumentano e di conseguenza la riduzione di resistenza per effetto della velocità diviene apprezzabile; aumenta così lo spostamento massimo del blocco. Tale fenomeno

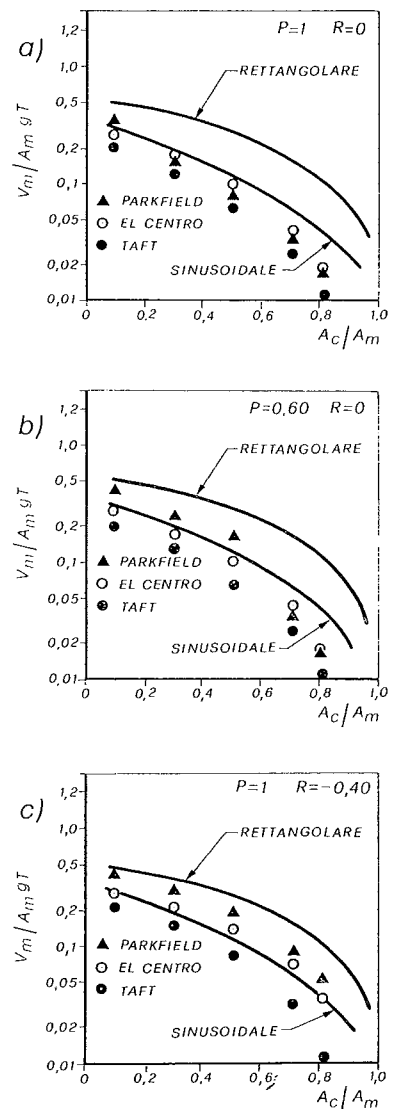


Fig. 9. - Relazione adimensionale fra la velocità massima relativa blocco-pendio e l'accelerazione critica.

meno si riscontra anche per valori più alti del rapporto  $A_c/A_m$ , ma in tal caso gli spostamenti sono sensibilmente ridotti. Risultati analoghi sono stati ottenuti nella determinazione dei valori di velocità relativa riportati nei grafici delle figg. 9 e 11.

#### 4. Conclusioni.

La particolare scatola di taglio realizzata dagli AA. presso l'Università di Toronto consente di valutare la resistenza al taglio lungo discontinuità di materiali lapidei in presenza di sollecitazioni dinamiche. Utilizzando tale apparecchiatura, gli AA. hanno eseguito prove di taglio diretto su discontinuità artificiali in rocce diverse e per valori della velocità di scorrimento impressa variabili fra 0,05 e 200 mm/sec, vale a dire di due o tre ordini di

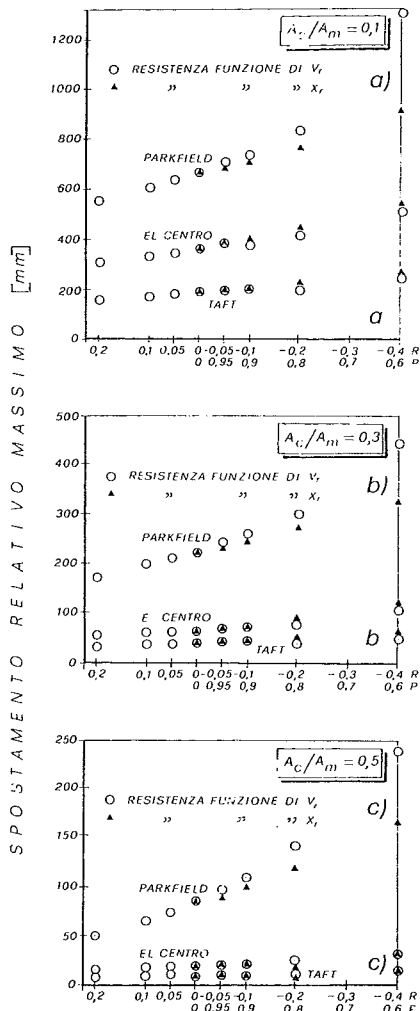


Fig. 10. - Valori dello spostamento massimo relativo blocco-pendio al variare dei parametri di resistenza P, R.

