

GIAN PAOLO GIANI

# CADUTA DI MASSI

Analisi del moto  
ed opere di protezione

ARGOMENTI DI INGEGNERIA GEOTECNICA ● 5

 HEVELIUS  
EDIZIONI



ARGOMENTI  
DI INGEGNERIA  
GEOTECNICA

*H*

*Collana diretta  
da Carlo Viggiani*



Percorrendo in automobile le strade del nostro Paese ci si imbatte di frequente nel segnale "Caduta di Massi". Di fronte a quel triangolo di lamiera con su dipinto un minaccioso masso rotolante, il malcapitato automobilista non sa se rallentare per schivare eventuali massi già caduti sulla sede stradale, o accelerare per sottrarsi il più rapidamente possibile al pericolo di nuove cadute; ma in lui rimane comunque una sensazione di disagio e di impotenza.

E invece oggi è possibile difendersi. In effetti, la caduta di massi viene attualmente considerata un vero e proprio problema di Ingegneria Geotecnica, di grande rilievo non solo per le vie di comunicazione, e viene studiato con i metodi sperimentali, analitici e numerici propri della Meccanica delle Rocce. A questo problema è appunto dedicato il presente lavoro.

Gian Paolo Giani è professore di Geotecnica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Parma; la sua formazione è avvenuta presso il Politecnico di Torino. E' autore di numerose pubblicazioni, e di un libro dedicato alla stabilità dei pendii in roccia, pubblicato anche in lingua inglese dal prestigioso editore Balkema.

Egli parte da una descrizione e da una classificazione del fenomeno, per poi esporre le metodologie sperimentali con le quali si possono misurare i parametri che regolano il fenomeno. Tratta quindi i metodi, analitici e numerici, per simulare le traiettorie di caduta. Infine passa in rassegna le principali tipologie di opere paramassi ed i relativi metodi di dimensionamento.

Gli automobilisti possono respirare; gli ingegneri geotecnici lavorano per loro!

*Napoli, settembre 1997*

*Carlo Viggiani*



GIAN PAOLO GIANI

# CADUTA DI MASSI

Analisi del moto  
ed opere di protezione



# 1. CONCETTI GENERALI

## *1.1. Introduzione*

La protezione dalla caduta di massi viene trattata in questo testo attraverso la descrizione di una metodologia che si articola in più fasi che comprendono osservazioni, misure, modelli, decisioni, scelte e dimensionamento delle strutture di difesa.

Partendo dalla osservazione dei fenomeni naturali e classificandoli sulla base delle caratteristiche fisiche e geometriche vengono descritte delle metodologie di prove in sito e delle tecniche di misura delle caratteristiche del moto di caduta di massi e dei parametri che regolano il fenomeno.

Nel testo vengono quindi trattati metodi di calcolo analitici o numerici per la modellazione del percorso di caduta di massi e per la determinazione delle equazioni del moto.

Le tipologie di opere paramassi correntemente utilizzate vengono descritte in modo da individuare l'intervento necessario per il tipo di fenomeno in esame. Infine vengono trattati i metodi di dimensionamento delle opere stesse.

## *1.2. Osservazione del fenomeno*

I fenomeni che vengono esaminati in questo testo sono quelli relativi al distacco ed alla caduta di singoli blocchi da pareti di roccia. Il testo non tratta quindi frane da crollo in roccia di notevoli dimensioni che si scompaginano durante gli impatti generando blocchi di dimensioni inferiori che interagiscono nel percorso di caduta.

I tipi di difesa che si studiano sono quelli che vengono messi in opera per trattenere singoli blocchi delle dimensioni di qualche metro cubo che raggiungono velocità anche dell'ordine di 30 m/s.

I fenomeni in esame sono quelli che si verificano su pareti rocciose, che possono avere già subito dei movimenti di crollo, quando dei blocchi isolati, potenzialmente instabili, si distaccano a seguito di cause di instabilità locali.

Osservazioni in sito possono essere fatte esaminando le posizioni di arresto di blocchi già distaccatisi e i loro percorsi di caduta soprattutto quando più blocchi distaccatisi in fasi di tempo successive hanno creato delle vie preferenziali formando delle vere e proprie piste (figg. 1.1, 1.2).

Prove in situ possono essere condotte per determinare i parametri caratteristici del moto su versanti naturali e artificiali che devono essere tenuti sotto controllo e protetti.

Il rilievo quantitativo delle discontinuità sulle pareti rocciose da cui possono distaccarsi i blocchi assume importanza nello studio del fenomeno in quanto da esso possono essere valutati il volume del blocco unitario, la forma dei blocchi, la loro resistenza e la condizione di incipienza di movimento.

### **1.3. Prove in situ**

I metodi di calcolo per valutare i percorsi di caduta e l'energia cinetica assunta dai massi sono fondati su ipotesi semplificative legate al fatto che il fenomeno in esame è molto complesso e che i parametri che lo governano possono essere determinati solo con una certa aleatorietà.

Prove in situ di caduta di massi lungo versante vengono condotte sia per osservare dei fenomeni fisici che non sono necessariamente prevedibili a priori, sia per valutare i parametri caratteristici dei tipi di moto che possono avvenire.

La realizzazione di una prova in situ comporta la necessità di scegliere un sito che sia da una parte rappresentativo del tipo di fenomeno che si intende studiare e da un'altra parte controllabile e proteggibile. A causa delle alte velocità che sono rag-



*Fig. 1.1:* Percorso di caduta di massi successivo alla frana di crollo di Carema (To)



*Fig. 1.2:* Scorcio di un tratto di percorso di caduta di massi sul versante sud della valle del Rodano nel cantone Vallese nei pressi di Sion (fotografia prof. Descoedres)

giunte dai massi nelle prove, il percorso di caduta viene usualmente controllato per tratti non superiori ai 100 m e lungo i quali la topografia del pendio sia determinabile con una discreta precisione.

Le prove comportano la movimentazione di un discreto numero di massi, generalmente almeno 50, e la registrazione del percorso con più telecamere fisse o con macchine fotografiche metriche.

I blocchi esaminati vengono misurati determinando il loro volume e la loro forma: può essere importante valutare il momento di inerzia dei blocchi rispetto ai loro assi.

Per poter innescare il movimento vengono di solito utilizzate delle pale gommatae con capacità della benna di qualche metro cubo.

In questo modo si possono raggiungere altezze di caduta dell'ordine di 2 m con il raggiungimento di velocità iniziali riconducibili a quelle che si possono avere nei problemi reali (*fig. 1.3*).



*Fig. 1.3: Prova in sito di caduta di massi in una cava dismessa (Barbieri et al., 1991)*

Prove in sito vengono anche svolte per sperimentare direttamente l'efficacia di diversi tipi di opere di difesa (fig.1.4).



Fig. 1.4: Vista d'insieme di un campo prove durante la fase di impatto di un blocco su una barriera paramassi (Peila, Pelizza & Sassudelli, 1995)

#### 1.4. Modelli previsionali

Diversi metodi di calcolo del percorso di caduta di massi sono riportati nella letteratura tecnica. Questi metodi possono essere suddivisi sulla base dei tipi di approssimazione che vengono introdotti. Il modello più semplice è definito metodo *lumped mass* in quanto considera il blocco puntiforme e la massa concentrata nel punto. Metodi *lumped mass* sono stati sviluppati sia per lo studio del moto di caduta di un blocco che è contenuto in una sezione verticale, sia per lo studio di moti in campo tridimensionale. Metodi più sofisticati, ma sempre di tipo analitico, in quanto descrivono le equazioni del moto, sono stati sviluppati per esaminare blocchi di forma ellissoidale, cilindrica o sferica. Questi me-

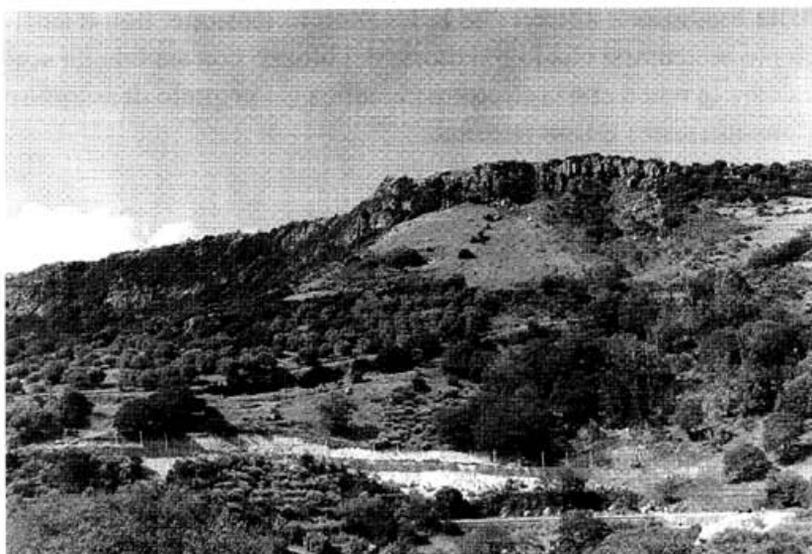
todi possono, a differenza dei metodi *lumped mass*, determinare i momenti rotazionali e traslazionali che si generano negli impatti.

Metodi numerici come il DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*) vengono utilizzati per studiare, nell'ambito del comportamento meccanico di un sistema di blocchi, il movimento di singoli blocchi che si distaccano da pareti rocciose. La scelta di metodi più o meno sofisticati dipende principalmente dall'affidabilità dei dati di ingresso del problema. Più i dati di ingresso del problema sono affidabili e più è giustificabile l'uso di metodi sofisticati.

### ***1.5. Opere di difesa***

Il principio fondamentale che deve essere tenuto in conto prima di procedere al dimensionamento di un'opera paramassi è quello secondo cui un blocco, soggetto ad un movimento di caduta o di rotolamento su un pendio, rispetta, in ogni istante, la condizione di massima efficienza del moto. Di conseguenza sia le traiettorie compiute da un blocco, sia il tipo di moto assunto durante il percorso sono quelli che determinano la minor perdita di energia cinetica. Il tipo di moto, per il quale generalmente un blocco perde la maggior aliquota di energia cinetica, è quello di caduta libera con traiettoria di impatto verticale. Per questo motivo una gradonatura del pendio è efficiente per arrestare i blocchi, così come lo sono i fossati di protezione. Reti o sbarramenti paramassi posti lungo il pendio, senza una modifica della morfologia a monte dell'opera, si trovano a dover assorbire un'energia di impatto non precedentemente smorzata (*fig. 1.5*).

La scelta della posizione dove mettere in opera un intervento di difesa deve quindi essere fatta solo dopo aver esaminato, nell'ambito di un calcolo del moto, la variazione di energia cinetica che i blocchi subiscono durante il loro percorso. Naturalmente saranno da scegliere le posizioni dove le energie cinetiche sono minori ed in ogni caso si potranno valutare, sempre con i modelli



*Fig. 1.5:* Esempio di protezione di una strada con barriera paramassi e fossato di raccolta a monte - Strada Provinciale Siligo-Bessude (Sassari) (fotografia Tubosider Italiana)

matematici, come delle modificazioni morfologiche del pendio determinano delle riduzioni dell'energia cinetica assunta dal blocco.

La scelta della tipologia dell'opera dipende soprattutto dalla funzione che si vuole dare all'opera stessa. Reti paramassi possono essere installate sia per intercettare direttamente i blocchi, sia per trattenere eventuali frammenti di massi scompaginati nell'impatto. Rilevati paramassi possono essere installati per assorbire grandi energie di impatto.

Nel caso in cui il versante in esame sia troppo acclive per poter permettere l'inserimento di opere che intercettino i blocchi, l'intervento di protezione viene limitato alla sola struttura da difendere: è questo il caso per esempio delle gallerie paramassi.

Il dimensionamento di un'opera complessa come una rete paramassi ad alta resistenza deve tener conto di tutte le componenti strutturali dell'opera stessa e della sua realizzazione in sito,

dalla fondazione ai cavi che la tengono in tensione; non è sufficiente assicurarsi che la traiettoria del blocco non sia tale da scavalcare la rete o che la struttura metallica sia in grado di assorbire l'impatto senza essere perforata.

## **2. ANALISI DEL MOVIMENTO DI CADUTA DI MASSI**

### ***2.1. Introduzione***

L'analisi del movimento di caduta di massi viene svolta con riferimento al moto di un singolo blocco che si distacca da una parete rocciosa e perde temporaneamente contatto con il pendio senza interagire con altri blocchi.

I tipi di moto da descrivere possono, in prima approssimazione, essere limitati a quattro: caduta libera, rimbalzo, rotolamento e scivolamento.

### ***2.2. Distacco e condizione di incipienza di caduta***

L'innescio di un movimento di caduta è determinato generalmente da una rottura per taglio o per trazione lungo piani di discontinuità preesistenti che separano un blocco potenzialmente instabile dalla retrostante massa rocciosa costituente il pendio.

Le principali cause che possono provocare il distacco iniziale sono:

- il flusso d'acqua nelle discontinuità;
- le vibrazioni indotte da un sisma o quelle generate dall'utilizzo di esplosivo;
- le pressioni indotte nelle discontinuità dalle pressioni idrauliche o dalla formazione di ghiaccio;
- le operazioni di scavo o l'applicazione di carichi sul pendio.

Un blocco che si distacca da una parete rocciosa può precipitare nel vuoto quando la parete è subverticale o aggettante oppure può scivolare, ribaltare o rotolare lungo il pendio prima di raggiungere le condizioni di incipienza di caduta libera.

La velocità del blocco, nel momento in cui si affaccia nel vuoto, costituisce un dato iniziale per l'analisi dei successivi movimenti.

Il calcolo dei parametri iniziali può essere eseguito così come descritto qui di seguito (Alivernini, 1995).

- *Calcolo della condizione di incipienza di caduta nel caso di un blocco schematizzato come una lamina che scivola lungo il pendio inclinato di  $\alpha$  rispetto all'orizzontale*

Posto un sistema di riferimento  $\{0, x, y\}$  come in figura 2.1: dalle equazioni cardinali della dinamica si ha:

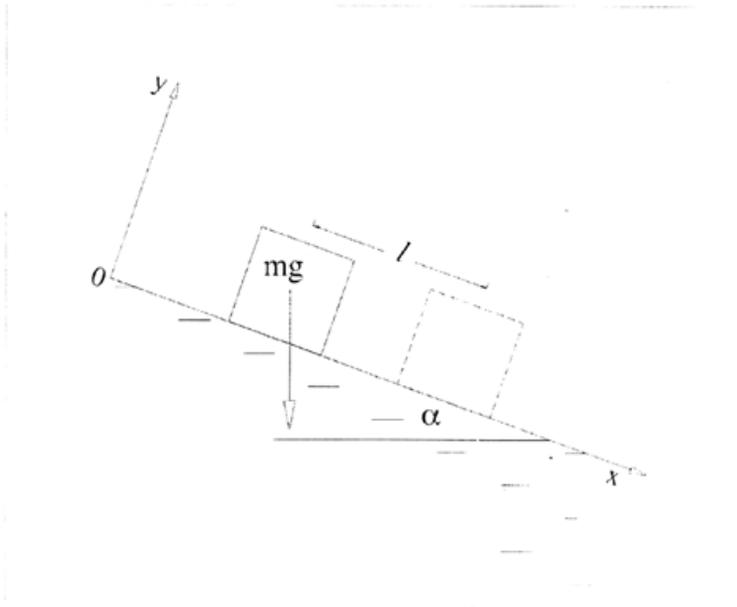


Fig. 2.1: Blocco considerato di forma rettangolare

$$(2.1) \quad \begin{cases} m\bar{a}_G = m\bar{g} + \bar{r} \\ 0 = M_G^v \end{cases}$$

dove  $\bar{a}_G$  è il vettore accelerazione, riferito al baricentro G,  $\bar{r}$  il vettore risultante delle reazioni vincolari,  $\bar{g}$  il vettore dell'accelerazione di gravità e  $M_G^v$  è il momento delle forze esterne (vincolari)

calcolato in G.

Proiettando la (2.1) sugli assi x,y e considerando il caso in cui la fase di moto sia discendente si ottiene:

$$(2.2) \quad \begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha + r_x & (a) \\ 0 = -mg\cos\alpha + r_y & (b) \\ r_x = -f_d mg\cos\alpha & (c) \end{cases}$$

dove la (2.2.c) è ricavata dalla legge empirica dell'attrito dinamico.

Pertanto dalla (2.2.a) e dalla (2.2.c) si ricava:

$$(2.3) \quad m\ddot{x} = mg\sin\alpha - f_d mg\cos\alpha$$

semplificando e ponendo  $f_d = \tan\phi$  risulta:

$$(2.4) \quad \ddot{x} = g\cos(\tan\alpha - \tan\phi)$$

che è l'equazione del moto.

E' necessario distinguere tre fasi di moto, potendo assumere valori maggiori, minori e uguali a zero:

1. Fase di moto uniformemente accelerato:

$$\tan\alpha > \tan\phi \Rightarrow \ddot{x} > 0, \dot{x}\ddot{x} > 0$$

2. Fase di moto uniforme:

$$\tan\alpha = \tan\phi \Rightarrow \ddot{x} = 0$$

3. Fase di moto uniformemente ritardato:

$$\tan\alpha < \tan\phi \Rightarrow \ddot{x} < 0, \dot{x}\ddot{x} < 0$$

la velocità del blocco, quindi, decresce sino ad annullarsi per  $\dot{x} = 0$ .

Nella fase precedente la caduta, il blocco può essere in una fase di moto uniformemente accelerato.

La velocità iniziale di caduta libera è determinata come:

$$(2.5) \quad \dot{x}^2 = \dot{x}_0^2 + 2\ddot{x}(x - x_0)$$

e sostituendo la (2.4) nella (2.5) si ottiene:

$$(2.6) \quad \dot{x}^2 = \dot{x}_0^2 + 2[g\cos\alpha(\tan\alpha - \tan\phi)] \cdot x$$

Assumendo, come riportato in figura 2.1, che il tratto per-

corso dal blocco sia pari a  $l$  e ammettendo che il blocco parta da fermo si ricava la condizione iniziale:

$$(2.7) \quad \dot{x}^2 = 2g \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \phi) \cdot l$$

- *Calcolo della condizione di incipienza di caduta nel caso di un blocco schematizzato di forma sferica che scivola lungo il pendio inclinato di  $\alpha$  rispetto all'orizzontale (fig. 2.2)*

Nell'ipotesi che il blocco rotoli senza scivolare, dalle equazioni cardinali della dinamica si ottiene:

$$(2.8) \quad \begin{cases} m\bar{a}_G = m\bar{g} + \bar{r} \\ \dot{\bar{K}}_G = \overline{GA} \times \bar{r} \end{cases}$$

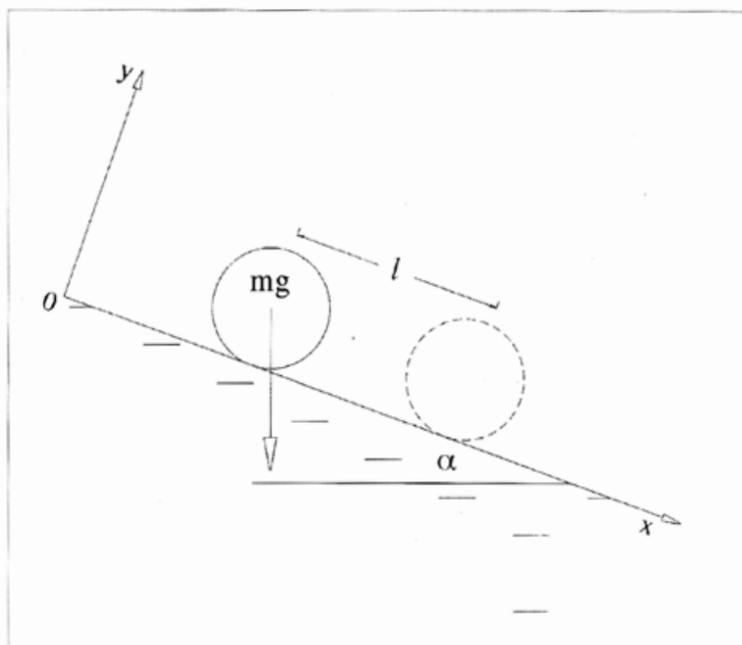


Fig. 2.2: Blocco considerato di forma sferica

dove  $G$  è il baricentro della sfera,  $\dot{\bar{K}}_G$  è la derivata del momento

della quantità di moto rispetto a G, A è il punto di contatto sferapiano inclinato e  $\bar{r}$  è la risultante delle forze esterne.

Proiettando la (2.8) sugli assi x e y si ottiene :

$$(2.9) \quad \begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha + r_x \\ m\ddot{y} = 0 = -mg\cos\alpha + r_y \\ J\ddot{\theta} = r_x R \end{cases}$$

dove J è il momento di inerzia della sfera  $[(2/5)mR^2]$ ,  $\ddot{\theta}$  è l'accelerazione angolare, R è il raggio e  $\alpha$  è l'inclinazione del pendio.

Quindi sostituendo il valore di J della sfera nella (2.9) si ottiene:

$$(2.10) \quad \begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha + r_x \\ m\ddot{y} = 0 = -mg\cos\alpha + r_y \\ \frac{2}{5}mR^2\ddot{\theta} = r_x R \end{cases}$$

Per l'ipotesi di non scivolamento deve essere verificata la disuguaglianza:

$$(2.11) \quad r_x \leq f_d r_y$$

dalla (2.10) si ricava:

$$r_y = mg\sin\alpha$$

ed utilizzando la (2.11) si ottiene:

$$(2.12) \quad -\ddot{x} = r\ddot{\theta} \Rightarrow \ddot{\theta} = -\frac{\ddot{x}}{R}$$

sostituendo la 2.12 nella terza delle equazioni 2.10 si ottiene:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha + r_x \\ m\ddot{y} = 0 = -mg\cos\alpha + r_y \\ \frac{2}{5}mR^2 \frac{\ddot{x}}{R} = r_x R \end{cases}$$

si ricava pertanto:

$$(2.13) \quad r_x = -\frac{2}{5}m\ddot{x} \Rightarrow \ddot{x} = -\frac{5}{2}\frac{r_x}{m}$$

che sostituiti nella prima della (2.10) danno:

$$(2.14) \quad r_x = \frac{2}{7}mg\sin\alpha$$

Quindi con la condizione di non scivolamento si deve avere che:

$$\frac{2}{7}mg\sin\alpha \leq f_d mg \cos\alpha$$

infine semplificando si ottiene:

$$(2.15) \quad \tan\phi \geq f_d \geq \frac{2}{7}\tan\alpha$$

che rappresenta la condizione di rotolamento senza scivolamento.

Sostituendo nella (2.10) il valore di  $r_x$  (2.13) è possibile ricavare l'accelerazione del blocco sferico come:

$$\ddot{x} = \frac{5}{7}g\sin\alpha$$

e infine la velocità:

$$(2.16) \quad \dot{x}^2 = \dot{x}_0^2 + \frac{10}{7}g\sin\alpha l$$

che permette, nel rispetto della (2.15), di definire l'incipienza di caduta.

- *Calcolo della condizione di incipienza di caduta nel caso di un blocco schematizzato di forma cilindrica che scivola e rotola lungo il pendio avente inclinazione  $\alpha$  rispetto all'orizzontale*

Si consideri un blocco di forma cilindrica che scivola e rotola sul pendio (fig. 2.3):

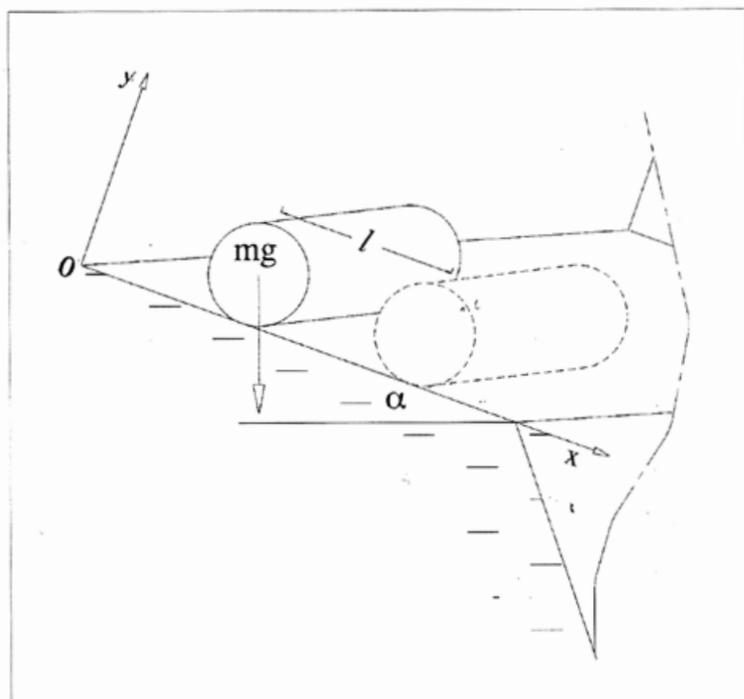


Fig. 2.3: Blocco considerato di forma cilindrica

Dalle equazioni cardinali della dinamica si ha:

$$(2.17) \quad \begin{cases} m\bar{a}_G = m\bar{g} + \bar{r} \\ \dot{\bar{K}}_G = \overline{GA} \times \bar{r} \end{cases}$$

inoltre

$$(2.18) \quad \bar{T} = -f_d N \text{vers}\bar{v}$$

essendo

$$\dot{\bar{K}}_G = \frac{1}{2} mR^2 \dot{\theta} \bar{e}_3$$

$$\overline{GA} \times \bar{r} = -R\bar{e}_2 \times (r_x \bar{e}_1 + r_y \bar{e}_y) = Rr_x \cdot \bar{e}_3$$

dove  $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ , sono i versori degli assi x,y,z.

Proiettando rispetto agli assi x e y si ottiene:

$$(2.19) \quad \begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha + r_x \\ my = 0 = -mg\cos\alpha + r_y \\ \frac{1}{2}mR^2 \frac{\ddot{\theta}}{R} = r_x R \end{cases}$$

e

$$(2.20) \quad r_y = -f_d r_x$$

Dalla (2.19) si ricava che:

$$\frac{1}{2}mR\ddot{\theta} = r_x = -f_d r_y$$

e quindi

$$(2.21) \quad \begin{cases} \frac{1}{2}mR\ddot{\theta} = -f_d mg\cos\alpha \\ m\ddot{x} = mg\sin\alpha - f_d mg\cos\alpha \end{cases}$$

che sono le equazioni del moto.

Per l'ipotesi di scivolamento si ha:

$$(2.22) \quad v_{\tau_A} = \dot{x} + R\dot{\theta}$$

e ammettendo che:

$$\dot{x}(0) = \dot{x}_0 \text{ e } \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0 \text{ con } \dot{x} + R\dot{\theta} \geq 0$$

integrando si ottiene:

$$\dot{x} = (g\sin\alpha - 3f_d g\cos\alpha)t + \dot{x}_0 = g\cos\alpha(\tan\alpha - f_d)t + \dot{x}_0$$

$$R\dot{\theta} = -2f_d g\cos\alpha t + R\dot{\theta}_0$$

la (2.22) diventa quindi:

$$(2.23) \quad v_{\tau_A} = (g\sin\alpha - 3f_d g\cos\alpha)t + \dot{x}_0 + R\dot{\theta}_0$$

Essendo  $\dot{x} + R\dot{\theta} \geq 0$ , per ipotesi, si può verificare che:

1.  $\tan \alpha = f_d \Rightarrow v_{\tau_a} > 0$
2.  $\tan \alpha > f_d \Rightarrow v_{\tau_a} > 0$
3.  $\tan \alpha < f_d \Rightarrow \exists t_*: v_{\tau}'(t_*) = 0$

Nel caso si verifichino le condizioni 1 e 2 il blocco continua a scivolare e rotolare, mentre per la 3 deve essere verificato il comportamento del blocco per un  $t > t_*$ :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha + r_x \\ m\ddot{y} = 0 = -mg\cos\alpha + r_y \\ \frac{1}{2}m\ddot{x} = r_x \end{cases}$$

da cui si ricava:

$$m\ddot{x} = mg\sin\alpha - \frac{1}{2}m\ddot{x} \Rightarrow \frac{3}{2}m\ddot{x} = mg\sin\alpha$$

e quindi:

$$\ddot{x} = \frac{2}{3}g\sin\alpha$$

ma

$$r_x = \frac{2}{3}mg\sin\alpha - mg\sin\alpha = -\frac{1}{3}mg\sin\alpha$$

$$r_y = mg\cos\alpha > 0$$

e per

$$r_x \leq f_d r_y$$

si ha che:

$$\frac{1}{3}mg\sin\alpha \leq \tan\phi \cdot mg\cos\alpha$$

$$\tan\phi \geq f_d > \tan\alpha > \frac{1}{3}\tan\alpha$$

Se la disuguaglianza è verificata, allora il blocco termina la fase di scivolamento e continua il moto rotolando.

### 2.3. Analisi di scivolamento e di ribaltamento di un blocco

L'analisi dell'instabilità di un blocco, di forma parallelepipeda, permette di stabilire se esiste la possibilità che il blocco possa muoversi scivolando e/o ribaltando.

Note le dimensioni del blocco ( $b$  e  $h$ ), l'inclinazione del pendio ( $\alpha$ ) su cui il blocco giace e l'angolo di attrito blocco-pendio ( $\phi$ ) si individuano nella carta di stabilità, che riassume i risultati dell'analisi, i campi di diverso comportamento del blocco.

Le condizioni che definiscono le quattro situazioni, (stabilità, ribaltamento, scivolamento, ribaltamento e scivolamento) sono state analizzate da Bray e Goodmann (1981) e successivamente da Sagasetta<sup>1</sup> (1986).

Lo sviluppo analitico che permette di costruire la carta della stabilità (fig. 2.4) è riportato qui di seguito.

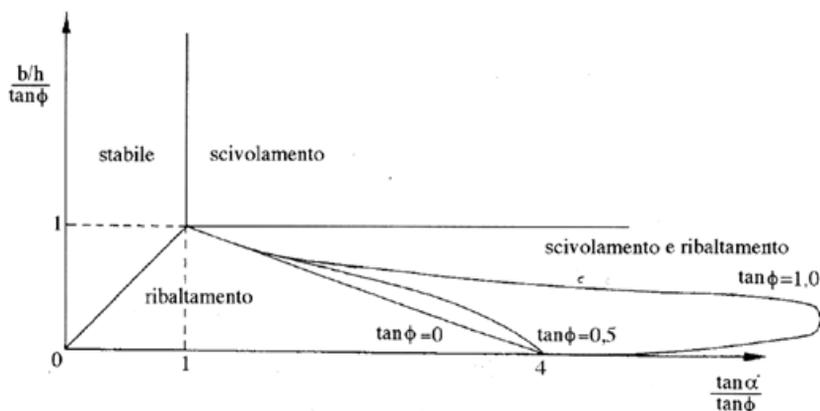


Fig. 2.4: Carta della stabilità (Sagasetta, 1986)

Si esaminino le condizioni di equilibrio allo scivolamento ed al ribaltamento di un blocco di forma parallelepipeda giacente su un

<sup>1</sup> Il caso  $\tan \phi = 0$ , riportato nell'elaborato di Sagasetta (1986), rappresenta una singolarità e non può essere considerata come significativa ai fini della definizione del campo di stabilità.

piano inclinato rispetto all'orizzontale di un angolo  $\alpha$  (fig. 2.5).

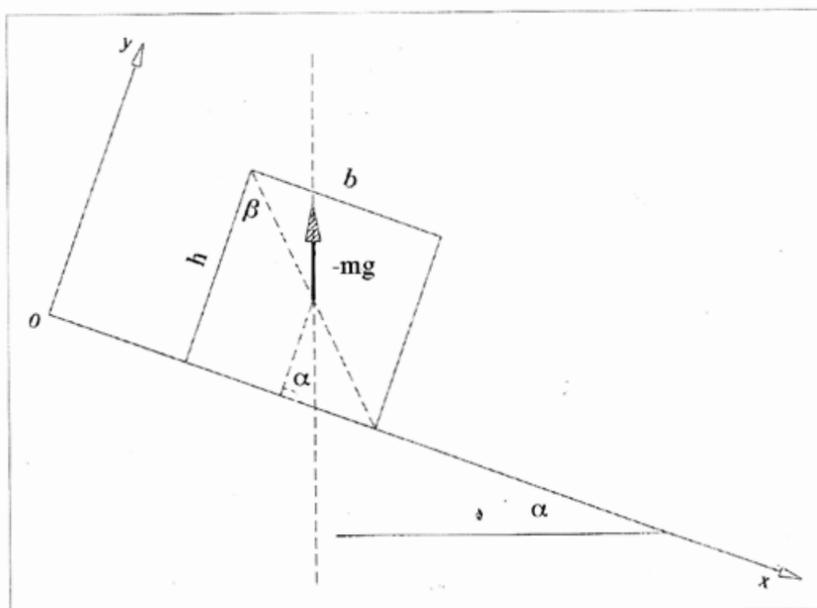


Fig. 2.5: Schematizzazione del blocco

Siano  $b$  e  $h$  la larghezza e l'altezza del blocco,  $m$  la massa,  $g$  l'accelerazione di gravità ed  $\vec{r}$  il vettore della reazione nel vincolo.

Dalle equazioni della statica si ricavano le condizioni per la stabilità del blocco:

$$(2.24) \quad \begin{cases} 0 = m\vec{g} + \vec{r} \\ 0 = \vec{M}_0^V \end{cases}$$

Il sistema può essere riscritto nel seguente modo:

$$(2.25) \quad \begin{cases} \vec{r} = -m\vec{g} \\ \vec{M}_0^V = 0 \end{cases}$$

che mette in evidenza come il momento delle reazioni vincolari deve essere nullo in 0.

Il vettore  $\vec{r}$  può essere espresso come somma delle sue com-

ponenti in direzione x e y:

$$(2.26) \quad \vec{r} = r_x \vec{e}_1 + r_y \vec{e}_2$$

in cui:

$$(2.27) \quad |r_x| \leq \tan\phi |r_y|$$

Inserendo nella (2.27) i valori delle componenti di  $\vec{r}$  in direzione x e y si ottiene:

$$(2.28) \quad \begin{aligned} r_x &= mg \sin\alpha \\ r_y &= mg \cos\alpha \quad (> 0) \end{aligned}$$

ricavando:

$$(2.29) \quad \tan\phi \geq \frac{mg \sin\alpha}{mg \cos\alpha} = \tan\alpha$$

se è verificata la disuguaglianza  $\tan\phi \geq \tan\alpha$ , il blocco non scivola.

Poiché il vincolo esplica la reazione  $\vec{r}$  se e solo se cade all'interno della base, deve essere, inoltre, verificata, la seguente condizione:

$$(2.30) \quad \alpha \leq \beta \Rightarrow \tan\alpha \leq \tan\beta = \frac{b}{h}$$

e quindi:

$$\tan\alpha \leq \frac{b}{h} = \tan\beta$$

che indica il non ribaltamento del blocco.

L'area che contiene coppie di valori di  $\tan\beta$  e  $\tan\alpha$  che soddisfano alle condizioni di non scivolamento e di non ribaltamento è riportata nella figura 2.6.

Le equazioni della statica sono in grado di descrivere solo il campo, relativo alla stabilità del blocco, delimitato dalle rette  $\tan\alpha = \tan\beta$  e  $\tan\phi \geq \tan\alpha$ , tratteggiato in figura 2.6. Infatti, nel momento in cui il blocco si muove, il moto deve essere descritto con le equazioni cardinali della dinamica.

### Movimento di solo ribaltamento

Si verifica il ribaltamento del blocco in assenza di scivola-

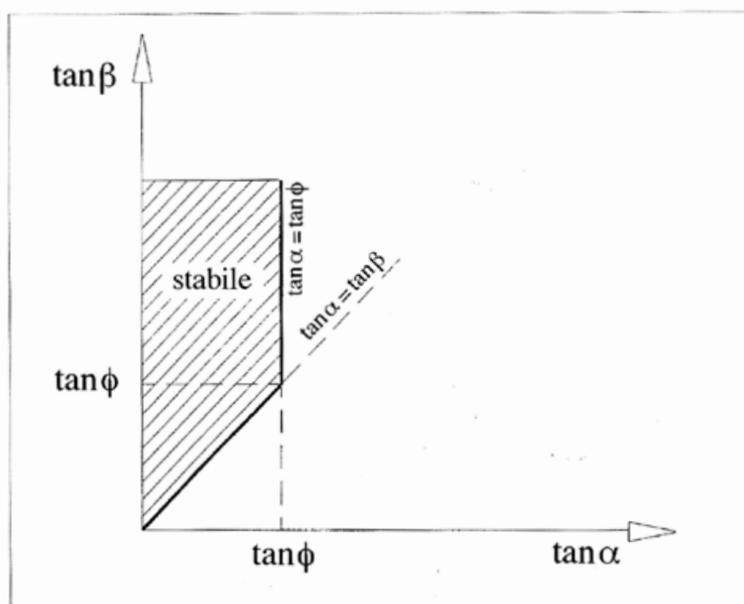


Fig. 2.6: Carta della stabilità: il campo tratteggiato descrive la zona in cui si ha stabilità  
 mento. Le equazioni della dinamica considerano il moto del blocco attorno al punto A (fig. 2.7) nell'intorno della posizione di equilibrio:

Applicando le equazioni cardinali della dinamica si ottiene:

$$(2.31) \quad \begin{cases} m\vec{a}_0 = m\vec{g} + \vec{r}_a \\ \dot{\vec{K}}_A = A\vec{O} \times m\vec{g} \end{cases}$$

dove:

$$(2.32) \quad \dot{\vec{K}}_A = J_a (-\ddot{\vartheta}) \vec{e}_3$$

$$(2.33) \quad A\vec{O} = -l \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{2} - \beta\right) \vec{e}_1 + l \sin\left(\vartheta + \frac{\pi}{2} - \beta\right) \vec{e}_2 = \\ l \sin(\vartheta - \beta) \vec{e}_1 + l \cos(\vartheta - \beta) \vec{e}_2$$

$$(2.34) \quad m\vec{g} = mg \sin \alpha \vec{e}_1 - mg \cos \alpha \vec{e}_2$$

Il prodotto vettoriale:

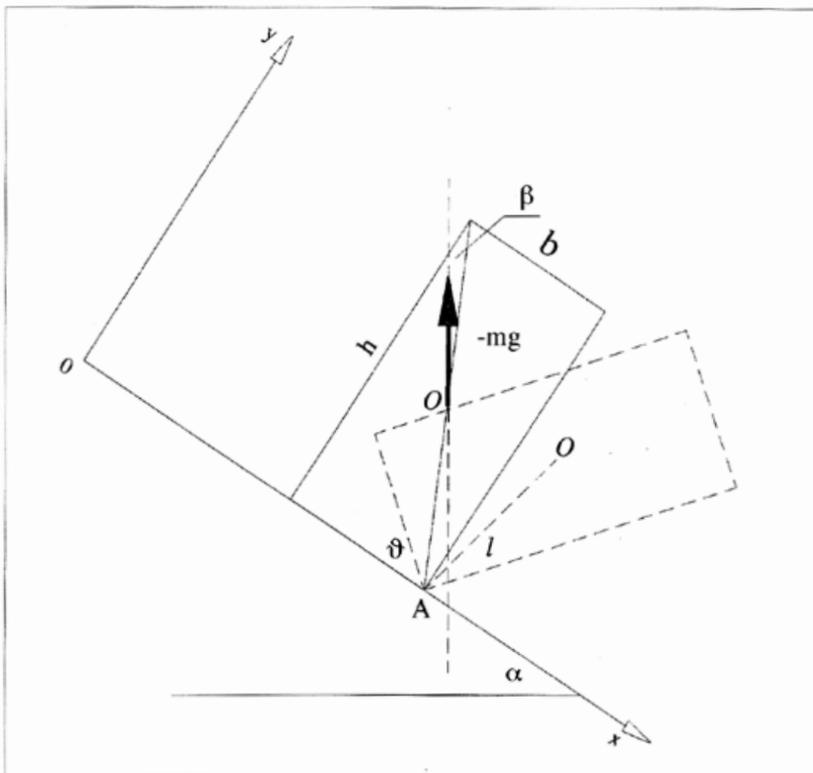


Fig. 2.7: Schematizzazione del moto del blocco nel caso di movimento di solo ribaltamento; nel sistema di riferimento  $\{x, y, z\}$  con vettori  $\{\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3\}$

$$(2.35) \quad \begin{aligned} \vec{AO} \times m\vec{g} = \\ [-mg/l \cos \alpha \sin(\vartheta - \beta) - mg/\sin \alpha \cos(\vartheta - \beta)] \cdot \bar{e}_3 = \\ -mg/\sin(\vartheta + \alpha - \beta) \bar{e}_3 \end{aligned}$$

inserito nella (2.31) porta alla seguente espressione:

$$(2.36) \quad \begin{aligned} -J_a \ddot{\vartheta} &= -mg/\sin(\vartheta + \alpha - \beta) \Rightarrow \\ J_a \ddot{\vartheta} &= mg/\sin(\vartheta + \alpha - \beta) \end{aligned}$$

Relativamente all'atto di moto iniziale si ha:

$$\vartheta = 0 \Rightarrow \text{se } \alpha > \beta \Rightarrow \ddot{\vartheta} > 0$$

che rappresenta una condizione necessaria ma non sufficiente.

Tale condizione mostra solamente che, nella zona tratteggiata della figura 2.8, il blocco può ribaltare.

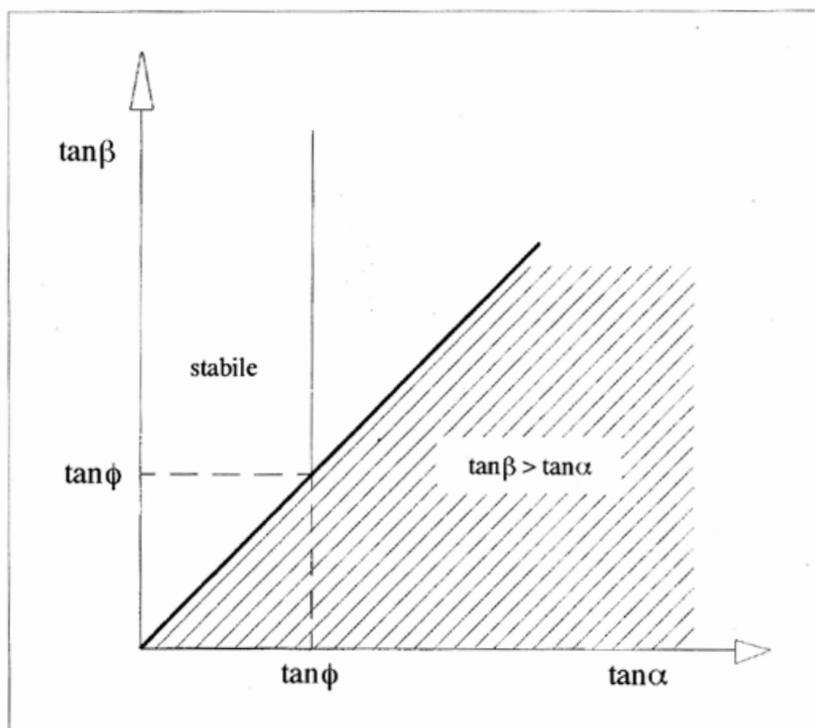


Fig 2.8: Zona di solo ribaltamento

Si deve verificare inoltre che:

$$(2.37) \quad |r_x| \leq \tan \phi_s |r_y|$$

imponendo così che la reazione sia compatibile con il vincolo almeno nell'istante iniziale.

Nota l'espressione della velocità in 0:

$$(2.38) \quad \vec{v}_0 = l \dot{\vartheta} \cos(\vartheta - \beta) \vec{e}_1 - l \dot{\vartheta} \sin(\vartheta - \beta) \vec{e}_2$$

derivando, a meno dei termini di ordine superiore,  $\dot{\vartheta}^2$ , si ottiene:

$$(2.39) \quad \vec{a}_0 = l\ddot{\vartheta} \cos(\vartheta - \beta)\vec{e}_1 - l\ddot{\vartheta} \sin(\vartheta - \beta)$$

$\ddot{\vartheta}$  è noto ed inoltre

$$(2.40) \quad J_a = \frac{1}{12} m(b^2 + h^2) + ml^2 = \frac{4}{3} ml^2$$

$$2l = \sqrt{h^2 + b^2} \quad \text{e} \quad |AO| = l$$

da cui si ottiene:

$$(2.41) \quad \vec{a}_0 = \frac{3}{4} g \sin(\alpha - \beta) \cos \beta \vec{e}_1 + \frac{3}{4} g \sin(\alpha - \beta) \sin \beta \vec{e}_2$$

Noto  $\vec{a}_0$  si può ricavare la reazione  $\vec{r}$ :

$$(2.42) \quad m\vec{a}_0 = m\vec{g} + \vec{r}$$

$$(2.43) \quad \Rightarrow \vec{r} = \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \cos \beta \vec{e}_1 + \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \sin \beta \vec{e}_2 + \\ - mg \sin \alpha \vec{e}_1 + mg \cos \alpha \vec{e}_2;$$

le cui componenti sono:

$$(2.44) \quad r_x = \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \cos \beta - mg \sin \alpha \quad (< 0) \\ r_y = \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \sin \beta + mg \cos \alpha$$

Si ha infine:

$$(2.45) \quad \sin \alpha - \frac{3}{4} \sin(\alpha - \beta) \cos \beta \leq \tan \phi_s \left( \frac{3}{4} \sin(\alpha - \beta) \sin \beta + \cos \alpha \right)$$

da cui:

$$(2.46) \quad \frac{4 \sin \alpha - 3 \sin(\alpha - \beta) \cos \beta}{3 \sin(\alpha - \beta) \sin \beta + 4 \cos \alpha} \leq \tan \phi_s \quad \text{con } \alpha > \beta$$

che permette di definire il campo relativo alla condizione di solo ribaltamento.

Movimento di solo scivolamento (fig. 2.9)

Dalle equazioni cardinali della dinamica si ottiene:

$$(2.47) \quad \begin{cases} m\vec{a}_o = m\vec{g} + \vec{r} \\ 0 = \vec{M}_o^v \end{cases}$$

$$(2.48) \quad \begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha + r_x \\ 0 = -mg\cos\alpha + r_y \\ 0 = \vec{M}_o^v \end{cases}$$

essendo:

$$(2.49) \quad r_x = -f_d r_y$$

Dalle prime due equazioni del sistema (2.48) si ricava che:

$$(2.50) \quad \begin{aligned} m\ddot{x} &= mg\sin\alpha - f_d mg\cos\alpha \\ \Rightarrow \ddot{x} &= g\cos\alpha(\tan\alpha - f_d) \end{aligned}$$

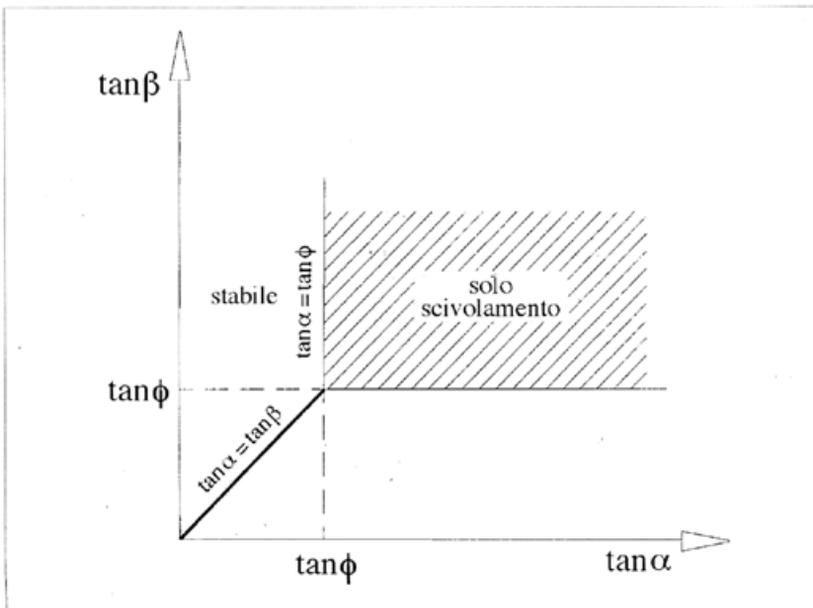


Fig. 2.9: Zona di solo scivolamento

Affinché il blocco scivoli si deve avere che:

$$\begin{aligned} f_d &= \tan\phi_d \\ \tan\phi_d &\leq \tan\beta \quad \text{e} \\ \tan\alpha &> \tan\phi_d \quad (\text{per la 2.50}) \end{aligned}$$

Si ottiene quindi il campo in cui si verifica il movimento di solo scivolamento.

Infine, è possibile riassumere, in un unico diagramma, tutte le possibili condizioni di moto, normalizzando rispetto a  $\tan\phi$  i parametri di inclinazione del pendio e di forma del blocco, ed ottenendo, così, la carta della stabilità (*fig. 2.4*).

Nel caso particolare in cui sia  $\tan\phi=0$ , si ha:

$$(2.51) \quad \begin{cases} m\bar{a}_0 = m\bar{g} + \bar{r} \\ 0 = \bar{M}_0^y \end{cases}$$

$$(2.52) \quad \begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha \\ 0 = -mg\cos\alpha + r_y \end{cases}$$

$$\Rightarrow r_y = mg\cos\alpha, \quad 0 = \bar{M}_0^y$$

che esprime l'impossibilità del blocco a ribaltare per qualsiasi valore di  $\beta$ .

## 2.4. Caduta libera

Il moto di caduta libera si verifica quando un blocco perde contatto con il pendio. Questo può avvenire nella fase di distacco o anche lungo il percorso in corrispondenza di una brusca variazione della superficie topografica. Il moto può essere caratterizzato da impatti e rimbalzi; le equazioni del moto di caduta libera possono essere utilizzate anche per questo tipo di movimento. In ogni caso per conoscere il moto del blocco è necessario conoscere

le velocità immediatamente prima e dopo l'impatto (fig. 2.10).

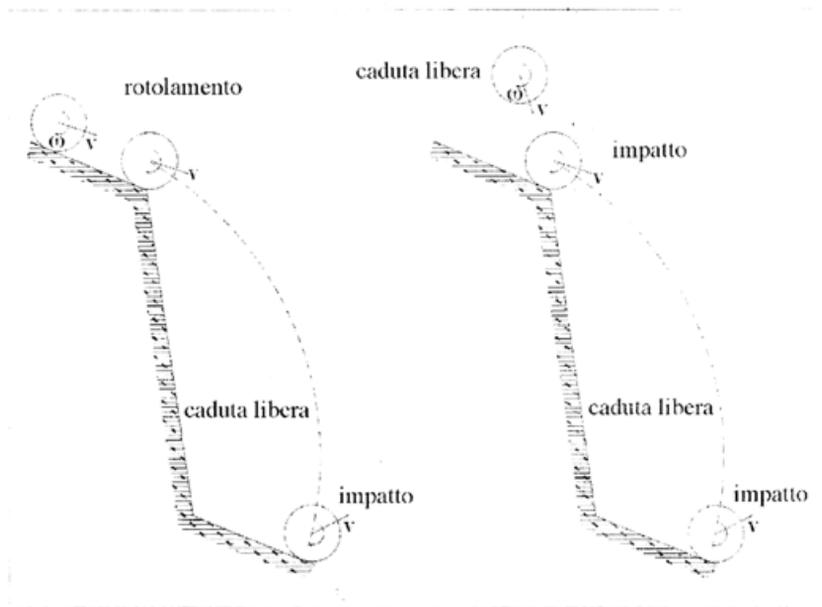


Fig. 2.10: Possibili condizioni iniziali della fase di caduta libera

Le caratteristiche del moto, se si trascura la resistenza offerta dall'aria, possono essere ricavate da:

$$(2.53) \quad \begin{cases} m\bar{a}_G = \bar{R}^{(c)} = m\bar{g} \\ \dot{\bar{K}}_G = M_G^{(c)} = 0 \end{cases}$$

La prima equazione delle (2.53) consente di determinare il moto del centro di massa (moto di G-autonomia), che è in generale un arco di parabola<sup>2</sup>, mentre la seconda definisce il moto attorno al baricentro G (moto alla Poinso).

Nel caso tridimensionale il moto rotatorio attorno a G è legato alla posizione del vettore della velocità angolare ( $\bar{\omega}$ ) rispetto agli assi principali di inerzia del corpo.

<sup>2</sup> Se  $\bar{v}_0 = 0$  si ottiene una traiettoria.

Si dimostra che se  $\bar{\omega}_0 \neq 0$  e  $\bar{\omega} //$  ad un asse principale di inerzia  $(\xi, \eta, \zeta)$ , il moto è rotatorio uniforme:  $\omega(t) = \omega_0$

Quindi se il corpo è schematizzabile con una sfera ogni moto alla Poincot è rotatorio uniforme, essendo ogni asse principale d'inerzia; negli altri casi, per conoscere il moto sferico attorno a G, è necessario risolvere la seconda equazione delle (2.53).

Tuttavia nella quasi totalità dei modelli di calcolo il problema tridimensionale viene ricondotto ad ipotesi che semplificano le altrimenti onerose procedure di calcolo; il moto è studiato allora bidimensionalmente e le traiettorie vengono scelte a priori considerando quelle più probabili, tenendo conto della topografia, della posizione geometrica delle zone instabili da cui possono avvenire distacchi di blocchi e della morfologia del sito.

Il punto di impatto del blocco sulla superficie del pendio è determinato dall'intersezione tra la parabola che descrive il moto di caduta e la spezzata che discretizza il profilo trasversale del versante nella sezione contenente il movimento di caduta (fig. 2.11).