grandezza più elevati di quelli che si raggiungono con le prove usuali. I risultati ottenuti hanno messo in evidenza che la resistenza al taglio dipende sia dalla velocità relativa che dagli spostamenti relativi fra le superfici stesse. In particolare gli AA. hanno osservato che, per velocità di scorrimento maggiori di  $10^{-3}$  mm/sec, tale resistenza si riduce apprezzabilmente nelle rocce dure (sienite, arenaria) mentre è crescente o pressoché costante nelle rocce tenere (dolomia). La ridu-

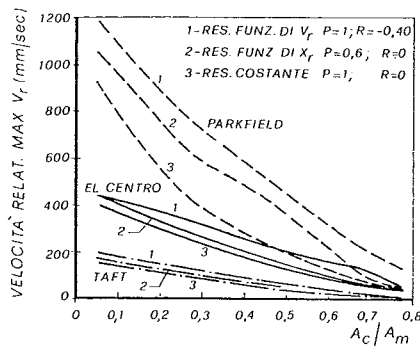


Fig. 11. - Valori della velocità massima relativa blocco-pendio al variare dell'accelerazione critica e dei parametri di resistenza P, R.

zione di resistenza associata con l'incremento delle velocità relative è inoltre paragonabile alla riduzione dipendente dall'entità dello spostamento relativo e varia al variare dello sforzo normale applicato. Tuttavia, se la velocità di scorrimento cresce apprezzabilmente gli effetti della velocità relativa sulla resistenza divengono predominanti.

Il fenomeno della dipendenza della resistenza al taglio dalla velocità di scorrimento e dagli spostamenti relativi non potrà però essere definito nel dettaglio se non quando saranno disponibili altre prove su rocce diverse e per differenti condizioni di carico. I risultati delle esperienze fin qui condotte non permettono, infatti, di valutare l'influenza di diversi parametri, fra i quali l'estensione e la natura delle zone di contatto, la temperatura che si raggiunge a causa dello scorrimento, nonché il valore delle tensioni nelle zone di contatto. Al momento non è possibile, pertanto, ricavare una legge che esprima il comportamento meccanico delle discontinuità e fornisca il valore della resistenza al taglio al variare delle condizioni di carico e della composizione mineralogica del materiale che costituisce le pareti della discontinuità. Le relazioni proposte dagli AA., ricavate sulla base delle prove eseguite ed utilizzate per l'analisi di stabilità del blocco poggiate su un piano inclinato e soggetto a forze sismiche, rappresentano un pri-

mo tentativo per la formulazione di una legge di tal tipo. La loro applicabilità è, tuttavia, limitata a situazioni relativamente semplici ed inoltre gli AA. non danno alcun suggerimento di carattere generale per la determinazione dei parametri P ed R i cui valori vengono fissati sulla base della semplice osservazione dei risultati delle esperienze.

Se da un lato quindi non si può non ritenere notevole il contributo degli AA. per una precisa caratterizzazione meccanica delle discontinuità dei materiali lapidei, dall'altro rimane l'esigenza di disporre di un maggior numero di dati sperimentali, nonché di un modello di comportamento delle discontinuità più completo al fine di formulare una legge che permetta di valutare la resistenza al taglio che si sviluppa al contatto di due superfici in presenza di sollecitazioni dinamiche.

I progressi in questa direzione sono certamente difficili; la caratterizzazione della geometria delle superfici di discontinuità, in genere complessa, è certamente uno degli ostacoli maggiori: non si può dimenticare, infatti, che gli AA. hanno aggirato il problema eseguendo le prove su discontinuità artificiali di scabrezza nota.

(Giovanni Bosco)

#### BIBLIOGRAFIA

- BOWDEN F. P., TABOR D. (1964) - *The friction and lubrication of solids*. Oxford University Press - London.
- CRAWFORD A. M. & CURRAN J. H. (1981) - *The influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 18, 505-515.
- CUNDALL P. A. (1971) - *A computer model of simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems*. Proc. Int. Symp. on Rock Fracture, ISRM, Nancy.
- NEWMARK N. M. (1965) - *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Geotechnique 15, 139-160.
- RABINOWICZ E. (1964) - *Friction and Wear of Materials*. Wiley, New York.
- SARMA S. K. (1975) - *Seismic stability of earth dams and embankments*. Geotechnique 25, 43-76.