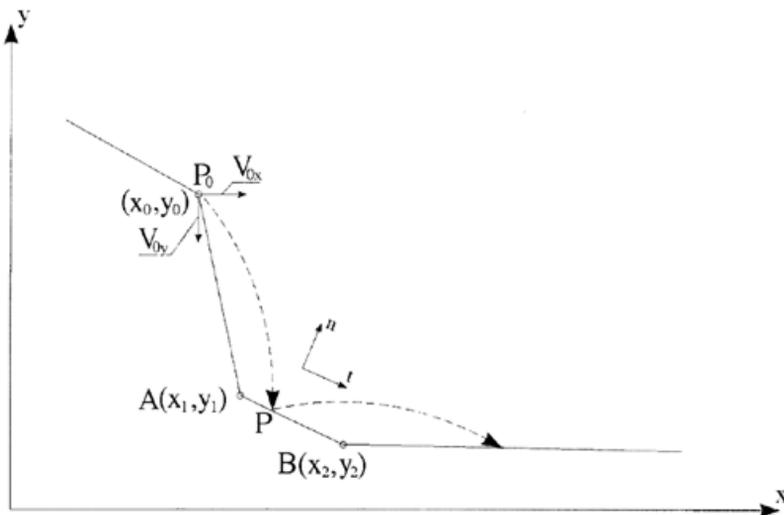


Fig. 2.11: Traiettoria parabolica del blocco e rimbalzo

Con riferimento al sistema di assi cartesiani di figura 2.11 dalla (2.53) si ottiene:

$$(2.54) \quad \begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{y} = -g \end{cases}$$

integrando

$$(2.55) \quad \begin{cases} \dot{x} = v_{0x} \\ \dot{y} = -gt + v_{0y} \end{cases}$$

ed infine:

$$(2.56) \quad \begin{cases} x = v_{0x}t + x_0 \\ y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t + y_0 \end{cases}$$

dove  $x_0$  e  $y_0$  sono le coordinate del punto di distacco,  $v_{0x}$  e  $v_{0y}$ , sono le velocità iniziali,  $t$  è il tempo e  $g$  è l'accelerazione di gravità.

Le coordinate del punto di impatto  $P(x_p, y_p)$  possono essere determinate risolvendo il sistema:

$$(2.57) \quad \begin{cases} y_p = -\frac{1}{2}g \frac{(x - x_0)^2}{v_{0x}^2} + v_{0y} \frac{x - x_0}{v_{0x}} = y_0 \\ \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \end{cases}$$

dove la (2.57) è l'equazione della retta passante per i punti  $A(x_1, y_1)$  e  $B(x_2, y_2)$ .

### 2.5. Rimbалzo

Il rimbалzo è un movimento che può essere conseguente all'impatto di un blocco sul pendio.

L'urto di un corpo su una superficie è un fenomeno di tipo dinamico il cui studio rigoroso richiede la conoscenza, oltre che delle forze esterne, quali gravità ed attrito, anche delle forze inter-

ne<sup>3</sup> che si scambiano i corpi in collisione. Generalmente nei processi analizzati le forze impulsive sono preponderanti rispetto a quelle esterne, ed è quindi lecito trascurarle ricavando pertanto il moto del corpo considerando che, al momento dell'urto, devono essere validi il principio di conservazione della quantità di moto e dell'energia totale.

Per quanto non si possano conoscere i particolari dell'interazione, questi principi possono pertanto essere impiegati per predire gli effetti dell'urto.

Gli urti sono classificati in elastico e anelastico a seconda che in essi si conservi o meno l'energia cinetica; in più si può verificare che il corpo, a seguito dell'impatto rimanga conficcato nell'altro: l'urto, allora, è detto completamente anelastico.

La modellazione del fenomeno di caduta massi implica, per l'indeterminazione di tutte le variabili presenti nel problema e per economia di calcolo, una semplificazione della trattazione fisico-matematica. Alcuni autori (Piteau & Clayton, 1987; Hoek, 1987; Bozzolo & Pamini, 1988; Hoek & Bray, 1988) hanno proposto che le caratteristiche di rimbalzo siano esprimibili con dei semplici parametri, definiti coefficienti di restituzione, che esprimono la dissipazione di energia cinetica nell'urto.

I coefficienti di restituzione possono essere determinati dal principio della conservazione della quantità di moto<sup>4</sup> (Spang & Rautenstrauch, 1988):

$$(2.58) \quad K = \frac{v_2^f - v_1^f}{v_2^i - v_1^i}$$

dove  $v_2^i$  e  $v_1^i$  sono le velocità delle particelle collidenti prima del-

<sup>3</sup> Le forze impulsive che agiscono durante l'urto sono forze interne che non modificano la quantità di moto totale del sistema.

<sup>4</sup> Teorema della quantità di moto.  $\dot{Q} = \vec{R}^{(e)}$ : ad ogni istante la derivata temporale della quantità di moto totale del sistema è vettorialmente uguale al risultante di tutte e sole le forze esterne (cfr. Cattaneo C., *Lezioni di Meccanica Razionale*, Pisa, 1973, p. 350). Pertanto se  $\vec{R}^{(e)} = 0$  si ottiene  $\dot{Q} = 0$  e quindi  $Q = \text{cost}$ .

l'impatto mentre  $v_2^f$  e  $v_1^f$  quelle successive.

Nel caso di caduta di un blocco su un pendio l'equazione (2.58) si può scrivere:

$$K = \frac{v^f}{v^i}$$

e nel caso di caduta libera si ottiene:

$$K = \sqrt{\frac{h^f}{h^i}}$$

dove  $h^f$  e  $h^i$  rappresentano l'altezza di caduta e l'altezza di rimbalzo rispettivamente. Il coefficiente di restituzione varia nell'intervallo (0-1); se  $K = 0$ , l'urto è completamente anelastico, se  $K = 1$ , l'urto è elastico.

L'evidenza sperimentale ha mostrato che il coefficiente di restituzione deve essere considerato nelle sue componenti normali ( $K_n$ ) e tangenziali ( $K_t$ ) piuttosto che tramite un'aliquota unica di abbattimento dell'energia cinetica posseduta dal blocco nell'istante di impatto (Piteau & Clayton, 1976; Hoek, 1987; Richards, 1988) (fig. 2.12).

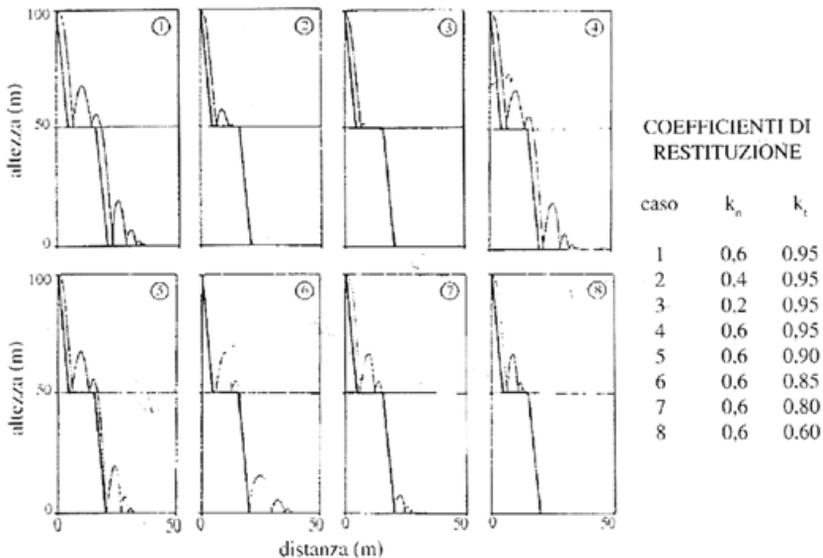


Fig. 2.12: Effetto della variazione dei coefficienti di restituzione nella determinazione delle traiettorie (Richards, 1988)

Si possono quindi definire:

$$K_n = \frac{v_{npost}}{v_{npre}} \qquad K_t = \frac{v_{tpost}}{v_{tpre}}$$

dove  $v_{npre}$  e  $v_{tpre}$  sono le componenti della velocità al momento di impatto normali e tangenziali rispettivamente,  $v_{npost}$  e  $v_{tpost}$  sono le componenti della velocità iniziali di rimbalzo normali e tangenziali (fig. 2.13).

Noti  $K_n$  e  $K_t$  si ricavano le velocità nell'istante successivo all'impatto.

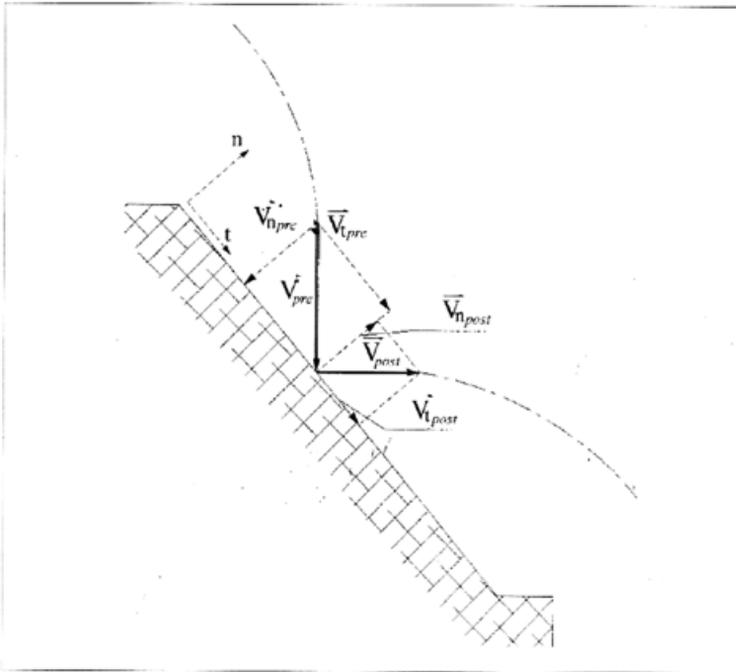


Fig. 2.13: Componenti delle velocità pre-impatto e post-impatto

Altri autori (Bozzolo & Pamini, 1986, Azzoni, La Barbera & Mazzà, 1991) hanno impostato, nel caso di urto anelastico con superficie di impatto poco deformabile, una trattazione, confortata da alcune evidenze sperimentali, che si basa fundamentalmente

sulle seguenti ipotesi:

- il blocco è modellato come un corpo rigido di forma ellissoidica;
- la zona di contatto tra i due corpi nella fase di urto può essere considerata puntiforme;
- nelle fasi immediatamente successive all'urto si instaura un moto rotatorio del masso attorno al punto di contatto P, che diventa centro di istantanea rotazione. Poichè, come detto, le forze impulsive sono predominanti rispetto alle forze esterne il moto può essere determinato con i principi suddetti.

L'analisi sperimentale dei fenomeni che si osservano nell'urto di un masso su una scarpata ha evidenziato (Bozzolo & Pamini, 1986; Azzoni et al., 1992) che le caratteristiche del moto successive all'impatto dipendono dalla forma del blocco, dalla geometria e rugosità del profilo del pendio, e dalla quantità di energia dissipata nell'urto.

Quest'ultima, a sua volta, è legata alle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti la superficie di impatto e del blocco in caduta, e all'angolo di incidenza.

## **2.6. Effetti di forma del blocco**

L'osservazione di cadute di massi in sito permette di evidenziare come blocchi di diversa forma e di diversa resistenza, compiono diversi percorsi e subiscono diversi tipi di rotture.

Quando i blocchi sono costituiti da rocce tenere e di forma poliedrica si possono verificare delle rotture degli spigoli dei blocchi che subiscono collisioni multiple nell'impatto col pendio.

Il blocco tende quindi a raggiungere una condizione di moto più efficiente via via che le collisioni e le rotture degli spigoli ne arrotondano la forma (Chan et al., 1986; Giani, 1992) (*fig.2.14*).

Quando i blocchi si sono staccati da una massa rocciosa a struttura scistosa tendono a rompersi, a seguito degli impatti, lungo le superfici di scistosità. A seguito di queste rotture lungo i

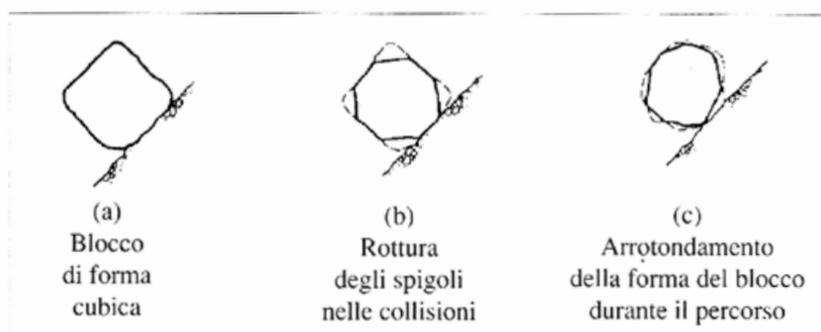


Fig. 2.14: Variazione della forma del blocco in funzione della distanza percorsa (Richards, 1988)

piani di scistosità si determinano dei solidi di roccia di forma tabulare. Il movimento di caduta di questi solidi avviene poi secondo la condizione di moto più efficiente con il piano di maggior inerzia del solido parallelo alla sezione verticale di movimento (fig. 2.15).

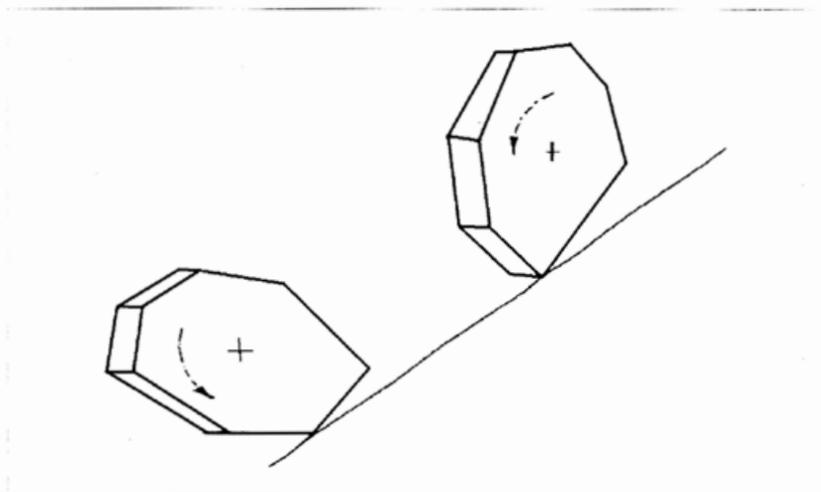


Fig. 2.15: Esempio di roccia a struttura scistosa che si frattura nell'impatto (Giani, 1995)

L'evidenza sperimentale, eseguita su blocchi prevalentemen-

te prismatici (Giani, 1992), mostra come la forma e le dimensioni di essi determini una differenza delle condizioni di moto post-impatto (fig. 2.16).

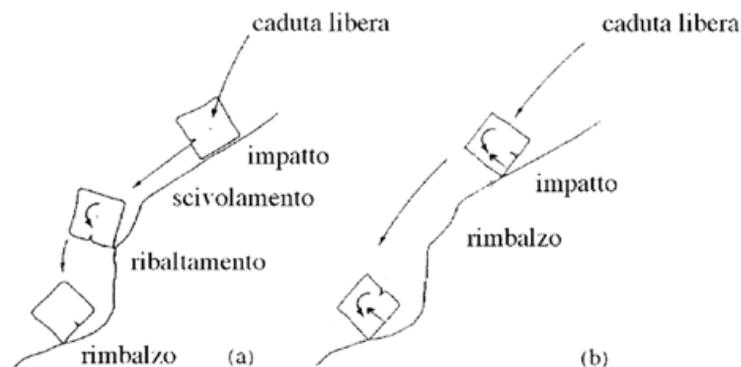


Fig. 2.16: Tipo di movimento relativo alle condizioni di impatto.

In altri termini, quando il blocco impatta sulla superficie del pendio, con una delle sue facce, il movimento successivo più probabile è quello di scivolamento; questo permane finché l'irregolarità della superficie del versante induce un ribaltamento del blocco stesso e quindi una rotazione con una successiva caduta libera. Mentre se il contatto avviene invece attraverso lo spigolo, il moto successivo può essere di ribaltamento e successivamente rotolamento.

## 2.7. Effetti di dimensione del blocco

Nelle prove effettuate su pendii coperti da materiali detritici si sono osservati alcuni effetti dipendenti dalla pezzatura del detrito.

Se il blocco ha volume maggiore di quello dei blocchi del detrito si nota una maggiore perdita di energia nell'impatto ed il blocco tende a rotolare. Se la superficie del pendio è scabra ed ondulata, il rotolamento è combinato con un movimento di cadute

successive con rimbalzi.

Se il blocco è di dimensioni inferiori alle dimensioni medie dei blocchi, il movimento con rimbalzi predomina rispetto a quello di rotolamento con collisioni multiple sul suolo. Si ottiene inoltre una grande dispersione nella distribuzione delle lunghezze di percorso dei blocchi esaminati (fig. 2.17).

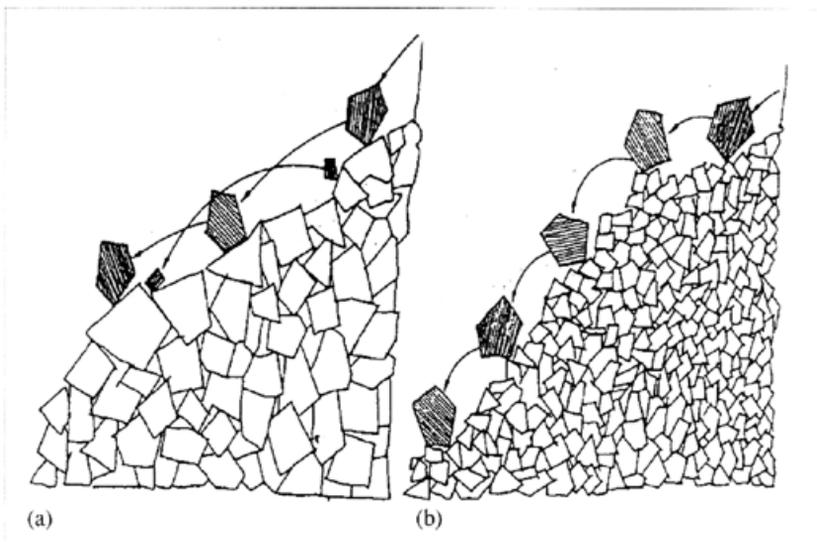


Fig. 2.17: Percorso di blocchi lungo un pendio di detrito:

- (a) la dimensione del blocco è minore della dimensione del detrito costituente il pendio,  
 (b) la dimensione del blocco è maggiore della dimensione del detrito. (Giani, 1992)

## 2.8. Rottura del blocco

I blocchi possono subire delle rotture negli impatti, soprattutto se il materiale affiorante sul pendio è roccioso o se il blocco stesso contiene delle discontinuità.

Poichè il fenomeno avviene con una notevole dispersione di energia, i frammenti che si generano dalla rottura dei massi generalmente compiono percorsi più brevi.

In alcuni casi, però, la rottura può determinare dei frammenti di forma tale da disporsi in una condizione di moto più efficiente di quella del blocco originario.

Ciò può accadere, per esempio, in rocce scistose quando la rottura lungo un piano di debolezza dà origine a solidi di forma tabulare che aumentano l'efficienza del moto disponendosi, come già detto precedentemente, con il piano di maggiore inerzia parallelo alla direzione del moto (fig. 2.18).

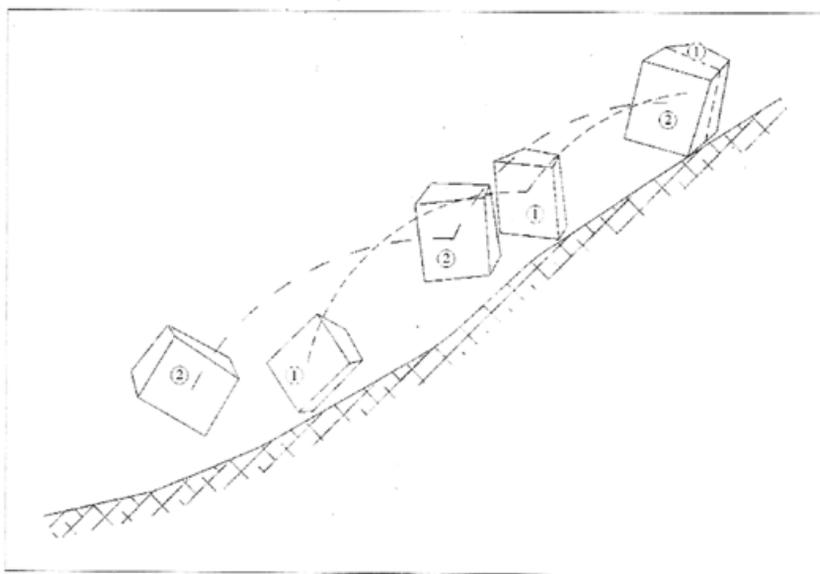


Fig. 2.18: Fratturazione del blocco a causa dell'impatto con la superficie del pendio (Giani, 1995)

Nel caso di blocchi composti di roccia tenera, come per esempio i calcari organogeni, che muovono su pendii composti da rocce affioranti, fenomeni di rottura degli spigoli dei blocchi determinano dei solidi di forma più arrotondati ed una conseguente condizione di rotolamento con collisioni multiple più efficiente.

Fornaro et al. (1990) hanno incluso la possibilità di tenere conto di fenomeni di rottura di blocchi in un modello numerico di simulazione di caduta massi (vedi cap. 4).

L'energia necessaria per la rottura viene confrontata con quella richiesta per la frantumazione del blocco con un martello ad urto.

Quando l'energia totale che rimane dopo l'impatto raggiunge l'energia prodotta dal martello demolitore, il modello considera che si sia raggiunta la condizione di rottura e suddivide «in modo casuale» il blocco in più frammenti di diverso volume.

L'energia di impatto è quindi suddivisa in modo proporzionale al volume dei frammenti ai quali viene data una direzione casuale di successivo movimento.

## **2.9. Rotolamento e scivolamento**

Il comportamento di un blocco a seguito di un impatto può essere di diverso tipo: a parte il caso più semplice in cui l'urto determina l'arresto del blocco, i moti che, in generale, possono instaurarsi sono quelli di rimbalzo, rotolamento o scivolamento.

Nella caduta massi il fenomeno di puro rotolamento e di solo scivolamento è un moto teorico. I blocchi, infatti, non possono essere schematizzati con una definita forma geometrica (sfera, cilindro, disco, ellissoide), nè la superficie del pendio può essere considerata piana.

L'ondulosità e la rugosità del profilo e della forma del blocco non permettono il rispetto delle ipotesi formulate per la risoluzione delle equazioni della meccanica classica.

E' quindi necessaria un'altra definizione del problema.

Si è notato sperimentalmente (Azzoni et al., 1991) che il moto più simile al rotolamento è quello di rotazione in aria (il blocco perde contatto con la superficie del pendio) con collisione multiple.

Nella necessità di schematizzare il fenomeno, evidenziata l'aleatorietà del comportamento, è possibile considerare il masso come un corpo rigido, in genere a sezione circolare (cilindro, sfera

o disco) che rotola lungo il pendio in presenza di attrito di rotolamento o volvente.

La figura 2.19 mostra lo schema del modello con tutti i parametri che definiscono il problema.

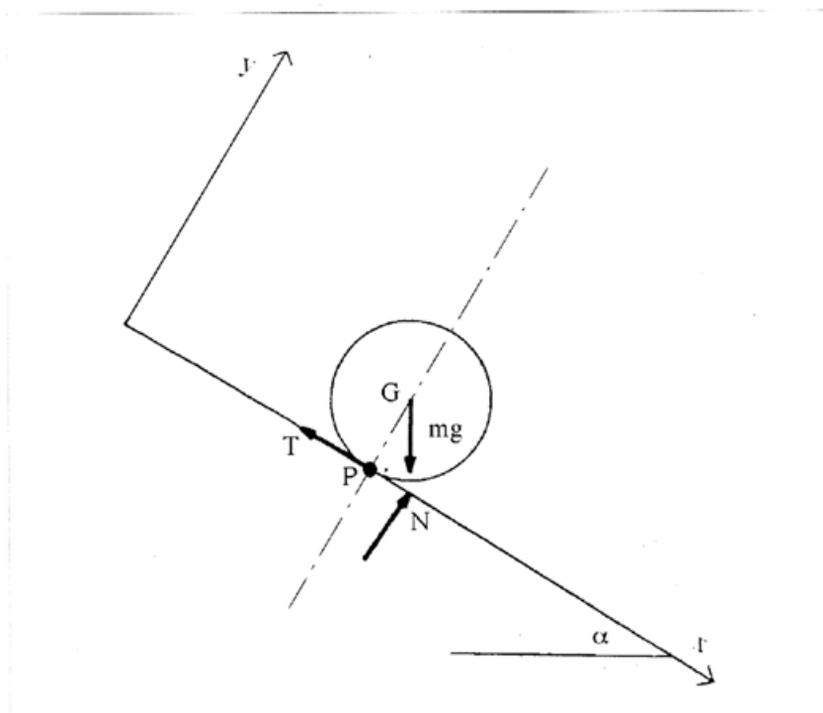


Fig. 2.19: Schematizzazione del masso nella fase di rotolamento (Alivernini, 1995)

Il significato fisico dell'attrito di rotolamento è comprensibile con alcuni richiami alla meccanica della locomozione delle ruote. Esso è fondamentalmente legato al momento antagonista che si crea al vincolo di contatto tra il corpo che rotola e la superficie di rotolamento. Nel caso di contatto ruota-superficie entrambe subiscono una deformazione poichè il comportamento meccanico dei materiali non è lineare.

La reazione normale  $N$  al vincolo ha una retta d'azione che non passa per il punto di contatto, ma ha un'eccentricità rispetto

all'asse baricentrale PG. Ciò causa la nascita di un momento antagonista che, come detto, è correlabile all'attrito di rotolamento (Kobayasci et al., 1990).

Per un masso in caduta su un pendio naturale il fenomeno è molto più complesso. Resistenze al moto si hanno, infatti, sia a causa della non linearità del comportamento dei materiali sia, soprattutto, per le irregolarità di forma del masso e della superficie di rotolamento. Modellazioni del rotolamento di corpi rigidi ellissoidici con attrito comporterebbero problematiche numeriche molto complesse e non giustificabili per la varietà del comportamento.

E' quindi opportuno il ricorso a schemi semplici quale quello mostrato in figura 2.19. Si ha, quindi, la necessità di inglobare una serie di fenomeni complessi nel coefficiente di attrito al rotolamento, calcolabile attraverso la formulazione proposta da Statham (1979) e Azzoni et al., (1991) come:

$$\tan \phi_{\mu d} = \tan \phi_0 + K \left( \frac{d}{D} \right)$$

dove  $\tan \phi_0$  è il coefficiente di attrito dinamico,  $K$  è un parametro ricavato sperimentalmente,  $d$  e  $D$  sono, rispettivamente, le dimensioni della granulometria del terreno costituente il pendio e le dimensioni del blocco.

L'affidabilità della relazione è stata verificata da Bozzolo e Pamini (1986) i quali hanno fornito i seguenti valori per i parametri:

- $\tan \phi_0 = 0.37 \div 0.67$
- $K = 0.17 \div 0.26$
- $\tan \phi_{\mu d} = 0.4 \div 1.5$

### 3. PROVE IN SITO

#### 3.1. Introduzione

Prove in sito possono essere svolte per due scopi: il primo per determinare i percorsi di cadute di massi e le energie cinetiche assunte durante il moto, il secondo per determinare il comportamento meccanico globale di barriere paramassi soggette all'impatto di blocchi secondo traiettorie ed energie cinetiche ben definite.

Nelle prove di caduta massi si possono determinare le caratteristiche ed i parametri del moto ed ottenere quindi i dati di ingresso da poter utilizzare, in pendii con caratteristiche geomorfologiche simili a quelli scelti per le prove, nei modelli previsionali. In questo modo si rendono maggiormente affidabili i risultati ottenuti dal calcolo per valutare la necessità di realizzare opere di protezione, per posizionarle e per dimensionarle in modo da intercettare i massi ed assorbire l'energia cinetica di impatto.

Nelle prove su barriere paramassi si analizza il comportamento dell'intera struttura di protezione esaminando come i singoli elementi costruttivi (pannelli di rete, funi, dissipatori di energia) vengono sollecitati e interagiscono tra loro nell'assorbire l'energia di impatto dei massi.

Entrambi i tipi di prove vengono condotte alla scala del problema in esame scegliendo quindi dei pendii ove i massi possono raggiungere le velocità di progetto ed esaminando in vera grandezza, su campi prove appositamente progettati e costruiti, opere di protezione come barriere paramassi a rete o rilevati paramassi.

A conoscenza dello scrivente sono molti gli esempi di prove in sito per la determinazione dei parametri del moto di caduta massi ritrovabili nella letteratura tecnica (Bozzolo & Pamini, 1982; Spang & Rautenstrauch, 1988; Richards, 1988; Azzoni et al., 1992; Azzoni & De Freitas, 1995), mentre limitato è il numero di esempi di prove eseguite per analizzare il comportamento di opere di difesa

(Duffy, 1992,1996; Peila et al., 1995, 1996; Smith & Duffy, 1990).

Per descrivere le caratteristiche principali ed il tipo di risultati ottenibili da questi tipi di sperimentazione si descriverà dapprima una metodologia di prova per l'analisi del moto di caduta massi lungo versante messa a punto dall'ISMES in collaborazione con il Centro di Ricerche Idrauliche e Strutturali dell'ENEL e successivamente le tecniche per prove in vera grandezza su barriere paramassi a rete condotte in un campo prove appositamente progettato e costruito dal Dipartimento di Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino in collaborazione con la Tubosider Italiana.

### ***3.2. Prove di caduta di massi lungo versante***

#### *3.2.1. Scopi delle prove*

L'indagine sperimentale del fenomeno di caduta massi ha lo scopo, come detto, di determinare e definire gli elementi che caratterizzano la dinamica del processo (Azzoni et al., 1991), rilevando:

- le fasi del moto di caduta, rimbalzo, rotolamento e scivolamento e le diverse condizioni di passaggio da un tipo di movimento ad un altro tipo di movimento;
- l'influenza, sul moto di caduta dei blocchi, della morfologia e delle caratteristiche meccaniche e geometriche di diversi tipi di substrati e di materiali affioranti sul pendio (rocce, detriti, terreni);
- l'influenza, sul moto di caduta dei blocchi, della forma, del volume e della resistenza dei blocchi stessi;
- le traiettorie di caduta, cioè la posizione del centro di massa, fissato un determinato sistema di riferimento, nel tempo;
- la velocità del centro di massa e di rotazione del corpo attorno ad esso lungo la traiettoria;
- le caratteristiche geometriche dei percorsi di caduta.

Per tali scopi è necessaria quindi la conoscenza di varie grandezze che caratterizzano il sistema fisico come:

- la topografia del pendio analizzato;
- le caratteristiche geologico-strutturali della zona di distacco per ricavare forma e volume dei blocchi;
- le caratteristiche geomorfologiche del pendio;
- le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti il pendio ed i blocchi.

### 3.2.2. Tecniche di prova

L'esecuzione delle prove in sito comprende alcune importanti fasi di preparazione, la cui corretta impostazione è determinante per la successiva fase di elaborazione:

1. Rilievo topografico del pendio. Nelle ultime campagne di prove, svolte dall'ISMES, la topografia è stata acquisita attraverso tecniche di fotogrammetria terrestre a scala 1:100 per brevi pendii (50÷70 m di percorso di caduta) e a scala 1:400 per pendii più lunghi (130÷150 m di percorso di caduta);
2. Definizione delle caratteristiche geometriche (forma e dimensione), litologiche e meccaniche dei massi di prova e delle pareti rocciose in esame. In generale la forma dei blocchi è stata definita in relazione alle diverse spaziature, giaciture e persistenze dei sistemi di discontinuità rilevati sulle pareti rocciose in esame e classificando quindi i blocchi come cubici, tabulari, colonnari o prismatici in accordo con i suggerimenti della Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (ISRM, 1978) (*fig. 3.1*). Poiché alcuni pendii analizzati sono costituiti da rocce tenere, come per esempio calcari organogeni, che male si prestano ad una definizione delle caratteristiche geometriche della massa rocciosa del tipo di quella prima definita, i blocchi sono stati classificati come sferoidali o ellissoidali.
3. Rilievo geomorfologico del pendio. Sulla base dei percorsi di prova esaminati che hanno interessato tratti di versante avente

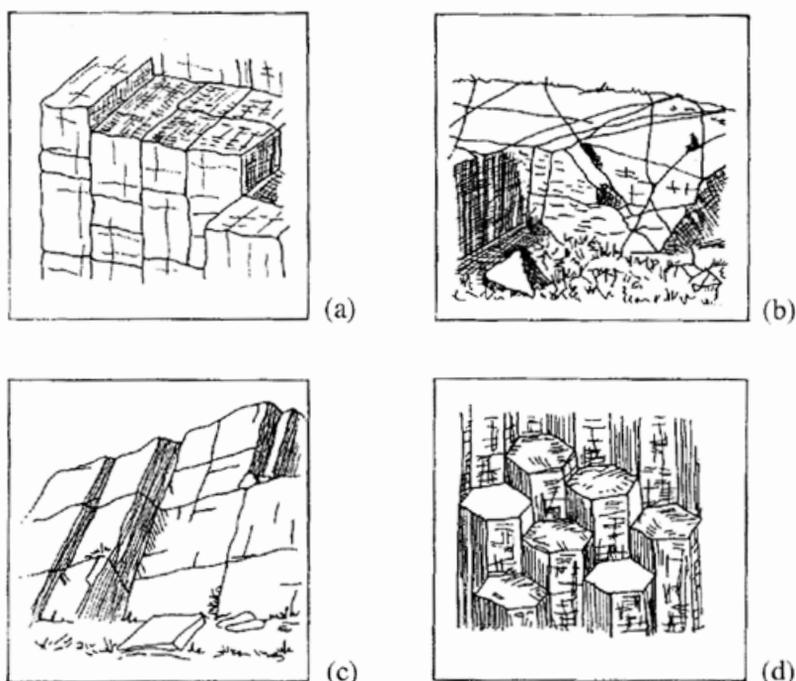


Fig. 3.1: Schemi di masse rocciose discontinue a blocchi: a) cubici; b) prismatici; c) tabulari; d) colonnari (ISRM, 1978)

pendenza costante e stessa tipologia del materiale affiorante o pendii costituiti da più tratti a diversa inclinazione e con diverse caratteristiche litologiche del materiale affiorante, il rilievo geomorfologico ha comportato:

a) la descrizione quantitativa delle discontinuità per le pareti rocciose (prevalentemente fronti di scavo);

b) la valutazione della pezzatura e delle caratteristiche meccaniche del litotipo costituente il materiale per i pendii detritici (prevalentemente discariche di cava);

c) il rilievo delle caratteristiche geometriche e meccaniche del materiale affiorante e dello spessore e della consistenza dello strato vegetale per i pendii naturali.

4. Allestimento delle basi di ripresa televisiva dei percorsi. Sono sta-

te posizionate lateralmente almeno 3 telecamere fisse sequenziali con corrispondenti telecamere fisse frontali, sincronizzate con le prime e con equivalente campo di ripresa. Le telecamere laterali sono state collegate via cavo ad una comune unità di registrazione ed a un monitor di controllo. Le telecamere laterali sono state disposte in modo da essere il più possibile perpendicolari al piano contenente il percorso ideale dei blocchi ed a coprire tratti di pendio di circa 10 metri di lunghezza con una sovrapposizione di immagini di circa 3 metri. Ogni prova è stata inoltre registrata con ripresa ravvicinata da una telecamera mobile.

5. Elaborazione ed interpretazione delle immagini. Le riprese sono state analizzate in laboratorio utilizzando un programma di calcolo messo a punto per la determinazione, per ogni fotogramma sequenziale fissato, delle coordinate del baricentro del masso rispetto ad un sistema cartesiano di riferimento, definito alla scala reale, che comprende il profilo del pendio (*fig. 3.2*). Il profilo del pendio viene definito utilizzando, come principale riferimento, punti riconoscibili nelle restituzioni fotogrammetriche o topografiche. L'esame delle registrazioni si effettua determinando in più fotogrammi la posizione relativa del baricentro del blocco (mobile) al profilo del pendio (fisso). Di norma non si esaminano tutti i fotogrammi che costituiscono la ripresa, ma un fotogramma ogni tre; il passo di tempo tra un intervallo ed il successivo è di 4/100 di secondo. In questo modo è possibile determinare sia il percorso del baricentro del blocco, sia le velocità assunte dal blocco durante il moto. Per quanto riguarda la misura della velocità angolare si è fatto maggiormente riferimento alle registrazioni effettuate dalla telecamera mobile, misurando, attraverso il conteggio dei fotogrammi, noto l'intervallo di tempo tra un fotogramma ed il successivo, il tempo totale di rivoluzione del blocco. L'interpretazione completa di ogni prova ha richiesto inoltre la correzione di eventuali errori di non perpendicolarità della ripresa laterale utilizzando i dati delle riprese frontali, l'individuazione su video degli impatti per un miglior calcolo

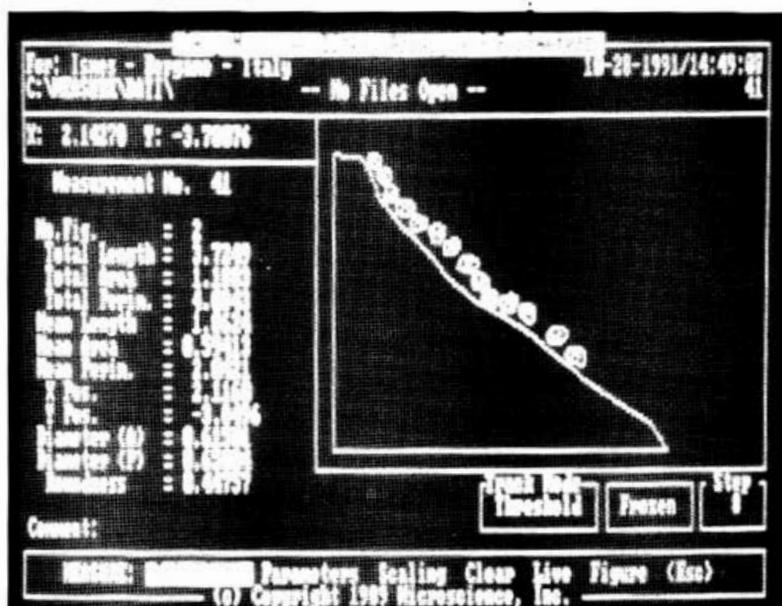
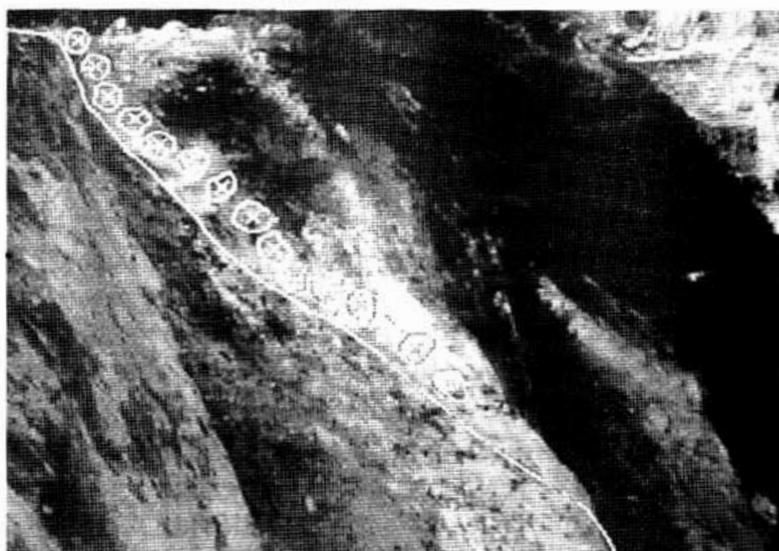


Fig. 3.2: Elaborazione delle immagini acquisite durante una prova: in alto ripresa laterale del percorso del blocco; in basso restituzione del fenomeno in un sistema di riferimento cartesiano. (Fotografia dell'ISMES)

delle velocità pre e post collisione ed il cambio di sistema di riferimento in ogni contatto in modo da determinare le componenti normali e tangenziali al profilo del pendio della velocità. Nota infine la forma e la dimensione dei blocchi è stato calcolato il momento di inerzia rispetto al centro di massa del blocco nella sezione del moto.

### 3.2.3. Parametri del moto

Le prove sono state interpretate con riferimento all'utilizzo di due tipi di modelli che sono descritti nel capitolo 4: quelli che considerano il blocco puntiforme e quelli che considerano il blocco di forma ellissoidale. Nel primo caso si sono ottenuti i coefficienti di restituzione tangenziali e normali  $K_t$  e  $K_n$  e il coefficiente di attrito al rotolamento, distinguendo il movimento di rotolamento da quello di rimbalzo tramite l'utilizzo del principio della massima efficienza del moto. (figg. 3.3 - 3.4).

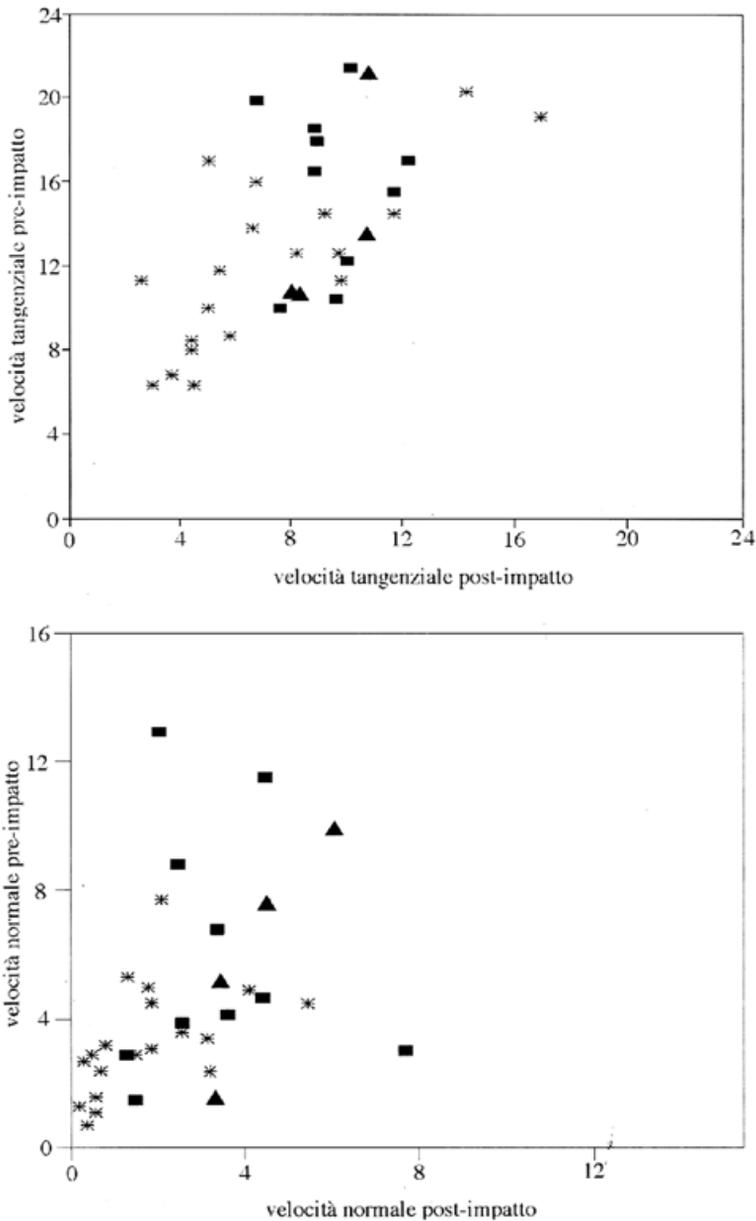
Nella tabella 3.1 vengono riportati i valori dei parametri medi  $K_n$  e  $K_t$  e  $\tan\phi$  ottenuti per diverse prove (Azzoni et al., 1992).

Nel secondo caso si ottiene il coefficiente di restituzione come rapporto tra l'energia cinetica totale del blocco prima e dopo l'impatto ed il coefficiente d'attrito al rotolamento  $\mu$ . Per la determinazione di  $\mu$  è stata utilizzata la seguente equazione (Azzoni et al., 1995) che ipotizza che la sezione del blocco sia un cerchio.

$$\mu = \tan \alpha - \frac{[v_t^2(t) - v_{t_0}^2(t_0)]}{Ag \cos \alpha [X_G(t) - X_G(t_0)]}$$

dove  $\alpha$  è l'inclinazione del pendio,  $v_t(t)$  e  $v_t(t_0)$  sono le velocità tangenziali al tempo  $t$  e  $t_0$  rispettivamente,  $X_G(t) - X_G(t_0)$  è la distanza percorsa nell'intervallo di tempo  $t - t_0$  e  $A = m/(m + I/R^2)$  dove  $m$  è la massa del blocco,  $I$  il momento di inerzia del blocco rispetto al centro di massa e  $R$  il raggio del cerchio.

Nella tabella 3.2 vengono riportati i valori dei parametri  $K$  e



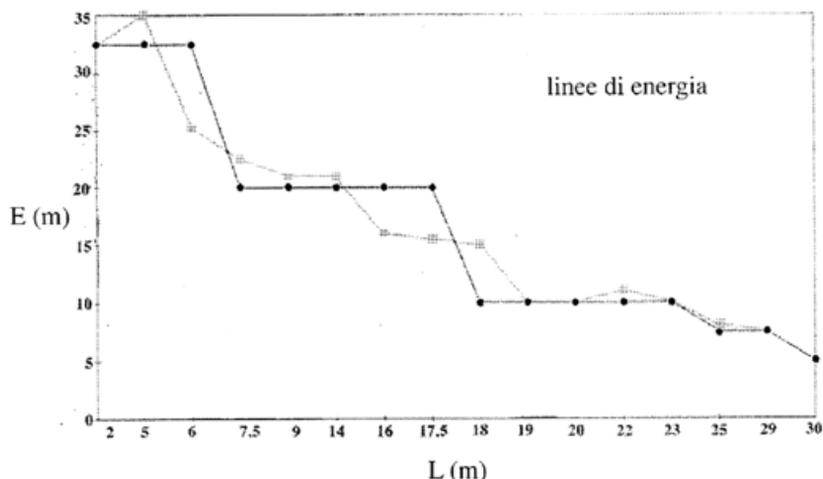


Fig. 3.4: Diagramma della variazione dell'altezza di energia durante un percorso di caduta (\* = dati misurati; ●● dati modellati per ottenere i coefficienti di restituzione)

Tab. 3.1: Valori dei coefficienti di restituzione e coefficiente d'attrito determinati da prove in sito (Azzoni et al., 1992)

Sito	Altezza (m)*	lungh. (m)**	Inclinaz. (°)***	Materiale affiorante	$K_t$	$K_n$	$\tan \phi$
Strozza 1° pendio	0	75	80 parte superiore 30 parte inferiore	roccia detrito fine	0.45 rimbalzi 0.75 rimbalzi e rotolamento	0.45 rimbalzi 0.75 rimbalzi e rotolamento	0.97 - 0.184
Strozza 2° pendio	0	70	40	detrito fine	0.66	0.30	0.75 - 0.159
Cagliari	0	60	25	detrito e terra	0.66	0.62	0.39 - 0.117
Val Malenco	400	60	40	detrito e pezzatura grossolana	0.80	1.22	0.88 - 0.240
Lusema	0	70	80	roccia	-	-	1.31 - 0.163
Iselle	10	60	40	detrito a pezzatura grossolana	-	-	0.84 - 0.301

\* Differenza di quota tra la zona di lancio e la zona di registrazione

\*\* Lunghezza del tratto di caduta registrato

\*\*\* Inclinazione del tratto registrato

$\mu$  ottenuti per diverse prove (Azzoni & De Freitas, 1995).

Tab. 3.2: Valori dei coefficienti di restituzione e di attrito al rotolamento ottenuti da prove effettuate in sito (Azzoni & De Freitas, 1995)

<i>Descrizione delle caratteristiche del pendio</i>	<i>coeff. di restituzione</i> $K$	<i>coeff. di attrito al rotolamento</i> $\mu$
Roccia affiorante	0.85	0.40
Detrito compatto	0.60	0.55
Detrito non compattato	0.40	0.75
Detrito	0.55	0.60
Detrito frammisto a terreno	0.45	0.60
Materiale terroso posto al fondo del fossato	< 0.20	0.80
Terreno compattato artificialmente	0.50 - 0.60	0.60

Nella tabella 3.3 vengono riportati valori di  $K_t$  e  $K_n$  proposti da Pfeiffer e Bowen (1989)

Tab. 3.3: Valori di  $K_t$  e  $K_n$  proposti da Pfeiffer e Bowen (1989)

<i>Descrizione delle caratteristiche del pendio</i>	$K_t$	$K_n$
Superfici lisce di materiale resistente come pavimentazione stradale o superficie rocciosa	0.87 - 0.92	0.37 - 0.42
Prevalenza di substrato roccioso intatto con blocchi isolati	0.83 - 0.87	0.33 - 0.37
Detrito costituito da grandi blocchi con scarsa vegetazione affiorante	0.82 - 0.85	0.30 - 0.33
Detrito ricoperto da abbondante vegetazione e terreno scarsamente vegetato	0.80 - 0.83	0.28 - 0.30
Pendio in terra	0.78 - 0.82	

Nella tabella 3.4 vengono riportati valori di  $K$ ,  $K_n$  e  $K_t$  dati da Richards (1988).

Tab. 3.4: Valori dei coefficienti di restituzione ricavati da sperimentazioni in sito (Richards, 1988)

Riferimento bibliografico	$K$	$K_n$	$K_t$	Descrizione delle caratteristiche del pendio
Habib	0.75 - 0.80 0.50 - 0.60			su più pendii in Italia su più pendii in Norvegia
Diescoeudres & Zimmermann	0.40 0.85			roccia affiorante
Piteau & Clayton		0.9 - 0.8 0.8 - 0.5 0.5 - 0.4 0.4 - 0.2	0.75 - 0.65 0.65 - 0.45 0.45 - 0.35 0.3 - 0.2	roccia affiorante detrito e roccia affiorante detrito compatto e roccia vegetazione
Hoek (rapporto non pubblicato per i Departements of Transportation in USA, 1987)		0.53 0.40 0.35 0.32 0.32 0.30	0.99 0.90 0.85 0.82 0.80 0.80	substrato roccioso pavimentazione stradale roccia affiorante detrito detrito e vegetazione terreno con poca vegetazione

### 3.3. Prove su barriere paramassi deformabili

#### 3.3.1. Scopi delle prove

Il problema che viene qui affrontato non è quello dell'analisi strutturale di una barriera paramassi a rete per la progettazione di un'opera che sia in grado di funzionare efficacemente per determinate situazioni in esame, ma è quello di verificare, tramite sperimentazione in sito, sistemi di protezione già esistenti, in modo da poter effettuare, per ogni caso in esame, la scelta corretta del sistema da installare.

La necessità di effettuare prove in sito, che è sentita in particolare dalle ditte costruttrici, è legata alla necessità di verificare l'efficacia della struttura nel suo complesso una volta installata in sito e quindi come i vari elementi: reti, funi, montaggi, dissipatori

di energia e ancoraggi interagiscono una volta sollecitati da quella che può essere considerata l'azione dell'«urto di progetto».

Indagini effettuate esaminando un campione di 100 interventi realizzati nella Provincia di Trento (De Col & Cocco, 1996) hanno messo in evidenza che:

- un intervento su 10 non è stato progettato, ma realizzato con un carattere di somma urgenza;
- due interventi su 10 hanno avuto una progettazione decisamente insufficiente;
- sei interventi su 10 hanno avuto uno studio solo sulle traiettorie dei blocchi, ma carente nella fase progettuale delle opere di difesa;
- un intervento su 10 è stato progettato in modo completo.

### *3.3.2. Tecniche di prova*

Un campo prove, realizzato in una cava a mezza costa (Peila et al., 1995), è stato predisposto in modo da poter sottoporre una barriera paramassi a rete, composta da 3 campate, all'impatto di un blocco roccioso di massa nota, con traiettoria guidata, riprendendo le fasi dell'impatto con tre telecamere e misurando, mediante appositi dinamometri installati sulla struttura, le forze trasmesse ai componenti della barriera (*fig. 3.5*). Il moto del blocco prima dell'impatto è controllato mediante un carrello che scorre sul cavo della teleferica appositamente predisposta. Quando il blocco raggiunge una posizione definita, in prossimità della barriera, il cavo di collegamento è tranciato mediante una carica esplosiva, con cordone detonante, per consentire un impatto in volo libero.

Le barriere studiate hanno tipologie a sacco e verticale, l'interasse dei montanti è di 10 m, mentre l'altezza varia tra 3 e 5 m. Il sistema comprende dissipatori; le reti sono del tipo parasiluri (A.S.M.) con anelli del diametro di 350 mm e con diametro della fune di 11 mm a filo continuo, intrecciato su se stesso fino a formare una fune di 7 fili di diametro di 8 mm, serrate con morsetti a pressione.

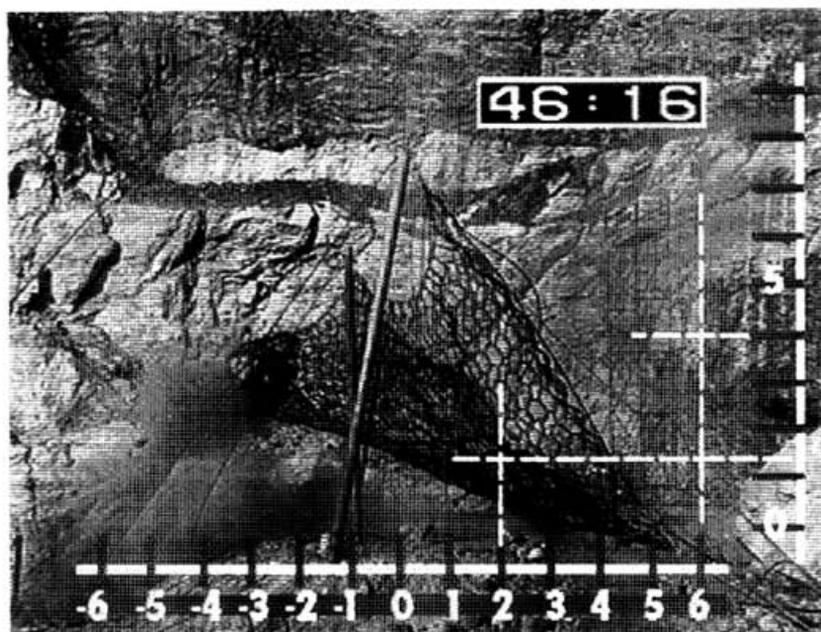


Fig. 3.5: Fase di impatto del blocco durante una prova in sito  
(Peila, Pelizza & Sassudelli, 1995)

Le masse dei blocchi esaminati sono state fatte variare tra 1500 e 4450 kg; l'altezza di caduta è stata fatta variare tra 16 e 52 m, con conseguenti energie potenziali variabili tra 423 e 2398 kJ ed energie cinetiche misurate prima dell'impatto variabili tra 291 e 2002 kJ.

Sono stati inoltre misurati, durante la fase di impatto, i valori della forza agente sulla barriera e sui vari elementi strutturali e si sono misurate le deformazioni della rete.

### 3.3.3. Risultati delle prove

Tutte le barriere hanno resistito all'urto dei blocchi arrestandoli. Le energie assorbite sono state pari a quelle di progetto, anche se i comportamenti delle barriere così sollecitate sono state di diver-

so tipo: da quello prevalentemente elastico a quello elasto-plastico.

Sono stati messi in evidenza i contributi dei singoli componenti della struttura alla deformazione globale e la loro dipendenza dall'inerzia, valutando in particolare l'efficacia dei dissipatori di energia, delle giunzioni e delle fondazioni dei montanti e dei controventi.

Infine sono stati determinati i parametri che un progettista deve richiedere ad un costruttore:

- l'energia massima dissipabile in condizioni di sicurezza ed affidabilità;
- la deformazione massima in condizioni di massima energia dissipabile;
- i carichi sulle fondazioni in condizioni di massima energia dissipabile;
- le specifiche di montaggio con le caratteristiche meccaniche delle giunzioni.

## **4. MODELLI ANALITICI E NUMERICI PREVISIONALI**

### ***4.1. Introduzione***

I modelli matematici utilizzabili per la previsione del moto di caduta massi descrivono il comportamento meccanico di un generico blocco che si muove lungo un versante. La validità di un modello dipende sia dal modo in cui i diversi fenomeni fisici che si verificano (caduta libera, impatto, rottura con generazione di più frammenti, rimbalzo, rotolamento e scivolamento) vengono individuati e descritti in termini matematici, sia dall'affidabilità dei parametri scelti per determinare l'occorrenza e l'entità dei fenomeni fisici prima citati. La validazione di un modello si effettua attraverso il confronto tra i risultati di prove in sito e quelli ottenuti dalle simulazioni numeriche svolte con il modello stesso.

L'utilizzo del modello come mezzo previsionale di fenomeni non ancora verificatisi richiede l'estensione di dati ottenuti per situazioni già osservate e descritte a quelle di situazioni solo potenziali che, con quelle di riferimento, non possono avere analogie perfette per quanto riguarda la morfologia e le caratteristiche meccaniche del pendio e dei blocchi. Quest'ultimo passaggio è forse il più difficile e, per quanto possano essere utili le informazioni bibliografiche esistenti sull'argomento, dipende principalmente dall'esperienza e dalla sensibilità del progettista.

Le finalità principali dei modelli di calcolo sono quelle di determinare le seguenti grandezze:

- possibili percorsi di caduta lungo il versante;
- altezze delle traiettorie di caduta rispetto alla superficie del pendio, velocità ed energie assunte dai blocchi lungo i percorsi di caduta;
- massime distanze raggiunte dai massi e zone di espandimento a valle.

Affinchè il modello fornisca i percorsi di caduta dei massi coinvolti nel movimento franoso nello spazio tridimensionale che definisce il versante, è necessario che esso possa analizzare la topografia completa della superficie del pendio (Descoedres & Zimmermann, 1989).

Una modellazione tridimensionale viene spesso svolta quando il fenomeno si è già realizzato ed i blocchi che si sono staccati o hanno ancora la possibilità di staccarsi da una parete rocciosa hanno compiuto o compieranno dei percorsi preferenziali seguendo una pista progressivamente aperta dal loro passaggio.

In questi casi la descrizione della topografia del versante è meno onerosa dal punto di vista dei dati da introdurre in quanto è limitata alla superficie interessata dal percorso dei blocchi.

Il problema tridimensionale viene spesso ricondotto, con una buona approssimazione, a piano, facendo ricorso ad ipotesi e schematizzazioni che semplificano le procedure di calcolo rendendole economiche e compatibili con gli strumenti a disposizione. Tale semplificazione si traduce innanzitutto nella scelta di una sezione verticale che accoglie tutti i percorsi di caduta dei massi lungo il versante.

Al fine di poter effettuare correttamente la modellazione del fenomeno è necessario evidenziare quali sono gli aspetti rilevanti in un processo di caduta massi. Le osservazioni in sito (Azzoni et al., 1991, 1992; Giani, 1988, 1992) permettono di individuare un'alternanza continua di diversi tipi di movimenti che possono essere così definiti:

1. caduta libera
2. impatto e rimbalzo del blocco sulla superficie del pendio
3. rotolamento
4. scivolamento.

I metodi analitici che vengono qui trattati descrivono i moti di caduta libera, rotolamento e scivolamento attraverso equazioni caratteristiche.

I più importanti problemi della modellazione riguardano la scelta delle condizioni che determinano il passaggio da un tipo di movimento ad un altro e la descrizione del comportamento del blocco durante l'impatto. Si noti, in particolare, che il passaggio tra un tipo di movimento ad un altro non avviene istantaneamente potendo coesistere simultaneamente la combinazione di due o più differenti categorie di moto (ad esempio rotolamento e scivolamento).

Tali scelte e tali ipotesi dipendono fondamentalmente dalla scelta della forma geometrica che viene assunta per i blocchi.

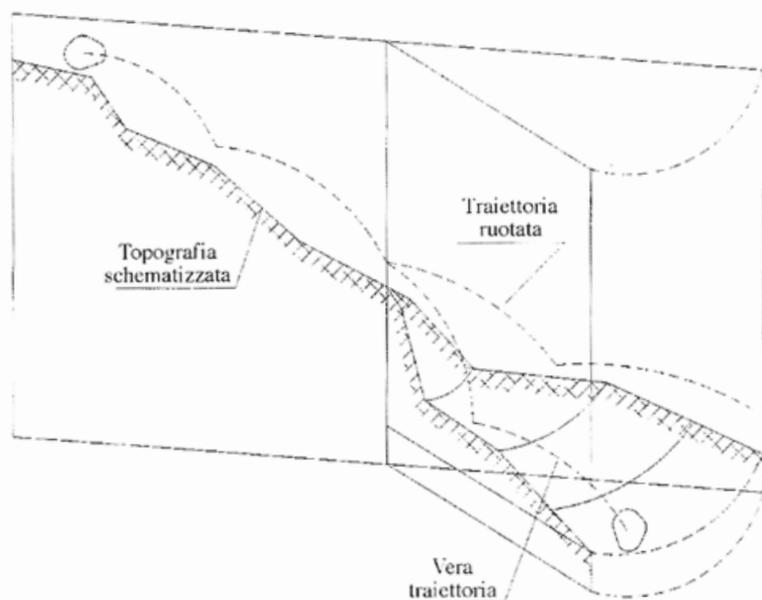
Il generico blocco che crolla può essere considerato come:

- il punto in cui la massa è concentrata (Piteau, 1976; Azimi et al., 1982; Spang & Rautenstrauch, 1987; Hungr & Evans, 1988; Fornaro et al., 1990);
- un'ellisse, definito per mezzo dei suoi semiassi, nell'ipotesi in cui il moto è contenuto in una sezione verticale (Bozzolo & Pamini, 1982; Azzoni et al., 1991);
- un solido avente sezione circolare nel piano verticale del movimento (Pfeiffer & Bowen, 1989);
- un blocco di sezione ellittica o poligonale (Descoeudres & Zimmermann, 1987);
- un solido di qualunque forma definita nella sezione verticale del movimento (Cundall, 1971; Shi, 1989) o in campo tridimensionale (Cundall & Heart, 1985).

Nel caso in cui il problema venga trattato come piano e si ipotizzi che il percorso di un blocco sia contenuto in una sola sezione verticale si possono fare delle "correzioni" per tener conto che i blocchi seguono un percorso che soddisfa la condizione di maggiore efficienza del moto, cambiando quindi la direzione dei movimenti di caduta o di rimbalzo, in accordo all'inclinazione locale del pendio o alle caratteristiche del materiale che costituisce il pendio stesso.

Questa correzione richiede che si rappresenti la superficie topografica del pendio con una poligonale ottenuta combinando

i segmenti che giacciono nei piani verticali contenenti il percorso del blocco (*fig. 4.1*) (Bozzolo, Pamini & Hutter, 1988);



*Fig. 4.1:* Sezione della superficie topografica del pendio contenente la traiettoria del blocco (Bozzolo, Pamini & Hutter, 1988)

L'impatto di un blocco sul pendio avviene con una dissipazione di energia causata dal comportamento elasto-plastico dei mezzi a contatto, dalla generazione di onde elastiche, dai fenomeni di rottura del blocco e del materiale che costituisce il pendio e dalla resistenza allo scivolamento ed al rotolamento mobilitate al contatto tra blocco e superficie del versante.

I metodi che schematizzano il blocco come un punto non sono in grado, in assenza di altri tipi di assunzioni correttive, di analizzare il comportamento a deformazione dei mezzi a contatto o di determinare i momenti rotazionali che si generano quando il blocco impatta. Il movimento del blocco è quindi schematizzato come una successione di rimbalzi. Il comportamento a rimbalzo del blocco è usualmente descritto dal coefficiente di restituzione

che esprime la dissipazione di energia durante l'impatto.

Il coefficiente di restituzione è definito come il rapporto tra le velocità del blocco dopo e prima dell'impatto. Una migliore descrizione del fenomeno dell'impatto è ottenuta assegnando due coefficienti di restituzione: uno per definire il rapporto tra le velocità tangenziali di rimbalzo e di impatto, l'altro per definire i rapporti tra le velocità normali.

I metodi che considerano la dimensione e la forma dei blocchi sono in grado di calcolare l'andamento delle velocità angolari durante il movimento. I metodi numerici, come il metodo degli elementi distinti (DEM) e il metodo di analisi delle deformazioni dei mezzi discontinui (DDA), possono essere usati per studiare il comportamento meccanico di un sistema di blocchi, calcolando gli spostamenti e le deformazioni dei blocchi.

Il metodo DEM viene impiegato più efficacemente per studiare gli spostamenti reciproci tra blocchi piuttosto che il movimento di un singolo blocco, che perde contatto con la massa rocciosa e precipita nel vuoto. Il metodo può essere quindi utilizzato per determinare l'incipienza del fenomeno piuttosto che il percorso di caduta di un blocco.

Il metodo DDA può essere utilizzato per analizzare sia la fase di distacco dalla massa rocciosa, sia la fase di moto del blocco.

## 4.2. Metodi analitici

### 4.2.1. Blocco puntiforme

#### Moto di un singolo blocco

I metodi che considerano il generico blocco come un semplice punto di massa  $m$  e velocità  $v$  sono comunemente definiti metodi *lumped mass*. Il punto si muove nell'aria secondo una traiettoria balistica e la resistenza dell'aria è generalmente trascurata. Al contatto con il pendio la componente normale della

velocità viene cambiata di segno e ridotta di un coefficiente  $K_n$  (coefficiente di restituzione normale), nello stesso modo la velocità tangenziale viene ridotta di  $K_t$  (coefficiente di restituzione tangenziale). I metodi di questo tipo non tengono conto di momenti rotazionali. I due coefficienti di restituzione assumono un carattere fenomenologico in quanto comprendono globalmente il fenomeno di impatto, il lavoro di deformazione, lo scivolamento al contatto ed il trasferimento delle caratteristiche di rotazione del moto a quelle di traslazione e viceversa.

Modelli di questo tipo sono stati messi a punto da Piteau e Clayton (1977), Azimi et al. (1982), Spang (1987) e Hungr ed Evans (1988). Le fasi del moto di caduta libera in genere sono descritte utilizzando le equazioni descritte nel capitolo 2. Ciò che differenzia questi modelli è la diversa schematizzazione dei fenomeni di impatto e scivolamento-rotolamento.

Hungr ed Evans (1988) hanno proposto il seguente procedimento per determinare la condizione di transizione tra moto con rimbalzi e rotolamento.

Nella traiettoria di volo il blocco ha un'altezza di energia costante (fig.4.2) ed uguale a:

$$E = z + \frac{v^2}{2g}$$

dove  $z$  è l'elevazione e  $v$  è il modulo della velocità del blocco.

L'impatto determina una perdita di energia cinetica che, espressa in termini di "altezza di energia", può essere ottenuta come:

$$\Delta E = \frac{v^2}{2g} \left( \frac{K_t^2 + K_n^2 \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta} - 1 \right)$$

dove  $\beta$  è l'angolo formato tra la tangente alla traiettoria del blocco nel punto di impatto e il profilo del pendio.

Un diagramma che descriva la variazione dell'altezza di energia con il cammino percorso può essere costruito per ogni

fase di rimbalzo utilizzando le precedenti equazioni. Il diagramma avrà andamento costante nelle fasi aeree, mentre varierà linearmente nei percorsi di rotolamento e "a gradino" a seguito di ogni impatto (fig.4.2).

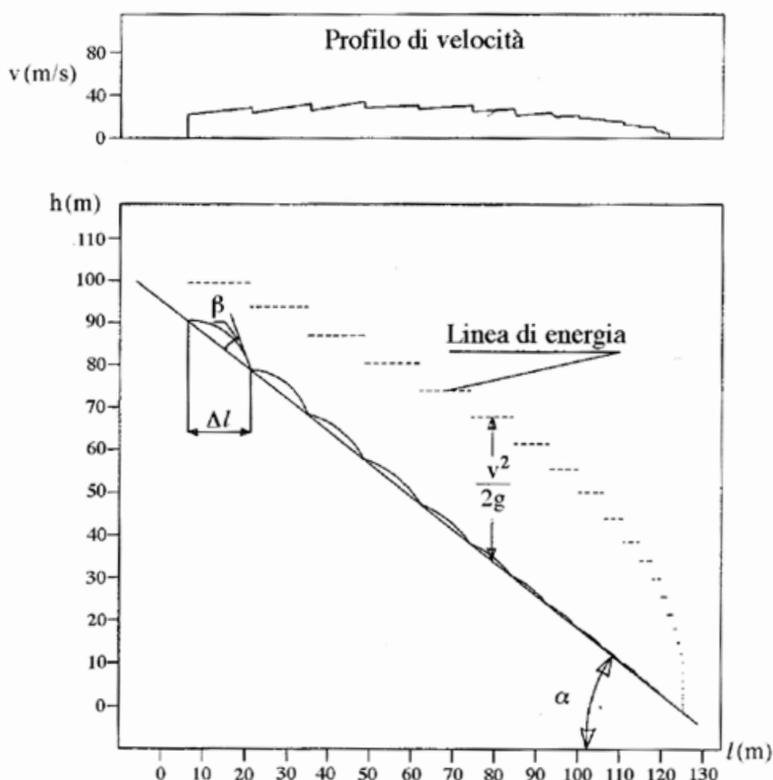


Fig. 4.2: Diagramma del percorso del blocco e corrispondente linea di energia nel modello proposto da Hungr ed Evans (1988)

Detta  $\Delta l$  l'ampiezza del tratto orizzontale che definisce la proiezione della traiettoria compresa tra due rimbalzi e  $\Delta E$  la perdita di energia cinetica che si ha in un urto, la perdita di altezza di energia cinetica specifica  $\Delta E / \Delta l$  determina un'accelerazione del blocco quando è minore della tangente dell'angolo di in-

clinazione del pendio  $\alpha$ , e viceversa una decelerazione quando è maggiore. Il moto di rotolamento succede a quello di rimbalzo quando  $\Delta E/\Delta l$  supera il valore del coefficiente d'attrito al rotolamento. Il raggiungimento di questa condizione avviene quando l'energia cinetica persa nel moto di rotolamento è minore di quella persa nel moto con rimbalzi successivi, cioè quando il rotolamento diventa il tipo di moto più efficiente.

In alternativa a questo metodo detto "dell'altezza di energia" alcune assunzioni semplificative sono state proposte da Piteau e Clayton (1988) per definire la condizione di passaggio dal comportamento a rimbalzi a quello di rotolamento e l'arresto del blocco (se i coefficienti di restituzione non hanno valore nullo teoricamente il blocco non si può arrestare). Esse sono:

- quando la velocità di post-impatto ha valori "quasi nulli" l'arresto del blocco si ha nel punto di impatto;
- quando l'angolo compreso tra la traiettoria che si determina a seguito dell'impatto ed il profilo del pendio è sufficientemente basso o prossimo a zero l'urto determina la condizione di passaggio tra il moto con rimbalzi successivi a rotolamento.

### Moto di più blocchi

La metodologia scelta da alcuni autori (Wu S.S., 1984; Scavia et al., 1988; Peila & Biolatti, 1988) per considerare la variabilità di parametri che non sono considerati nei metodi *lumped mass*, quali ad esempio la forma e la dimensione dei blocchi o dei vari fenomeni che vengono interamente compresi nei coefficienti di restituzione è di tipo statistico.

Scavia et al. (1988) hanno svolto delle simulazioni con il metodo Monte Carlo, applicando il modello di Piteau e Clayton (1988). La distribuzione statistica dei punti di arresto viene valutata dal modello considerando come aleatorie le seguenti variabili:

- le componenti  $x$  e  $y$  della velocità iniziale, per tenere conto delle incertezze relative al punto di distacco;
- l'angolo di inclinazione del tratto di pendio in cui avviene

l'impatto del blocco, per tener conto delle irregolarità di scala del pendio, suddiviso in segmenti a pendenza costante;

- l'angolo di attrito al rotolamento ed i coefficienti di restituzione.

Per ogni simulazione effettuata si ottiene il corrispondente percorso del blocco. Per ogni percorso vengono determinati il punto di arresto, le altezze di passaggio e la velocità dei massi in ogni punto desiderato e vengono diagrammati i percorsi con distanza d'arresto minima e massima, l'istogramma di frequenza dei punti di arresto dei massi e l'involuppo delle altezze e delle velocità massime raggiunte dai massi esaminati nei loro percorsi lungo il pendio (fig. 4.3).

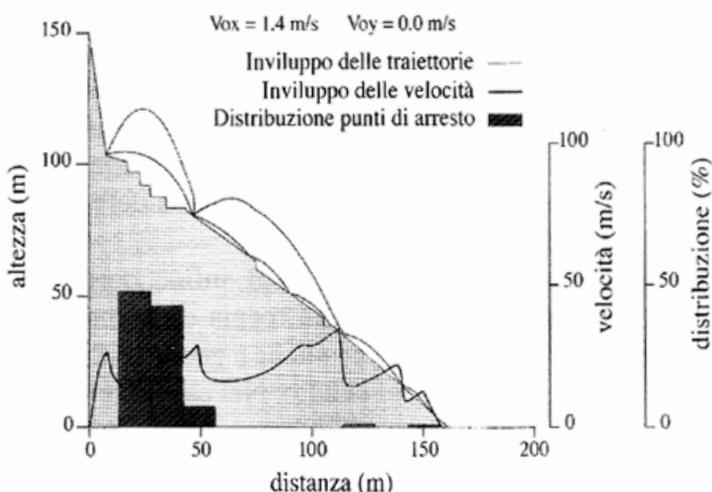


Fig. 4.3: Esempio di risultato grafico dell'analisi probabilistica nel modello proposto da Scavia et al. (1988)

L'analisi probabilistica è stata utilizzata anche per modellare i fenomeni di rottura del blocco lungo la discesa (Peila & Biolatti, 1988).

Il modello prende in considerazione quattro parametri:

- $K_n$  e  $K_t$  coefficienti di restituzione
- $\alpha$  coefficiente di dispersione
- EUR coefficiente di esplosione

I coefficienti  $K_n$  e  $K_t$  esprimono la perdita di energia, durante l'impatto, rispettivamente in direzione normale e tangenziale al pendio. Fisicamente  $K_n$  quantifica l'energia persa in onde sismiche per l'affossamento del blocco sul versante mentre  $K_t$  l'energia persa per attrito. Entrambi i parametri inoltre, nel caso dell'esempio di un pendio composto da detrito di falda trattato dagli Autori, quantificano l'energia dissipata nel rimobilizzare i blocchi di detrito interessati dall'impatto del blocco.

Nel modello si ipotizza che la distribuzione statistica dei coefficienti di restituzione sia normale; il valore medio dipende dalle caratteristiche meccaniche del detrito e dal rapporto fra il diametro del blocco e quello medio del detrito ( $d_b/d_d$ ), lo scarto quadratico medio è funzione unicamente della massa del blocco.

Il coefficiente di dispersione  $\alpha$  esprime la possibilità, che, all'atto del rimbalzo, l'inclinazione della traiettoria individuata sulla base dei coefficienti di restituzione possa ulteriormente variare per effetto delle rugosità del pendio e della forma e dimensione del blocco.

Il coefficiente di esplosione EUR, infine, definisce l'energia unitaria limite di rottura della roccia e dipende essenzialmente dalle caratteristiche meccaniche e geometriche del blocco e del materiale affiorante sul pendio. Nel caso di impatto roccia su roccia, tale energia limite è stata sperimentalmente definita con riferimento all'energia necessaria per frantumare i blocchi con un martello ad urto.

Nel procedimento di calcolo svolto dagli Autori si ipotizza, sulla base di considerazioni semi-empiriche, che all'atto dell'esplosione, l'energia dell'impatto si suddivida, fra i vari frammenti, proporzionalmente alla loro superficie; il vettore velocità iniziale di ciascun frammento ha inoltre direzione casuale all'interno di un certo campo di variabilità.

Il movimento di rotolamento non è distinto dallo scivolamento. Per simulare questo comportamento è stato introdotto un coefficiente di attrito al rotolamento  $\mu$ , che definisce l'energia

persa in attrito per unità di lunghezza del pendio. Il valore di  $\mu$  è valutato in 0.40-0.70 per detrito con  $d_b$  e  $d_d < 0.40-0.50$  ed in 0.20-0.50 per detrito di piccola pezzatura dove  $d_b$  è il diametro del blocco e  $d_d$  è il diametro medio degli elementi che costituiscono il detrito.

I due tipi di simulazioni probabilistiche proposte dagli Autori permettono di evidenziare come diversi parametri del modello, quali ad esempio la dimensione e la resistenza dei blocchi e la rugosità della superficie del pendio, influenzano il moto determinando dei percorsi diversi per ogni blocco.

A giudizio dello scrivente, il problema che resta da risolvere è come costruire una statistica per ogni parametro che costituisce un dato di ingresso del modello e che è noto solo con una notevole aleatorietà.

Una distribuzione statistica può essere costruita in modo più affidabile interpretando i risultati di prove in sito in cui è stato osservato e descritto il comportamento di un notevole numero di blocchi che si muovono lungo un pendio di caratteristiche morfologiche e meccaniche note.

#### 4.2.2. Blocchi di forma ellissoidica

Due modelli, denominati SASS e MASSI (Bozzolo & Pamini, 1982) idealizzano i blocchi di forma ellissoidica. L'affidabilità di questi modelli è stata validata attraverso la loro applicazione alla simulazione di situazioni osservate in più siti aventi diverse situazioni geomorfologiche di versante (Bozzolo, Pamini & Hutter, 1988).

I modelli si distinguono in base alle semplificazioni introdotte che riguardano la geometria, la traiettoria in aria e la dinamica dell'impatto. Tali modelli sono in grado di considerare la dimensione e la forma del blocco, di considerare percorsi tridimensionali e le rotazioni dei blocchi, sia nell'aria, sia nel momento di impatto. La traiettoria tridimensionale viene determinata su

una successioni di sezioni verticali. Queste sezioni non giacciono su un unico piano verticale. La topografia del pendio è approssimata con una serie di segmenti che giacciono su piani verticali che possono essere ruotati rispetto alla sezione in esame (fig. 4.1).

Il modello SASS schematizza il blocco come corpo rigido, nel caso in cui la fase di movimento sia di caduta libera e di impatto dinamico, e come punto materiale nella determinazione del punto di impatto e nella fase di scivolamento. Questo modello viene generalmente utilizzato per problemi in cui la superficie è costituita da terreno o materiale detritico.

Nel modello MASSI, invece, il blocco viene assunto durante tutta la fase di caduta come corpo rigido; il moto viene descritto come una serie di impatti successivi e il punto di contatto è precisamente determinato. Esso può essere utilizzato nello studio della caduta di blocchi su pendii in roccia aventi un buon grado di compattezza.

I blocchi sono idealizzati di forma ellissoidica (fig. 4.4), ma l'espressione matematica del moto è definita in campo bidimensionale, nel piano XY della figura 4.1 e quindi le rotazioni nel piano YZ non sono considerate.

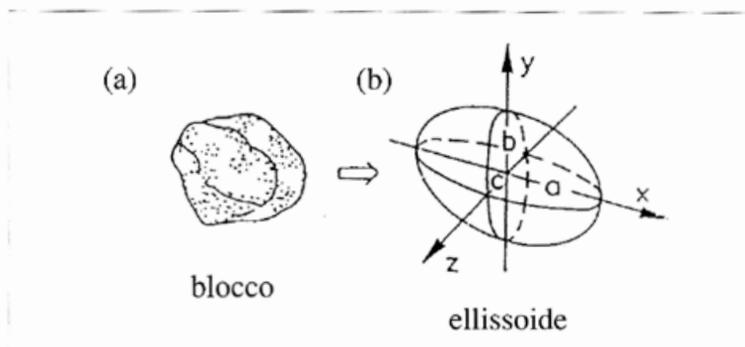


Fig. 4.4: Dalla situazione reale (a) al blocco idealizzato (b) (Bozzolo et al., 1988)

Assumendo, come ipotesi semplificative, che il blocco e la superficie del pendio non subiscano modificazioni geometriche

a causa delle deformazioni che si hanno nell'urto, la fase di impatto può essere modellata con due parametri "fenomenologici": un coefficiente di restituzione  $\varepsilon$  che definisce il rapporto tra le velocità normali pre e post-impatto alla superficie del pendio ed un coefficiente di viscosità  $\mu$ , che definisce la variazione della componente tangenziale della velocità (perdita di energia cinetica per attrito secondo Coulomb).

Il modello SASS prevede, oltre alle ipotesi precedentemente dette, che al momento del contatto,  $\mu$  sia infinito, per evitare ogni scorrimento; conseguentemente il punto di contatto diventa centro di rotazione.

Quest'ipotesi che permette di semplificare notevolmente il comportamento del blocco nell'impatto è stata ripresa da Azzoni et al. (1991, 1995), Autori del modello CADMA.

Con riferimento alla figura 4.5 dove  $P$  punto di contatto blocco pendio è centro di rotazione, si possono esprimere le componenti della velocità di traslazione immediatamente successive all'impatto come:

$$v_x = \omega d_y \quad \text{e} \quad v_y = \omega d_x$$

dove  $d_x = x_G - x_p$ ,  $d_y = y_G - y_p$  e  $\omega$  è la velocità rotazionale post-impatto. Applicando il principio della conservazione del momento della quantità di moto, valido a seguito delle ipotesi prima definite, si può ottenere il valore della velocità angolare post-impatto:

$$\omega = \frac{J\omega_0 + v_{0x}d_y + v_{0y}d_x}{J + d_x^2 + d_y^2}$$

dove  $J$  è il momento di inerzia della figura piana rispetto al suo centro di massa.

Nota la velocità angolare  $\omega$  dopo l'urto è possibile quindi calcolare le componenti della velocità traslatoria dopo l'urto, nonché l'energia cinetica totale come:

$$T = \frac{1}{2} (J\omega^2 + v_x^2 + v_y^2)$$

La perdita di energia è espressa tramite un coefficiente derivato dalla relazione:

$$\eta^* = \frac{T}{T_0} = \frac{\omega^2}{2T_0} = \frac{\omega^2}{2T_0} (J + d_x^2 + d_y^2)$$

dove  $T$  è l'energia relativa alla fase di post-impatto e  $T_0$  a quella di pre-impatto. La suddetta espressione evidenzia come l'energia cinetica totale è dipendente sensibilmente anche dalla velocità angolare del masso prima e dopo l'urto (Azzoni et al., 1991).

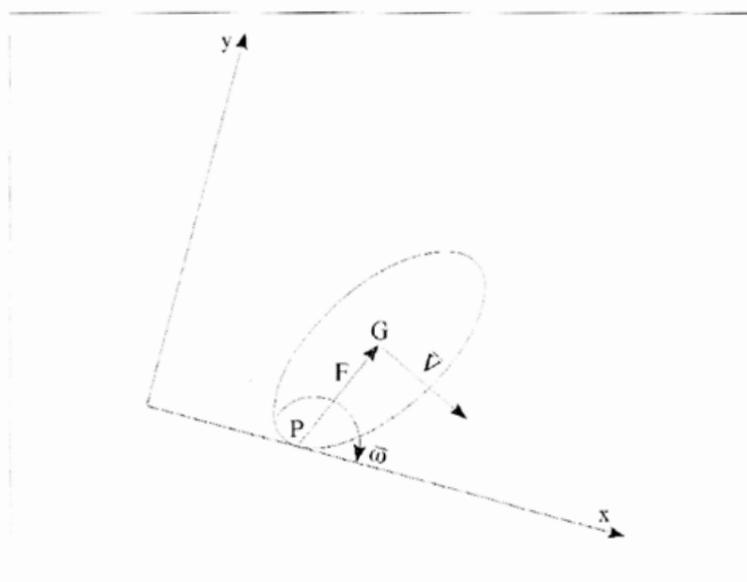


Fig. 4.5: Schematizzazione del masso nell'istante di impatto (Azzoni et al., 1991)

Valori che si possono ottenere dal calcolo di  $\eta^*$  potrebbero essere in disaccordo con i dati sperimentali; ciò è stato risolto imponendo che i valori calcolati siano inferiori a un valore  $\eta_{\max}$  che rappresenta il limite superiore, di origine sperimentale, del coefficiente di restituzione e che viene definito per ogni materiale che affiora sul pendio in esame.

Il modello prevede successivamente dei controlli per verificare la conservazione del momento della quantità di moto; si assume pertanto che:

$$\begin{aligned}\eta_{\max} \geq \eta^* &\Rightarrow \eta = \eta^* \\ \eta_{\max} < \eta^* &\Rightarrow \eta = \eta_{\max}\end{aligned}$$

L'energia cinetica persa durante la fase di impatto, nel caso in cui il principio di conservazione del momento della quantità di moto non sia rispettato, può essere calcolata tramite l'espressione:

$$T = \eta_{\max} T_0$$

I modelli che considerano il blocco come puntiforme e quelli di Bozzolo & Pamini, Azzoni & La Barbera hanno delle differenze sostanziali.

I primi schematizzano il moto come una serie successiva di cadute, impatti e rimbalzi senza rotazioni, i secondi schematizzano invece l'impatto assumendo attrito infinito e moto rotatorio attorno al punto di contatto blocco-pendio.

Per tener conto che l'urto è essenzialmente anelastico e che la componente della velocità normale post-impatto dipende essenzialmente dal moto rotatorio che si instaura dopo l'impatto, i metodi che considerano il blocco puntiforme utilizzano due coefficienti di restituzione conglobando in essi anche i fenomeni che dipendono dalla geometria del sistema.

Per tener conto che l'impatto non avviene in un punto, l'urto non è completamente anelastico, il blocco ed il pendio non sono rigidi e che l'attrito non è infinito i modelli di Bozzolo & Pamini e Azzoni & La Barbera controllano il rapporto tra l'energia cinetica post-impatto e quella pre-impatto, imponendo che sia minore di un valore assegnato nel modello.

Entrambi i metodi possono essere quindi utilizzati come validi mezzi previsionali solo se i parametri che costituiscono i dati di ingresso dei modelli sono stati accuratamente stimati, con riferimento al modello stesso da adottare.

#### 4.2.3. Blocchi aventi sezione circolare

Il modello detto CRSP (*Colorado Rockfall Simulation Program*) è stato messo a punto da Pfeiffer e Bowen (1989) con lo scopo di modellare il moto di caduta di blocchi aventi la forma di sfere, cilindri o dischi, con sezione circolare nel piano verticale del movimento.

Per descrivere il movimento dei blocchi il modello CRSP applica l'equazione del moto parabolico di un corpo in caduta libera ed il principio di conservazione dell'energia totale.

Il fenomeno dell'impatto viene modellato utilizzando come ulteriori parametri, rispetto a quelli dei metodi descritti precedentemente, la rugosità del pendio e la dimensione dei blocchi.

In particolare il modello CRSP assume che l'angolo formato tra la direzione del blocco ed il profilo del pendio vari secondo una statistica che deve essere definita per ogni caso analizzato. Il modello tratta quindi in modo statistico anche i risultati che principalmente constano nelle velocità e nelle altezze di rimbalzo, rispetto alla superficie del pendio, durante il percorso di caduta. Il modello considera quindi le combinazioni dei movimenti di caduta libera, di rimbalzo, di rotolamento e di scivolamento, che possono variare a seconda delle dimensioni dei blocchi e della rugosità del pendio.

L'affidabilità del modello è stata verificata attraverso confronti tra i risultati numerici e quelli ottenuti da prove in sito.

La descrizione del moto di caduta libera inizia da un punto nel quale, come per gli altri metodi per ora esaminati, è nota la velocità iniziale scomposta nelle sue componenti orizzontali e verticali. Il blocco è soggetto al movimento di caduta libera fino a quando non collide con la superficie del pendio, cioè finché la sua traiettoria non interseca la poligonale che descrive il profilo del pendio.

Dall'intersezione vengono ricavate le coordinate del punto di impatto. Il vettore della velocità di pre-impatto,  $v_1$ , forma

un angolo  $\alpha$  con il pendio (fig. 4.6).

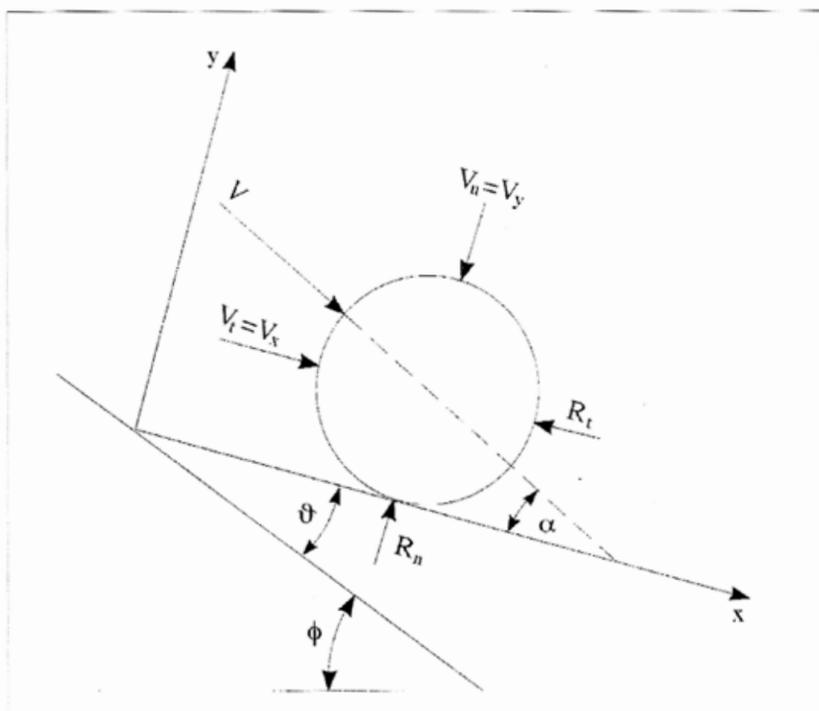


Fig. 4.6: Descrizione della fase di impatto:  $\alpha$ ) l'angolo di impatto è definito come funzione della traiettoria del blocco;  $\phi$ ) inclinazione del pendio;  $\theta$ ) variazione del pendio in funzione della rugosità locale del pendio (Pfeiffer & Bowen, 1989)

Ad ogni impatto l'inclinazione del pendio  $\phi$  è fatta variare casualmente in un campo di valori compreso tra 0 e  $\theta_{\max}$ . Il valore di  $\theta_{\max}$  dipende dalla rugosità del pendio e dalla dimensione del blocco e viene determinato da misure in sito. Nella schematizzazione del problema esso deve essere dato per ogni tratto di segmento della poligonale che definisce il profilo del pendio.

Detto R il raggio del blocco in esame si ha (fig. 4.7):

$$\tan \theta_{\max} = \frac{S}{R}$$

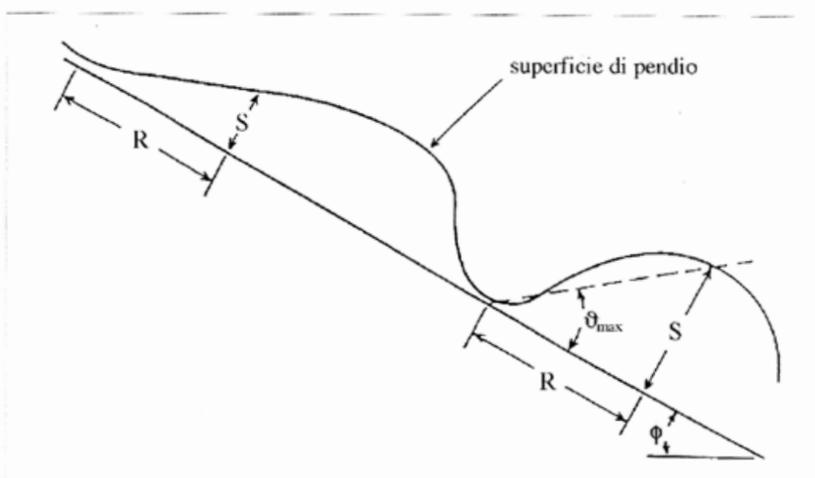


Fig. 4.7: L'influenza della rugosità del pendio sul percorso del blocco dipende dal rapporto tra l'altezza dell'asperità o rugosità della superficie ( $S$ ) ed il raggio del blocco ( $R$ )

L'angolo  $\alpha$  (fig. 4.6) è utilizzato per calcolare le velocità di pre-impatto ( $v$ ), nelle componenti:

$$v_{t1} = v \cos \alpha; \quad v_{n1} = v \sin \alpha$$

che rappresentano le velocità tangenziali e normali.

La velocità che si ottiene a seguito dell'impatto, viene determinata attraverso un'equazione, definita di conservazione dell'energia totale, così espressa:

$$(4.1) \quad \left( \frac{1}{2} J \omega_1^2 + \frac{1}{2} M v_{t1}^2 \right) f(F) S F = \frac{1}{2} J \omega_2^2 + \frac{1}{2} M v_{t2}^2$$

dove:  $M$  è la massa del blocco;  $J$  è il momento di inerzia del blocco;  $\omega_1$  è la velocità angolare di pre-impatto;  $\omega_2$  è la velocità angolare di post-impatto;  $v_{t1}$  è la velocità tangenziale di pre-impatto;  $v_{t2}$  è la velocità tangenziale di post-impatto e

$$f(F) = R_1 + (1-R_1) / \left\{ \left[ \frac{(v_{t1} - \omega_1 R)}{20} \right]^2 + 1.2 \right\}$$

è detta funzione d'attrito (fig. 4.8)

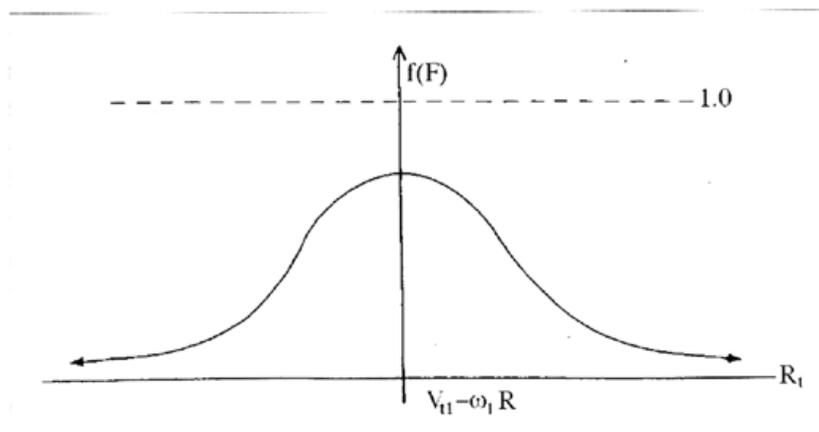


Fig. 4.8: Rappresentazione grafica della funzione dell'attrito definita come la differenza tra la velocità traslazionale e la velocità rotazionale

e 
$$SF = R_t / \{ [v_{n1} / (250R_n)]^2 + 1 \}$$

è detta funzione di scala (fig. 4.9).

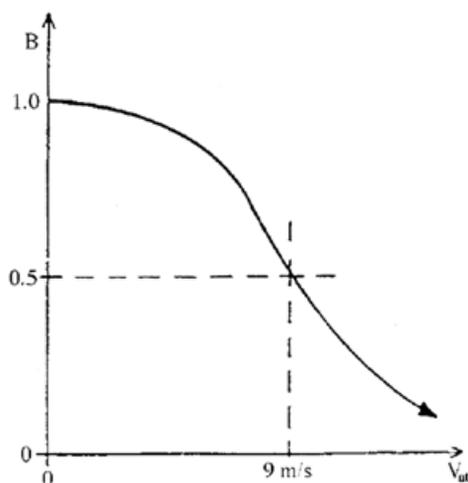


Fig. 4.9: Rappresentazione grafica della funzione di scala definita come dipendente dalla velocità normale di pre-impatto

I termini  $f(F)$  e  $SF$  sono ricavabili attraverso espressioni empiriche che vengono utilizzate per valutare l'energia cinetica dissipata nelle collisioni tra blocco e pendio a causa dell'attrito e dell'urto. L'attrito riguarda principalmente la dissipazione dell'energia prodotta dalla velocità tangenziale, l'urto quella prodotta dalla velocità normale al pendio.

Le velocità tangenziali e angolari post collisione sono messe in relazione tra loro dalla seguente equazione:

$$v_{t2} = \omega_2 R$$

che assume che i blocchi abbandonino il contatto con il pendio ruotando, indipendentemente dalla velocità angolare precedente.

L'equazione 4.1 può essere così esplicitata per  $v_{t2}$  ottenendo:

$$v_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 (J\omega_1^2 + Mv_{t1}^2) f(F) SF}{J + MR^2}}$$

mentre la velocità normale post collisione viene ricavata dalla seguente espressione empirica:

$$v_{n2} = \frac{v_{n1} R_n}{1 + \left(\frac{v_{n1}}{9}\right)^2}$$

che intende tener conto del fatto, verificato anche sperimentalmente, che il rapporto tra le velocità normali post-impatto e pre-impatto diminuisce con l'aumentare della velocità normale pre-impatto stessa.

Dopo ogni impatto il modello prevede un'iterazione al fine di ricavare il tempo trascorso tra un rimbalzo e il successivo. Noto tale tempo è quindi possibile calcolare la nuova posizione relativa al nuovo impatto.

Ogni volta che viene eseguita questa procedura il modello prevede un controllo per definire se il movimento successivo all'impatto è un movimento di rimbalzo o piuttosto di rotolamento-

scivolamento. Pertanto se la distanza percorsa tra un rimbalzo e l'altro è minore del raggio del blocco considerato nella simulazione, il movimento che viene associato al blocco è di rotolamento-scivolamento.

Il rotolamento del masso viene modellato come una serie di piccoli rimbalzi.

In conclusione il modello CRSP messo a punto da Pfeiffer e Bowen introduce, rispetto ai metodi *lumped mass*, dei parametri relativi alla dimensione e forma dei blocchi ed alla rugosità del pendio per tener conto di importanti fenomeni che avvengono durante l'impatto e che sono difficilmente modellabili se non attraverso l'utilizzo di formule empiriche validate tramite osservazioni in sito.

In particolare, i parametri relativi alla dimensione del blocco ed alla rugosità del pendio sono importanti nella modellazione dei moti simili a quelli di rotolamento, che avvengono però con perdita di contatto con il suolo, rotazione aerea e successive collisioni multiple e che dipendono quindi dalla geometria del problema.

La dimensione e la forma del blocco sono importanti per il calcolo delle velocità angolari e per quello, attraverso il momento di inerzia, dell'energia cinetica totale.

#### 4.2.4. Modelli tridimensionali

Il modello ROTOMAP, messo a punto da Scioldo (1991), considera i blocchi come puntiformi e determina i loro percorsi di caduta e rotolamento su pendii definiti da un reticolo di nodi tridimensionale.

I parametri fisici utilizzati nel modello sono i coefficienti di restituzione normale e tangenziale, il coefficiente d'attrito al "roto-scivolamento" e l'angolo limite. I coefficienti di restituzione sono definiti dai rapporti di energia post e pre-impatto; il coefficiente d'attrito di roto-scivolamento si riferisce al moto combinato di un blocco che ruota perdendo temporaneamente

contatto con il pendio e che collidendo con il suolo è soggetto a brevi fasi di rotolamento e scivolamento simultanee; l'angolo limite definisce il passaggio dalle condizioni di moto aereo a quelle di roto-scivolamento.

Poiché i parametri dipendono dalla forma e dimensione dei blocchi, dalla rugosità della superficie del pendio e dalla resistenza dei mezzi a contatto, l'utilizzo del modello richiede che essi siano "tarati" per ogni problema in esame attraverso osservazioni in sito oppure rilievo delle posizioni di arresto di massi già distaccatisi e conseguenti procedure di *back-analysis*.

Una "taratura" del modello, soprattutto quando non è possibile effettuare delle osservazioni in sito ed è necessario attingere alla bibliografia per i parametri fisici, richiede l'utilizzo di un approccio di tipo statistico.

I dati relativi alla topografia del pendio vengono inseriti in modo da creare una griglia a maglie quadrate che deve rappresentare l'intera zona compresa tra il distacco e l'arresto dei blocchi.

L'area di ognuna delle maglie del reticolo rappresenta una zona ove sono costanti l'inclinazione e la direzione del pendio ed i parametri fisici del modello.

Per questo motivo la scelta della dimensione delle maglie deve essere "grande" rispetto al volume dei blocchi e "piccola" rispetto all'area in esame. Normalmente vengono utilizzate maglie aventi un'area compresa tra 5 m<sup>2</sup> e 15 m<sup>2</sup>.

La rappresentazione della topografia del pendio richiede anche l'individuazione delle "nicchie" di distacco dei blocchi. I punti di partenza dei blocchi giacciono su linee che devono essere disposte al di sotto di tali nicchie. Il calcolo della velocità di partenza di ogni blocco viene effettuato sulla base del percorso assunto nel primo tratto effettuato lungo la parete definita dalla nicchia di distacco.

Il modello può essere utilizzato per posizionare e dimensionare opere di protezione quali reti o valli paramassi. I controlli

effettuati per tale scopo sono essenzialmente due: il primo per determinare che il masso non scavalchi l'opera, il secondo per verificare che l'energia cinetica d'impatto del masso contro l'opera di protezione sia assorbibile dall'opera stessa.

La figura 4.10 (a) riporta sulla topografia di un pendio i percorsi di più massi che sono quasi interamente intercettati da opere di protezione poste al piede. La figura 4.10 (b) riporta la variazione, lungo il percorso, dell'energia cinetica di un masso che ha superato tutte le opere di sbarramento posizionate.

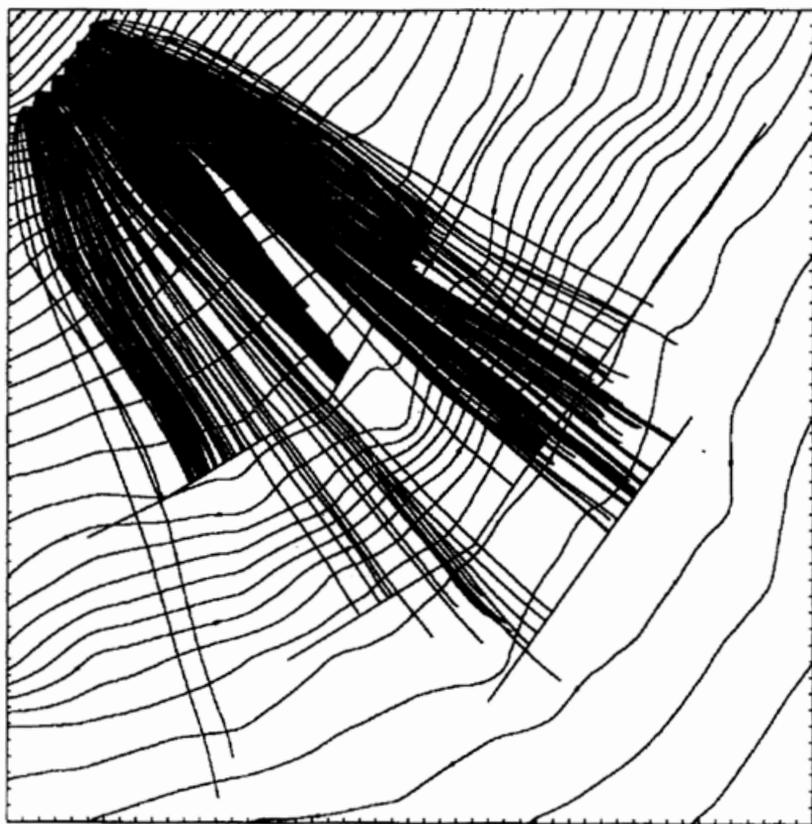


Fig. 4.10 a: Simulazione del percorso di caduta di più massi effettuata con il modello Rotomap (Scialdo, 1991)

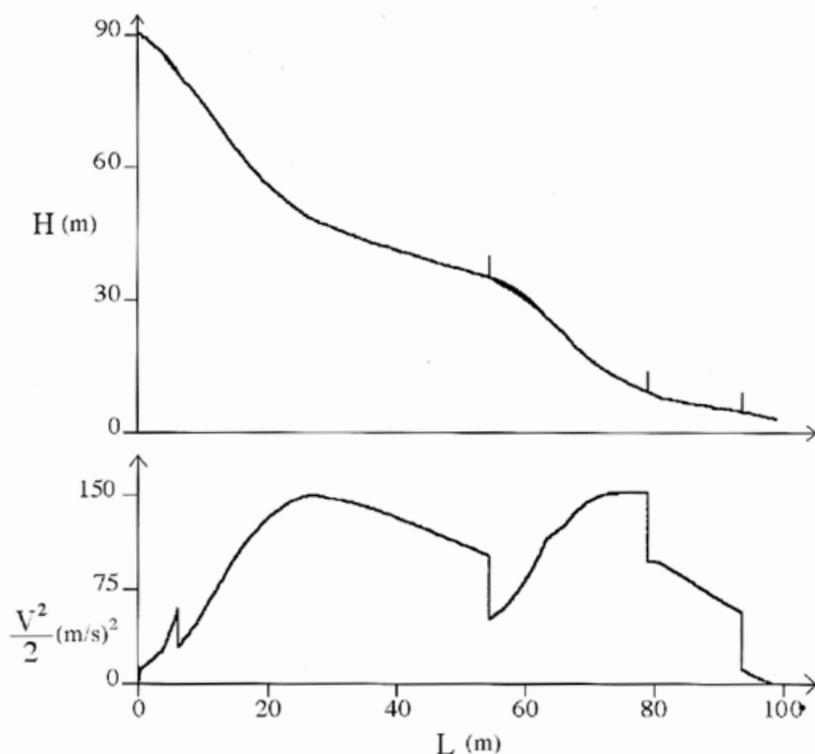


Fig. 4.10 b: Diagramma dell'energia cinetica assunta dal blocco durante il percorso di caduta

In conclusione il modello ROTOMAP, differentemente dagli altri modelli prima descritti, bene si presta all'analisi di problemi a grande scala, quando le zone di potenziale distacco di massi e quelle da proteggere sono estese in direzione laterale e la morfologia del pendio è tale da permettere delle traiettorie di caduta che si discostano sensibilmente tra loro, in funzione della variazione locale della morfologia del pendio.

Il modello ROTOMAP è, a giudizio dello scrivente, più adatto per casi in cui le opere di protezione sono costituite da rilevati piuttosto che reti paramassi.

Il rilevato paramassi è infatti un tipo di intervento che può avere l'estensione di centinaia di metri e può essere in grado di intercettare e trattenere un elevato numero di blocchi prima di dover richiedere interventi di manutenzione o essere ricostruito.

I rilevati inoltre sono in grado, se ben progettati, di assorbire notevoli energie di impatto, quali quelle che possono essere determinate da lunghi percorsi di caduta.

Per contro nel caso di progettazione di opere che hanno il carattere più puntuale, quali ad esempio le reti paramassi, gli studi sul percorso di caduta dei blocchi possono essere effettuati con modelli bidimensionali che sono più sofisticati nella descrizione del fenomeno fisico dell'impatto.

### **4.3. Metodi numerici**

#### *4.3.1. Metodo di analisi della deformazione dei mezzi discontinui*

Il metodo di analisi delle deformazioni dei mezzi discontinui (*Discontinuous Deformation Analysis*) messo a punto da Shi G.H. (1989) può essere utilizzato per svolgere analisi previsionali ed analisi a ritroso (*back-analysis*) di masse rocciose schematizzabili come sistemi di blocchi.

L'analisi a ritroso utilizza i dati di misure sperimentali che possono essere relative allo stato di sollecitazione, deformazione e agli spostamenti in un numero finito di punti nell'ammasso roccioso, per ritrovare, attraverso un processo di minimizzazione svolto con il metodo dei minimi quadrati, la configurazione geometrica globale di un sistema di blocchi conseguente alla condizione di equilibrio.

Le caratteristiche meccaniche dei blocchi e dei giunti possono essere anch'esse determinate con un processo di analisi a ritroso e utilizzate successivamente nelle analisi previsionali. La geometria deformata di un sistema di blocchi soggetto ad un si-

stema di forze è calcolato tramite la minimizzazione dell'energia complessiva del sistema.

Il metodo DDA può essere sviluppato in campo statico e campo dinamico. In campo statico le velocità di ogni blocco vengono azzerate alla fine di ogni passo di calcolo con il conseguente effetto di una deformazione lenta e di una soluzione stabile. Si tratta cioè di una soluzione statica che può essere applicata a casi in cui le velocità dei blocchi siano pressoché trascurabili. Per problemi di tipo dinamico invece, le velocità dei blocchi vengono trasmesse da un passo di calcolo a quello successivo; in altri termini la velocità di un blocco all'inizio di un passo di calcolo è uguale a quella del blocco alla fine del passo di calcolo precedente. In questo modo il DDA fornisce una reale soluzione nel tempo.

Spostamenti e deformazioni rappresentano le incognite del problema che vengono determinate tramite la soluzione di un sistema di equazioni di equilibrio lineari. Esso è formulato tramite la minimizzazione dell'energia del sistema.

Il DDA utilizza un metodo di soluzione basato sulla teoria dei grafi, che risulta altamente efficace per sistemi di equazioni sparse, in quanto memorizza e opera solamente sui valori non nulli riscontrati all'interno della matrice dei coefficienti triangolarizzata. La matrice viene inoltre riordinata allo scopo di ottenere il minimo numero di valori non nulli.

I valori risultati dalla soluzione del sistema con il metodo DDA soddisfano, in ogni punto, le equazioni di equilibrio della dinamica. Tutte le forze di contatto agenti sui blocchi sono in equilibrio con le forze di inerzia del blocco e con le sollecitazioni all'interno del blocco stesso.

Il metodo permette la modellazione di blocchi di qualunque forma nel campo delle grandi rotazioni, spostamenti e deformazioni determinate dalla somma delle piccole deformazioni, spostamenti e rotazioni rispettivamente calcolate ad ogni passo di calcolo.

La resistenza al taglio sulle discontinuità viene determinata utilizzando il criterio di Mohr-Coulomb.

Alla soluzione del sistema delle equazioni di equilibrio segue un processo di controllo per evitare fenomeni di compenetrazione o di trazione tra i blocchi. Nel caso in cui le aperture-chiusure dei blocchi non siano compatibili con le caratteristiche meccaniche delle discontinuità (resistenza a trazione e non penetrazione all'interno della matrice rocciosa) si innesca un processo iterativo fino alla definizione di una plausibile configurazione di equilibrio.

Le principali ipotesi semplificative del metodo DDA sono:

- gli spostamenti variano linearmente all'interno del blocco (sollecitazioni e deformazioni all'interno del blocco sono costanti);
- i blocchi sono considerati perfettamente elastici;
- la resistenza al taglio tra i blocchi è determinata dal criterio di Mohr-Coulomb.

#### 4.3.2. Applicazione del metodo DDA

Il DDA è stato applicato per lo studio di caduta massi (Giani, 1992; Ferrero & Giani 1994); i dati di ingresso e i risultati ottenuti con la modellazione sono stati confrontati e calibrati con l'ausilio di risultati di prove in sito (Azzoni et al., 1991) e con un metodo *lumped mass* (Fornaro et al., 1991) (figg 4.11 e 4.12).

Dal momento che il metodo DDA è in grado di considerare il volume dei blocchi e la forma che influenzano significativamente il comportamento di caduta, è possibile considerare le variazioni dei momenti rotazionali nel punto di impatto e i movimenti combinati di scivolamento-rimbalzo.

Il metodo può essere applicato anche allo studio dei fenomeni della rottura di un blocco modellando piani di discontinuità preesistenti nel blocco stesso.

In questo caso è possibile calcolare il percorso dei fram-

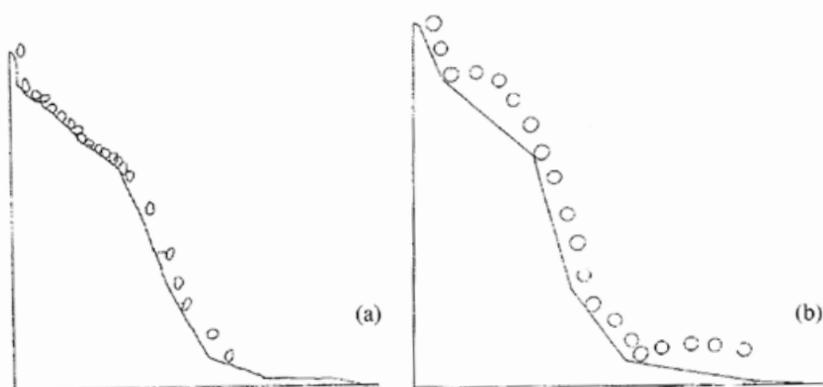


Fig. 4.11: Risultato ottenuto digitalizzando la registrazione della prova in sito (a) e quello ottenuto con la modellazione (b) (Giani, 1994)

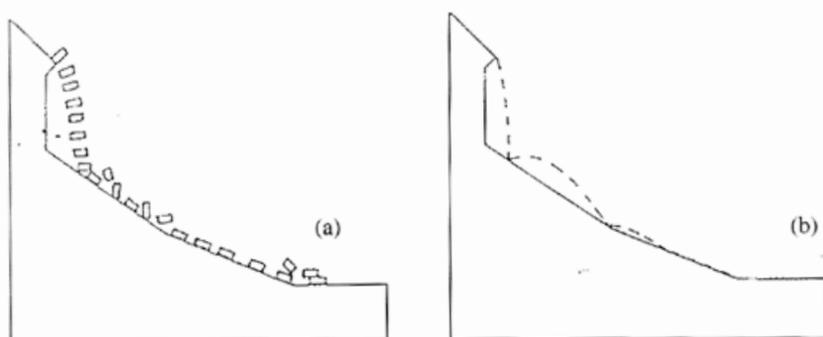


Fig. 4.12: Simulazione della caduta di un blocco parallelepipedo con il metodo DDA (a) e con il metodo *lumped mass* (b) (Giani, 1992)

menti generati da rotture prodotte dall'impatto ed evidenziare come, dipendentemente dalla forma dei frammenti ottenuti, i percorsi possano sensibilmente differenziarsi.

Blocchi di forma molto allungata richiedono, per sollevarsi, un'energia maggiore rispetto a quelli di forma più arrotondata ed è per questo che il loro percorso può essere più breve (fig. 4.13).

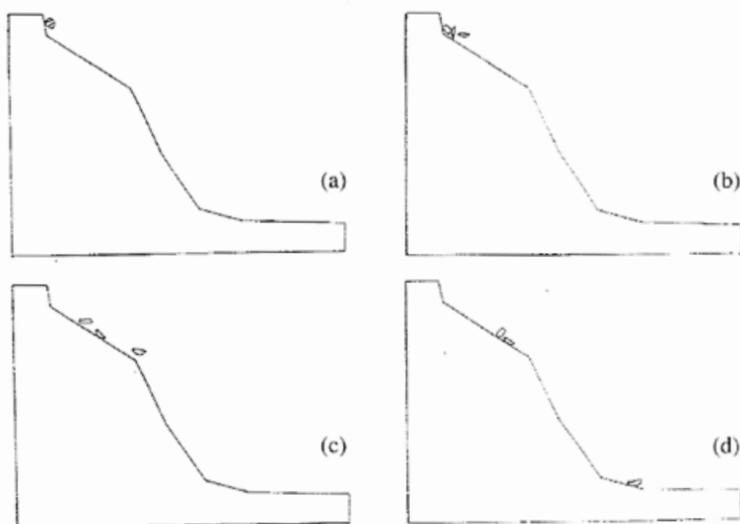


Fig.4.13: Modellazione dell'effetto dei piani di discontinuità preesistenti sulle traiettorie dei blocchi (Ferrero e Gianì, 1994)

Il metodo nella sua versione originale è stato messo a punto considerando il comportamento del blocco come elastico lineare ed il comportamento del giunto come dipendente soltanto dall'angolo di attrito.

In questo modo la perdita di energia dovuta ad un impatto è soltanto dipendente dall'attrito.

L'utilizzazione di una legge di comportamento elasto-plastica per descrivere il legame sforzi-deformazioni dei blocchi è indispensabile per delle modellazioni più realistiche.

La suddivisione del blocco in più frammenti a seguito di un impatto è attualmente possibile solo lungo piani di discontinuità preesistenti.

In conclusione il metodo DDA consente di modellare alcuni importanti fenomeni che avvengono nell'impatto blocco-pendio, che gli usuali metodi analitici previsionali del percorso di

caduta massi non sono in grado di descrivere. Per contro sia il tempo di preparazione sia il tempo di calcolo necessario per una simulazione della caduta di un blocco risultano estremamente più lunghi di quelli necessari per una corrispondente analisi effettuata con qualsiasi metodo analitico prima descritto.

I tempi di calcolo e di successiva elaborazione dei dati si allungano quindi notevolmente nel caso in cui si intendono effettuare analisi parametriche o probabilistiche.

## **5. METODI ED OPERE DI PROTEZIONE**

### **5.1. Generalità**

La funzione delle opere di protezione è quella di intercettare ed arrestare il percorso di blocchi rocciosi prima che questi possano danneggiare le strutture da difendere. In alcuni casi, come quelli delle gallerie paramassi, la funzione dell'opera è quella di permettere il "passaggio" dei massi senza causare danni alla strada protetta dalla galleria stessa.

Un'opera di difesa deve quindi essere posizionata in modo da trovarsi sul percorso dei blocchi e deve avere delle caratteristiche geometriche e meccaniche tali da assorbire l'energia cinetica e di impatto dei blocchi stessi.

Nei precedenti capitoli si sono sviluppati metodi d'analisi previsionali dei percorsi e dell'energia cinetica assunta dai blocchi. Utilizzando approcci di tipo statistico si è verificato come sia possibile ottenere, come risultato delle analisi previsionali, dei campi di variabilità delle traiettorie e delle energie.

Il progettista può quindi valutare, lungo i potenziali percorsi dei blocchi, l'entità delle energie cinetiche assunte e quindi il valore di quello che, in corrispondenza della zona di posizionamento dell'opera di protezione, diventa "l'urto di progetto".

Questa zona va quindi scelta in modo da ottimizzare, dal punto di vista tecnico ed economico, la realizzazione dell'intervento: essere quindi punto o linea di passaggio comune ai blocchi con minime energie cinetiche mobilitate. Locali modifiche morfologiche al pendio possono permettere dispersioni di energie cinetiche prima che i blocchi impattino contro l'opera di difesa. Gli altri parametri geometrici da definire per l'intercettazione dei massi sono l'altezza e la larghezza dell'opera.

Le grandezze da valutare con l'analisi previsionale per otte-

nera l'energia cinetica sono la massa e la velocità del blocco. Se il metodo di calcolo utilizzato determina anche la velocità angolare, è possibile valutare l'urto di progetto attraverso il calcolo dell'energia cinetica totale e non solo quella del punto. In questo caso diventa necessario, come già definito nel capitolo 4, determinare il momento d'inerzia del masso.

Se si attinge alla letteratura tecnica in materia si possono riscontrare (Peila, 1996; Mosca & Mele, 1996; Lazzari, Troisi & Arcuri, 1996) descrizioni di barriere in grado di assorbire energie cinetiche che vanno dalle poche unità di kJ, fino a qualche MJ. Queste energie corrispondono a quelle date dall'impatto di blocchi di volume inferiore al  $m^3$  aventi una velocità di pochi m/s fino a grossi blocchi di alcuni  $m^3$  con velocità che possono raggiungere i 30 m/s. La tipologia di queste opere varia quindi dal semplice scavo sagomato, tutt'al più rinforzato con muri in gabbioni metallici, alle reti ad alta resistenza capaci di assorbire l'energia di alcuni MJ, fino ai rilevati in terra rinforzata che vengono costruiti con lo scopo di assorbire impatti di energia ancora maggiore.

Il progettista, una volta definito l'urto d'impatto e scelta la posizione e l'area che deve coprire l'opera di difesa, deve sceglierne la tipologia e dimensionarla. Nel caso che la scelta si rivolga verso tipi di barriere già sperimentate e qualificate da case costruttrici specializzate, il progettista deve comunque verificare il dimensionamento dei singoli elementi strutturali e dell'opera stessa nel suo complesso e controllare che l'installazione avvenga correttamente.

## **5.2. Interventi sul pendio**

La realizzazione di un fronte di scavo in roccia viene di norma effettuata scegliendo un angolo di inclinazione globale tale da assicurare al pendio un adeguato coefficiente di sicurezza nei riguardi di solidi di roccia che possono essere delimitati da

discontinuità presenti nella massa e dalle superfici di scavo.

La presenza di discontinuità sub-verticali può determinare, quando l'inclinazione dei gradoni che costituiscono il pendio è anch'essa sub-verticale, dei solidi di roccia di limitato volume e di forma allungata che possono distaccarsi dalla parete per scivolamento o per ribaltamento.

I principali rimedi nei riguardi di questo tipo di fenomeni sono:

1. l'utilizzo di tecniche di abbattimento con esplosivo del tipo "smooth blasting" in modo da ridurre al minimo il danneggiamento provocato alla parete rocciosa;
2. la bullonatura della parete rocciosa che può avere un carattere più o meno sistematico a seconda della "regolarità" della distribuzione spaziale delle discontinuità presenti nella massa rocciosa;
3. il disaggio dei blocchi potenzialmente instabili;
4. l'utilizzo delle berme che costituiscono la gradonatura come aree per l'arresto dei blocchi attraverso il ricoprimento della berma con materiale sciolto in modo da assorbire l'energia di impatto e la messa in opera, sul ciglio del gradone, di un muro di protezione costituito da blocchi o gabbionate.

Le operazioni da 1 a 4 sono proprie per le pareti di scavo di opere civili, quali ad esempio l'incisione di un versante per ricavare una sede stradale, mentre le operazioni 3 e 4 sono tipiche delle cave di montagna.

Nei pendii naturali ed artificiali, interventi di protezione contro la caduta di frammenti di roccia di limitato volume, non superiore a pochi decimetri cubi, sono rappresentati dalla messa in opera di reti metalliche stese ed ancorate nel versante in modo da avvolgere le zone da cui possono staccarsi gli elementi lapidei. Sistemi di legamento con catene o cavi possono essere utilizzati per il contenimento dei grandi blocchi quando un intervento di disaggio si dimostra tecnicamente difficile e pericoloso per il controllo del percorso di caduta del materiale disgiato.

### 5.3. Sistemi costituiti da fossato di raccolta e rete di protezione

L'intervento è costituito dallo scavo di un fosso rinforzato e ringrossato sulla parete di valle e dalla messa in opera di una rete di protezione a valle del sistema stesso. Il sistema è stato prevalentemente studiato per raccogliere blocchi che si staccano da pendii sub-verticali in roccia di altezza massima di 40 m (Ritchie, 1963).

Lo scavo del fossato costituisce una modifica alla morfologia del versante e determina un cambio del tipo di movimento del blocco, che passa dal moto di rotolamento a quello di caduta libera. In questo modo l'impatto del blocco sul suolo avviene con una componente di velocità normale superiore a quella tangenziale (fig. 5.1).

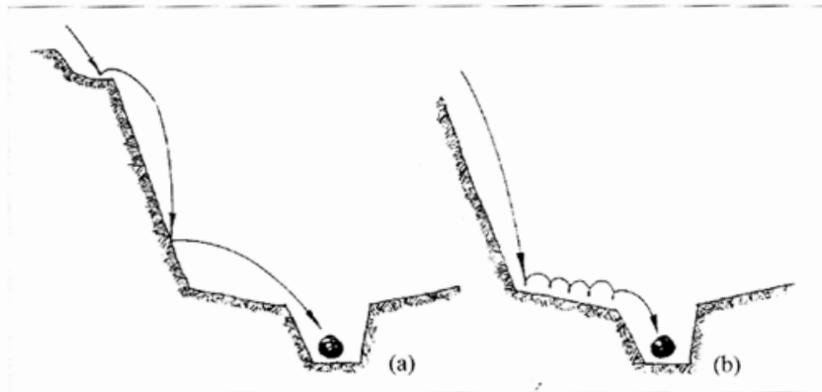


Fig. 5.1: Fosso scavato per arrestare i blocchi dopo una fase di rimbalzo (a) o di rotolamento (b) (Giani, 1992)

Poiché, come discusso nei precedenti capitoli, il coefficiente di restituzione normale è generalmente inferiore a quello tangenziale, la presenza di un fosso determina un maggior assorbimento di energia. Per incrementare ulteriormente l'energia assorbita dall'impatto è utile ricoprire il fondo del fossato con uno strato di pochi cm (20-30) di materiale sciolto. Tale strato limita la possibilità che il blocco rimbalzi e sia soggetto a fenomeni di rottura con esplosione di frammenti. La parete di valle del fossato viene rinforzata e ringrossata. Il rinforzo può essere effettuato con gabbioni me-

tallici o altri tipi di strutture deformabili che, differientemente da strutture in calcestruzzo, possono essere ripristinate con maggior rapidità ed economicità. Il ringrosso ha lo scopo di evitare la risalita dei blocchi. Esso può essere costituito da un rilevato rinforzato da geogriglie sul paramento che si affaccia sul fossato. La rete di protezione che viene installata sulla sommità del rilevato ha principalmente la funzione di intercettare eventuali frammenti determinati dalla rottura con esplosione dei blocchi nell'impatto sul suolo.

I principali parametri da definire sono la profondità dello scavo e la sua larghezza. Studi a prevalente carattere sperimentale (Ritchie, 1963; Fookes & Sweeney, 1976; Whiteside, 1986; Mak & Blomfield, 1986) hanno portato alla definizione di un abaco che permette di determinare la larghezza e la profondità del fosso, nota l'altezza del pendio e la sua inclinazione (*fig. 5.2*).

#### **5.4. Barriere paramassi**

Diverse sono le tipologie strutturali di reti paramassi di recente immesse sul mercato. Differientemente dai rilevati o da altri tipi di barriere costituite da strutture in calcestruzzo o metalliche, per le quali non si hanno significativi dati sperimentali o di calcolo, per le reti metalliche le case costruttrici forniscono le energie cinetiche di assorbimento. Le esperienze delle Ferrovie dello Stato (Mosca & Mele, 1996) hanno portato alla suddivisione di tali barriere in cinque classi, a seconda delle loro tipologie e capacità di assorbimento.

Le classi definite hanno le seguenti capacità di assorbimento di energia cinetica ( $E_c$ ):

- classe 1;  $E_c < 10$  kJ
- classe 2;  $10 < E_c < 15$  kJ
- classe 3;  $15 < E_c < 50$  kJ
- classe 4;  $50 < E_c < 150$  kJ
- classe 5;  $150 < E_c < 200$  kJ

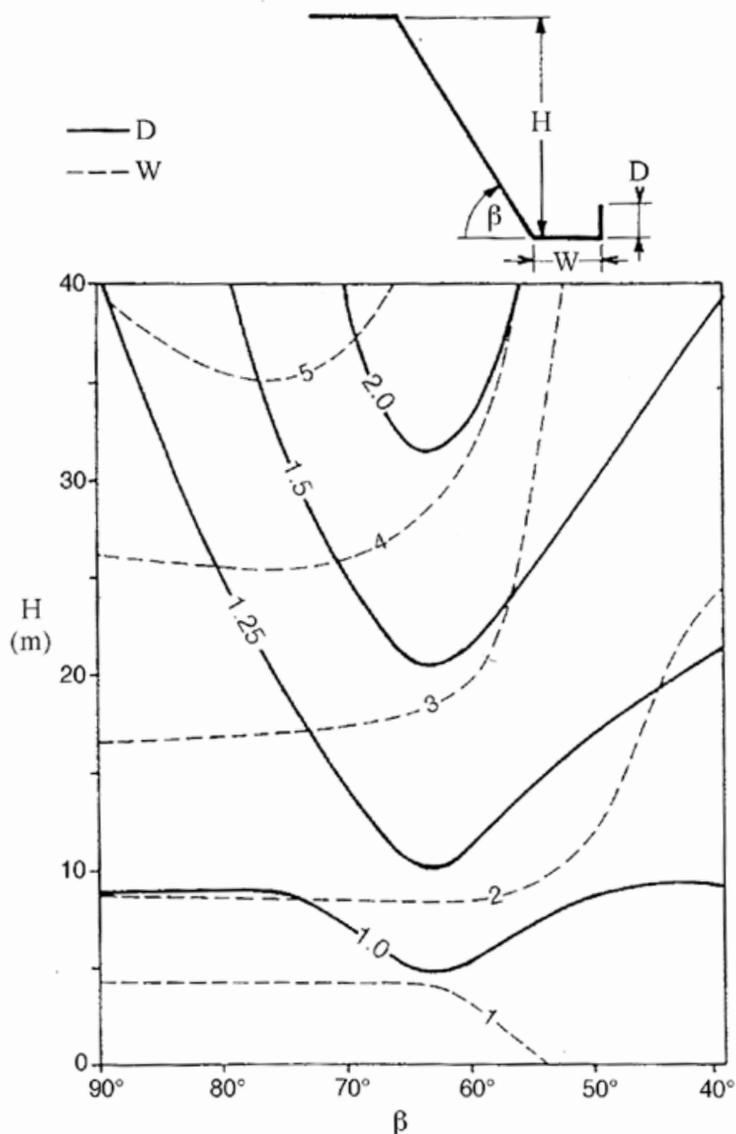


Fig. 5.2: Abaco per il dimensionamento di un fossato; in alto le caratteristiche geometriche del problema, in centro i diagrammi forniti da Whiteside (1986), sulla base dei risultati di Fookes & Sweeny (1976), ottenuti elaborando i dati sperimentali di Ritchie (1963)

La barriera di classe 1 può essere rigida ( $E_c \cong 4$  kJ) o elastica incastrata al piede ( $E_c < 10$  kJ). La barriera di classe 2 è elastica, incastrata al piede e tirantata a monte. La barriera di classe 3 è elastica a geometria fissa con montanti incernierati al piede e tirantati, con dissipatori a deformazione plastica. La barriera di classe 4 è elastica a geometria variabile, con montanti incernierati al piede e tirantati, con dissipatori a deformazione plastica e ad attrito. La barriera di classe 5 è elastica, a geometria variabile, con montanti incernierati al piede e tirantati, con dissipatori a deformazione plastica e ad attrito, con pannelli indipendenti e funi scorrevoli che li vincolano ai quattro estremi.

Le case costruttrici realizzano delle barriere qualificandole con energie di assorbimento maggiori di quelle date dalla classificazione appena esposta.

Una casa costruttrice in particolare ha messo a punto una classificazione delle barriere paramassi prodotte. Si tratta di 4 classi con dissipazione di energia all'impatto che vanno dai 500 kJ fino ai 2000 kJ, con intervallo di 500 kJ. Per ogni classe è definita l'altezza di intercettazione che va da 3 m fino a 4.5 m.

Le barriere di prima e seconda classe sono verticali, quelle di terza e quarta classe sono a sacco.

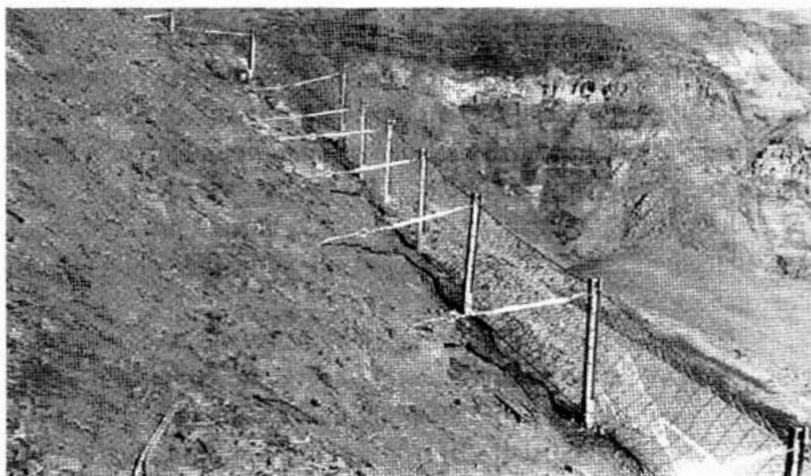
La normativa francese infine (CETE, 1994) classifica le barriere sulla base delle caratteristiche geometriche e di assorbimento dello schermo e del tipo di impatto. Le classi definite sono 9. La capacità nominale di assorbimento di energia va dai 12.5 kJ fino ai 5000 kJ. L'altezza minima utile va da 1.55 m a 5 m, con una zona di franco superiore e laterale che va da 0.4 m a 1 m. La lunghezza massima del singolo pannello va da 10 m a 20 m.

Il peso del blocco va da 0.25 t, per la prima classe, fino a 10 t per la nona classe, con corrispondenti velocità traslazionali da 10 m/s a 31.7 m/s. Considerando i blocchi come sfere equivalenti i diametri considerati vanno da 0.58 m fino a 1.97 m.

Esperienze effettuate con prove in vera grandezza su barriere paramassi a rete condotte in un campo prove appositamente

progettato e costruito (Peila, Pelizza & Sassudelli, 1995) hanno permesso di determinare che tali strutture possono raggiungere capacità di assorbimento che superano i 2000 kJ.

Le barriere studiate hanno tipologia verticale (*fig. 5.3*) e a sacco (*fig. 5.4*).



*Fig. 5.3:* Esempio di barriera verticale (Fotografia Tubosider)

Sulla base delle misure effettuate durante le prove, Peila (1996) ha messo a punto un metodo per la verifica strutturale delle barriere.

Il metodo presuppone l'adozione del concetto di "urto di progetto", sulla base del quale viene espressa la forza massima agente e la deformata corrispondente ed effettua quindi un'analisi statica per la quantizzazione delle forze che si ripartiscono sui vari elementi strutturali.

L'urto di progetto è definito sulla base delle seguenti assunzioni semplificative:

- la direzione di impatto del blocco è ortogonale alla barriera;
- l'azione della gravità, durante la fase d'impatto, non è considerata e il blocco non ha moto rotatorio;
- la deformata (*d*) di calcolo per la valutazione della forza massi-

ma e della geometria corrispondente è quella misurata, in direzione ortogonale alla barriera, nelle prove in sito;

- la forza di calcolo è pari a 2,5 volte la forza media teorica:

$$F_{\text{media}} = \left[ \frac{1}{2} m v_i^2 / d \right]; \quad F_{\text{max}} = 2,5 F_{\text{media}}$$

- la barriera è considerata composta da tre campate.



Fig. 5.4: Esempio di barriera a sacco (Fotografia Tubosider)

L'analisi statica permette di determinare per la barriera verticale (fig. 5.5) le forze agenti sulle funi e sulle fondazioni del controvento di monte e laterali, sui montanti, sui tiranti di fondazione dei montanti corrispondenti al pannello di rete ove si verifi-

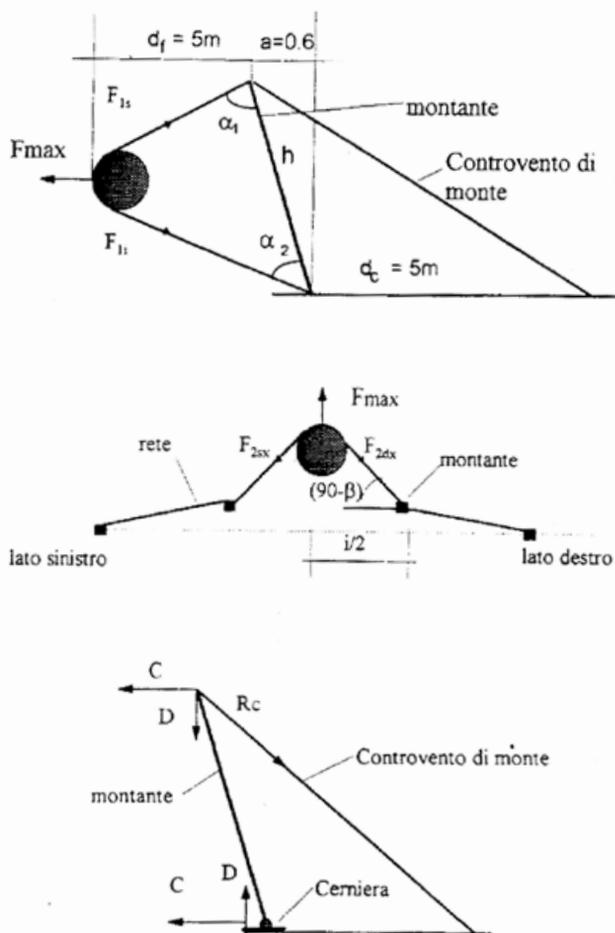


Fig. 5.5: Schema adottato per il calcolo delle barriere verticali: in alto sezione trasversale, in centro pianta, in basso forze agenti sul controvento maggiormente sollecitato (Peila, 1996)

ca l'impatto, per le barriere a sacco (fig. 5.6) la forza trasmessa dalle funi all'ancoraggio di valle, ai controventi laterali, di monte e di valle, e le forze agenti sulle funi di controvento di valle e di monte e di verificare il buon accordo tra calcoli e misure sperimentali.

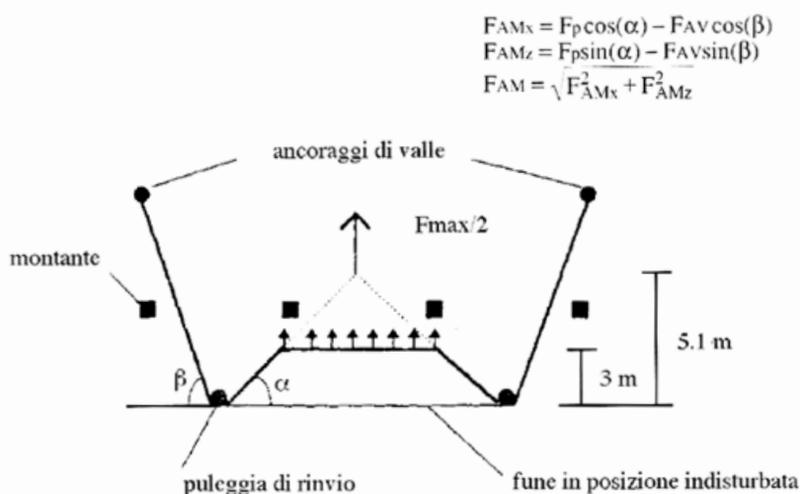


Fig. 5.6: Schema adottato per il calcolo delle funi di base delle barriere a sacco (Peila, 1996)

### 5.5. Rilevati paramassi in terra rinforzata

Rilevati paramassi in terra rinforzata vengono messi in opera a protezione di strutture ed infrastrutture di notevole estensione. Lo sviluppo longitudinale dell'opera può superare il centinaio di metri con altezza di 6÷8 m e larghezze di 10÷12 m alla base e 4÷5 m in sommità. La tipologia dell'opera è riportata nella figura 5.7 (Lazzari, Troisi & Arcuri, 1996).

Il vantaggio di questo tipo di opera, rispetto a quelle costituite da barriere a rete è data dalla più facile manutenzione e dal miglior impatto ambientale.



*Fig. 5.7: Sezione tipo di rilevato paramassi in terra rinforzata (Lazzari, Troisi & Arcuri, 1996)*

La capacità di assorbimento di energia cinetica di questo tipo di opera dovrebbe essere maggiore di quella delle reti ad alta resistenza superando i 3000 kJ.

Dati relativi a prove in vera grandezza per determinare la penetrazione e l'energia di sfondamento di massi con diversa velocità di impatto sono, a conoscenza dello scrivente, praticamente assenti, così come, a parte i lavori di Paronuzzi (1989) e di Paronuzzi & Coccolo (1994), dei procedimenti codificati per il calcolo del rilevato nei confronti dello sfondamento.

### **5.6. Gallerie artificiali**

Gallerie artificiali vengono realizzate a protezione di sedi stradali quando, per le condizioni morfologiche del versante, risulta difficile se non impraticabile adottare soluzioni quali quelle delle

barriere o dei fossati con rilevato rinforzato a valle. L'opera deve essere realizzata in modo da permettere il passaggio dei massi senza danneggiamenti strutturali.

Un procedimento per il dimensionamento di queste gallerie o anche di più semplici sistemi di copertura a mensola è stato previsto da Kirsten (1982). Più recenti ricerche (Montani, Descoedres & Egger, 1996; Montani & Descoedres, 1996) sono in corso di svolgimento, per l'elaborazione di metodi di calcolo delle sollecitazioni di piastre in cemento armato ricoperte da uno strato di materiale sciolto assorbente e soggette all'impatto provocato dalla caduta di blocchi.

I parametri più importanti considerati sono:

- la dimensione e la forma dei blocchi, la loro velocità di caduta e l'angolo di impatto;
- lo spessore dello strato di materiale assorbente, la natura di tale materiale, la granulometria, la densità relativa, l'angolo di resistenza al taglio e l'umidità;
- la tipologia e le condizioni di vincolo della struttura, la rigidità e la resistenza, la frequenza propria, l'inclinazione del tetto della galleria, le caratteristiche dei tiranti d'ancoraggio e delle fondazioni.

Differenti tipi di prove d'impatto con traiettorie variabili sono state condotte dagli Autori di questa ricerca presso il laboratorio di Meccanica delle rocce del Politecnico di Losanna. Nelle prove una piastra in calcestruzzo armato, appoggiata in corrispondenza dei quattro estremi, delle dimensioni areali di  $3.40 \times 3.40 \text{ m}^2$  e dello spessore di 0.20 m ricoperta da uno strato di materiale sciolto dallo spessore variabile tra i 35 cm e 1 m è stata sottoposta all'impatto di blocchi di peso variabile tra i 100 ed i 1000 kg, con un'altezza di caduta di 10 m. Durante le prove sono state misurate nel tempo l'accelerazione, la velocità e la penetrazione del blocco impattante, la pressione e gli spostamenti della piastra e la reazione sugli appoggi.

Un modello numerico, monodimensionale, è stato infine messo a punto ed affinato con buoni risultati all'interpretazione della prova con lo scopo di mettere a punto un modello di simulazione previsionale.

*Nella stesura di questo testo mi sono avvalso della collaborazione di alcune persone che è necessario che ringrazi: l'Ing. Roberto Alivernini, per la ricerca bibliografica svolta nella sua tesi di laurea e per le formulazioni analitiche riportate nel secondo capitolo; l'Ing. Chiara Deangeli, per gli utili suggerimenti e consigli; il Signor Franco Montanari, per aver curato la videoscrittura e le figure del testo.*

### *Riferimenti bibliografici*

- ALIVERNINI R. (1995)  
*Studi teorici e sperimentali per la previsione del moto di caduta massi e per il dimensionamento di opere di protezione.* Tesi di laurea in Ingegneria civile, Università di Parma
- AZIMI C., DESVARREUX P., GIRAUD A. & MARTIN COCHER J. (1982)  
*Méthodes de calcul de la dynamique des chutes de blocs. Application à l'étude du versant de la montagne de la Pale (Vercors).* Bulletin de liaison des L.P.C., 122, pp. 93-102.
- AZZONI A. (1993)  
*Methods for predicting rockfall.* M. Sc. dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Department of Engineering Geology, London.
- AZZONI A. & DE FREITAS M.H. (1995)  
*Prediction of rockfall trajectories with the aid of in situ test.* Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 28 (2), pp. 111-124.
- AZZONI A., LA BARBERA G. & MAZZÀ G. (1991)  
*Studio con modello fisico e matematico di fenomeni di caduta massi.* Bollettino Associazione Mineraria Subalpina, vol. XXVIII, Torino.
- AZZONI A., LA BARBERA G. & ZANINETTI A. (1995)  
*Analisis and prediction of rockfalls using a mathematical model.* Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 32, n° 7, pp. 709-724.
- AZZONI A., GIANI G.P., ROSSI P.P. & ZANINETTI A. (1991)  
*Stima dei parametri caratteristici del moto di caduta blocchi.* Incontro di studio su "La meccanica delle rocce a piccola profondità", Ass. Mineraria Subalpina, Torino, pp. 17-24.
- AZZONI A., DRIGO E., GIANI G.P., ROSSI P.P. & ZANINETTI A. (1992)  
*In situ observation of rockfall analisis.* 6th Int. Symp. on Landslides, Christchurch (NZ), Balkema, pp. 307-304.

- AZZONI A., DRIGO E., GIANI G.P., ROSSI P.P. & ZANINETTI A. (1994)  
*Sperimentazione in sito di cadute massi e criteri di elaborazione delle immagini per la determinazione dei parametri caratteristici del moto* - IV Convegno Int. di Geoingegneria "Difesa e Valorizzazione del Suolo e degli Acquiferi", Ass. Mineraria Subalpina, Torino, vol. 1, pp. 9-16.
- AZZONI A., LA BARBERA G., ROSSI P.P. & ZANINETTI A. (1996)  
*Fenomeni di caduta massi: sperimentazione in sito e back analysis con il modello matematico CADMA* - Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 37-44.
- BARBIERI G., GIANI G.P., URAS G., VERNIER A. (1988)  
*Modellizzazione della frana di crollo di Monte Oili in agro di Baunei (Nuoro)* - Atti della Riunione Plenaria della Unità Operative del CNR (Gruppo di Difesa Catastrofi Idrogeologiche), 20/XII, Roma.
- BARBIERI G., GIANI G.P., URAS G., VERNIER A. (1991)  
*Confronto tra dati sperimentali e modelli matematici per la previsione dei percorsi in frane da crollo* - Incontro di studio su "La meccanica delle rocce a piccola profondità", Ass. Mineraria Subalpina, pp. 33-40.
- BARLA G. & JARRE P. (1988)  
*Progettazione geotecnica degli interventi* - II Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce (MIR), Politecnico di Torino, pp. 13.1-13.32.
- BERCHTEN J., ANATRA S. & ACKERMANN T. (1988)  
*Protection measures against rockfall* - Proceedings of the 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, pp. 1103-1105.
- BOZZOLO D., PAMINI R. (1982)  
*Modello matematico per lo studio delle cadute massi* - Laboratorio di Fisica Terrestre, ICTS, Lugano, pp. 1-80.
- BOZZOLO D. & PAMINI R. (1986)  
*Simulation of Rock Falls down a Valley Site* - Acta Mechanica 63, pp. 113-130.

- BOZZOLO D., PAMINI R. & HUTTER K. (1988)  
*Rockfall Analysis - A mathematical model and its test with field data.* Proceedings of the 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, pp. 550-560.
- BRAY J.W. & GOODMAN R.E. (1981)  
*The theory of base friction models.* Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr., pp. 453-468.
- BROILI L. (1973)  
*In Situ Tests for the Study of Rockfall.* Geologia Applicata e Idrogeologia, VIII (1).
- BROILI L. (1976)  
*Relations Between Scree Slopes Morphometry and Dynamics of Accumulation Process.* Meeting on rockfall dynamics and protective works effectiveness, ISMES, Bergamo.
- BROILI L. (1979)  
*La progettazione delle strutture paramassi nella programmazione dell'utilizzo del territorio.* Rassegna Tecnica del Friuli-Venezia Giulia, n°2.
- CATTANEO C. (1973)  
*Lezioni di Meccanica Razionale.* Università di Pisa.
- CETE (1994)  
*Norme française P 95-308.* Centre d'études techniques de l'équipement de Lyon.
- CHAN Y.C., CHAN C.F. & AU W.C. (1986)  
*Design of boulder fence in Hong Kong.* Conference on Rock Engineering in an Urban Environment, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, pp. 87-96.
- CUNDALL P.A. (1971)  
*A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky system.* Proc. Int. Symp. on Rock Fracture, Nancy, Paper 2-8.
- CUNDALL P.A. & HART R.D. (1985)  
*Development of generalized 2-D and 3-D distinct element programs for modelling jointed rocks.* Misc. Paper SL-85-I.

- U.S. Army Corp of Engineers, Itasca Consulting Group.
- DE COL R. & COCCO S. (1996)  
*Motivazioni tecniche ed economiche per la standardizzazione delle prove sulle opere paramassi nella Provincia Autonoma di Trento.* Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 65-72.
- DESCOEUDRES F. & ZIMMERMANN T.H. (1988)  
*Méthod confortatives en versant contre le glissement, le fauchages ou le chutes des blocs.* Proceedings of the 5th Symposium on Landslides, Lausanne, pp. 821-828.
- DESCOEUDRES F. & ZIMMERMANN T.H. (1987)  
*Three dimensional dynamics calculation of rockfalls.* 5th Congr. Int. on Rock Mechanics, Montreal, pp. 337-342.
- DUBIN B.I., WATKINS A.T. & CHANG D.C.H. (1986)  
*Stabilization of existing rock faces in urban areas of Hong Kong.* Conference on Rock Engineering in an Urban Environment, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, pp. 155-171.
- DUFFY J.D. (1992)  
*Field tests of flexible Rockfall barriers.* Brugg Technical note.
- DUFFY J.D. (1996)  
*Field tests and evaluation of hi-tech low energy chain link Rockfall fence.* Report n°CA/05-96-01, Caltrans.
- DUFFY J.D. & WADE HOON (1996)  
*Field tests and evaluation of hi-tech 50 and 70 Foot-ton Rockfall fence.* Report n°CA/05-96-02, Caltrans.
- FALCETTA J.L. (1985)  
*Un nouveau modèle de calcul de trajectoires des blocs rocheaux.* Revue Française de Géotechnique, 30, 1, pp. 11-17.
- FERRERO A.M. & GIANI G.P. (1994)  
*L'applicazione del metodo di analisi delle deformazioni dei mezzi discontinui alla previsione del moto di caduta di massi in frane da crollo.* IV Convegno internazionale di geoingegneria:

- “Difesa e valorizzazione del suolo e degli acquiferi”, Ass. Mineraria Subalpina, Torino.
- FOOKES P.G. & SWEENEY M. (1976)  
*Stabilization and control of local rockfall and degrading rock slope*. Quarterly Journal of Engineering Geology, vol. 9, n°1, pp. 37-55.
- FORNARO M., PEILA D. & NEBBIA M. (1990)  
*Block fall on rock slope: Application of a numerical simulation program to some real cases*. Proc. 6th Int. Congress IAEG, Amsterdam, pp. 2173-2180.
- GIANI G.P. (1988)  
*Analisi di Stabilità dei Pendii, parte I: Classificazione dei fenomeni di instabilità, pendii naturali e fronti di scavo in roccia*. Associazione Mineraria Subalpina, Torino, pp. 1-264.
- GIANI G.P. (1992)  
*Rock Slope Stability Analysis*. Balkema, Rotterdam, pp. 1-361.
- GIANI G.P. (1992)  
*Potenzialità dei metodi di analisi nella previsione del moto di caduta massi lungo il versante*. IV Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce, MIR, Politecnico di Torino, pp. 11.1-11.12.
- GIANI G.P. (1993)  
*New Insight into the study of rockfall*. Proc. of Int. Scientific Conference, Europrotec, CISM, Udine.
- GIANI G.P. (1995)  
*Motion of rockfall*. Int. Congr. on “Prediction of Rapid Landslide Motion”, University of Kyoto.
- GIANI G.P., ALIVERNINI R., DEANGELI C. & FERRERO A.M. (1996)  
*Aspetti progettuali generali del problema della caduta massi*. Giornata di studio su “La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi”, Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 5-13.
- HABIB P. (1976)  
*Notes sur le rebondissement des blocs rocheaux*. Meeting on rockfall

- dynamics and protective works effectiveness, ISMES, Bergamo.
- HACAR B., BOLLO F. & HACAR R. (1977)  
*Bodies falling down on different slopes. Dynamic study. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Tokyo, pp. 91-95.*
- HOEK E. (1987)  
*Rockfall - A program in BASIC for the analysis of rockfalls from slope. Unpublished notes, Golder Associates/University of Toronto.*
- HUNGR O. & EVANS S.G. (1988)  
*Notes on dynamic analysis of flowslides. Proceedings of the 5th Int Symp.on Landslides, Lausanne, pp. 685-690.*
- ISRM COMMISSION FOR STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TEST (1978)  
*Suggested method for quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15, pp. 319-368.*
- KIRSTEN H. (1982)  
*Design and construction of the Kow'y's Pass rockfall shelter. Trans S.Afr. Instn. Civ. Engrs., 24, pp. 477-492.*
- KIRSTEN H.A.D., STEFFEN O.K.H. & STACEY T.R. (1986)  
*Discussion on rockfall protection measures. Conference on Rock Engineering in an Urban Environment, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, pp. 492-495.*
- LABIOUSE V., DESCOEUDRES F. & MONTANI S. (1995)  
*Numerical analysis of rock blocks impacting a soil cushion. Numog V, pp. 645-650.*
- LAZZARI A., TROISI C. & ARCURI G. (1996)  
*Protezione di nuclei abitati contro la caduta di massi mediante rilevati in terra rinforzata: esperienze della Regione Piemonte. Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 85-94.*
- MAK N. & BLOMFIELD D. (1986)  
*Rock trap design for presplit rock. Conference on Rock*

Engineering in an Urban Environment, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, pp. 263-270.

MONTANI S., DESCOEUDRES F. & EGGER P. (1996)

*Impact de blocs rocheux sur galerie des protection.* Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 55-63.

MOSCA L. & MELE R. (1996)

*Esperienze delle Ferrovie dello Stato.* Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 75-83.

NICHOL M.R. & WATTERS R.J. (1983)

*Comparison and effectiveness of rockfall mitigation technique applied by States in the USA and Canada.* Proceedings 20th Annual Engineering Geology and Soil Engineering Symposium, Boise, Idaho, pp. 123-142.

PAIOLA A. (1978)

*Movimenti Franosi in Friuli, Comportamento dei Corpi che cadono su un Pendio e Calcolo del Limite di Espandimento Potenziale.* Rivista Tecnica Italiana 6.

PARONUZZI P. (1989)

*Criteri di progettazione dei rilevati paramassi.* Geologia Tecnica, 1/89, pp. 23-41.

PARONUZZI P. & COCCOLO A. (1994)

*Impatto di blocchi contro barriere paramassi sui versanti naturali (Friuli).* Geologia Tecnica & Ambientale, 4/94, pp. 15-29.

PARONUZZI P. & COCCOLO A. (1995)

*Crollo di progetto e affidabilità delle barriere paramassi.* GEAM, n° 2-3, pp. 147-154.

PECKOVER F.L. & KERR J.W.G. (1977)

*Treatment and maintenance of rock slope on transportation routes.* Canadian geotechnical Journal, vol. n°14, n°4, pp. 487-507.

- PEILA D. (1996)  
*Uso di prove in vera grandezza per il dimensionamento di barriere paramassi. Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 45-54.*
- PEILA D. & BIOLATTI G. (1988)  
*Interventi di rimodellazione e stabilizzazione del detrito di falda in relazione al controllo della caduta blocchi - Analisi cinematiche e dinamiche al fine della sicurezza - Atti del Convegno Nazionale "Attività Estrattiva Pianificazione delle Risorse e Salvaguardia dell'Ambiente", Piancavallo.*
- PEILA D., PELIZZA S. & SASSUDELLI F. (1995)  
*Prove in scala reale su barriere paramassi deformabili a rete. GEAM, n° 2-3, pp. 155-165.*
- PEILA D., PELIZZA S. & SASSUDELLI F. (1996)  
*Risultati di un campo prove su barriere paramassi deformabili. Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 37-44.*
- PFEIFFER T. & BOWEN T (1989)  
*Computer Simulation of Rockfalls - Association of Engineering Geologist Bulletin, vol XXVI, n° 1, pp. 135-146.*
- PFEIFFER T. & BOWEN T (1989)  
*Colorado Rockfall Simulation Program. Colorado School of Mines - U.S. Departement of Transportation Federal Highway Administration, Final Report.*
- PFEIFFER T. & HIGGINS J. (1991)  
*Rockfall hazard analisys using the Colorado Rockfall Simulation Program. Trasportation Research Record 1288, pp. 117-126.*
- PITEAU D.R. & CLAYTON R. (1976)  
*Description of the slope model computer rockfall program for determining rockfall distribution. D.R. Piteau and Associates.*
- PITEAU D.R. & CLAYTON R. (1977)  
*Discussion of paper 'Computerized design of rock slope using*

*interactive graphics for the input and output of geometrical data* - by P.A. Cundall, M.D. Voegelé, and C. Fairhurst, in *Design methods in rocks mechanics*, Proc., 16th symposium on rock mechanics, Univ. of Minnesota, Minneapolis, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 62-63.

PITEAU D.R. & PECKOVER F.L. (1978)

*Rock Slope Engineering*. In Schuster R.L. and Krizek R. J. (editors), "Landslide analysis and control", Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, DC, pp.192-228.

RICHARDS L.R. (1986)

*Rapporteur's comments on 'Rockfall protection methods'*. Conference on Rock Engineering in an Urban Environment, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, p. 489.

RICHARDS L.R. (1988)

*Rockfall Protection: A review of current analytical and design methods*. II Ciclo di Conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce (MIR), Politecnico di Torino, pp. 11.1-11.13.

RITCHIE A.M. (1963)

*Evaluation of rockfall and its control*. Highway Research Record, 17, pp. 13-28.

ROCHET L. (1987)

*Developement of numerical model for the analysis of propagation of rock falls*. Proc 6th International Conference on Rock Mechanics, Montreal, vol n°1, pp. 479-484.

ROCHET L. (1979)

*Protection against rock falls by means of metal netting*. Bull. Liaison Lab Ponts Chaussees, n°101, pp. 21-28.

SAGASETA C. (1986)

*On the modes of instability of a rigid block on an inclined plane*. Rock Mechanics and Rock Engineering, pp. 261-266.

SCAVIA C., BARLA G. & VAI L. (1988)

*Analisi di tipo probabilistico*. II Ciclo di Conferenze di Mecca-

- nica ed Ingegneria delle Rocce (MIR), Politecnico di Torino, pp. 12.1-12.27.
- SCIOLDO G. (1991)  
*La statistica Robust nella simulazione del rotolamento massi.*  
 Incontro di studio su "La meccanica delle rocce a piccola profondità", Ass. Mineraria Subalpina, Torino, pp. 319-323.
- SCIOLDO G. (1991)  
*Rotomap: analisi statistica del rotolamento dei massi.* Guida informatica ambientale, Pàtron, Milano, pp. 81-84.
- SHI G.H. & GOODMAN R.E. (1985)  
*Two dimensional Discontinuous Deformation Analysis - Int. J. Anal. Methods Geomech.*, 9, pp. 541-556.
- SHI G.H. (1989)  
*Block Sistem Modeling by Discontinuous Deformation Analysis.* Department of Civil Engineering University of California, Berkeley.
- SMITH D.D. & DUFFY J.D. (1990)  
*Field tests and evaluation of rockfall restraining nets.* N°CA/TL-90/05, Final Report, Caltran.
- SPANG R.M. & RAUTENSTRAUCH R.W. (1988)  
*Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical application.* Proceeding of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, pp. 1237-1243.
- SPANG R.M. (1987)  
*Protection against rock fall - Stepchild in the design of rock slope.* Proc 6th International Conference on Rock Mechanics, Montreal vol n°1, pp. 551-557.
- STATHAM I. (1979)  
*A Simple Dynamic Model of Rockfall: Some Theoretical Principles and Model and Field Experiment.*, Int. Colloquium on Physical Geomechanical Models, Bergamo.
- STATHAM I. (1979)  
*Scree slope development under condition of surface particle*

*movement*. Trans. Inst. British Geogr., 59, London, pp. 41-53.

URCTUOLI G. (1996)

*Analisi cinematica di crolli per la progettazione di barriere paramassi*. Giornata di studio su "La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi", Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 29-36.

WITHESSIDE P.G.D. (1986)

*Discussion on rockfall protection measures*. Conference on Rock Engineering and Excavation in an Urban Environment, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, pp. 490-498.



## *Indice*

### **1. CONCETTI GENERALI**

<i>1.1. Introduzione</i>	p. 7
<i>1.2. Osservazione del fenomeno</i>	p. 7
<i>1.3. Prove in sito</i>	p. 8
<i>1.4. Modelli previsionali</i>	p. 11
<i>1.5. Opere di difesa</i>	p. 12

### **2. ANALISI DEL MOVIMENTO DI CADUTA DI MASSI**

<i>2.1. Introduzione</i>	p. 15
<i>2.2. Distacco e condizione di incipienza di caduta</i>	p. 15
<i>2.3. Analisi di scivolamento e di ribaltamento di un blocco</i>	p. 24
<i>2.4. Caduta libera</i>	p. 32
<i>2.5. Rimbalzo</i>	p. 35
<i>2.6. Effetti di forma del blocco</i>	p. 39
<i>2.7. Effetti di dimensione del blocco</i>	p. 41
<i>2.8. Rottura del blocco</i>	p. 42
<i>2.9. Rotolamento e scivolamento</i>	p. 44

### **3. PROVE IN SITO**

<i>3.1. Introduzione</i>	p. 47
<i>3.2. Prove di caduta di massi lungo versante</i>	p. 48
<i>3.2.1. Scopi delle prove</i>	p. 48
<i>3.2.2. Tecniche di prova</i>	p. 49
<i>3.2.3. Parametri del moto</i>	p. 53
<i>3.3. Prove su barriere paramassi deformabili</i>	p. 57
<i>3.3.1. Scopi delle prove</i>	p. 57
<i>3.3.2. Tecniche di prova</i>	p. 58
<i>3.3.3. Risultati delle prove</i>	p. 59

#### **4. MODELLI ANALITICI E NUMERICI PREVISIONALI**

<i>4.1. Introduzione</i>	p. 61
<i>4.2. Metodi analitici</i>	p. 65
<i>4.2.1. Blocco puntiforme</i>	p. 65
<i>4.2.2. Blocchi di forma ellissoidica</i>	p. 71
<i>4.2.3. Blocchi aventi sezione circolare</i>	p. 76
<i>4.2.4. Modelli tridimensionali</i>	p. 81
<i>4.3. Metodi numerici</i>	p. 85
<i>4.3.1. Metodo di analisi della deformazione         dei mezzi discontinui</i>	p. 85
<i>4.3.2. Applicazione del metodo DDA</i>	p. 87

#### **5. METODI ED OPERE DI PROTEZIONE**

<i>5.1. Generalità</i>	p. 91
<i>5.2. Interventi sul pendio</i>	p. 92
<i>5.3. Sistemi costituiti da fossato di raccolta     e rete di protezione</i>	p. 94
<i>5.4. Barriere paramassi</i>	p. 95
<i>5.5. Rilevati paramassi in terra rinforzata</i>	p. 101
<i>5.6. Gallerie artificiali</i>	p. 102

<b><i>Riferimenti bibliografici</i></b>	p. 105
---	--------





copyright © 1997  
HEVELIUS EDIZIONI srl  
ISBN - 88-86977-05-0

Stampato nel mese di settembre 1997  
dalla microPRINT di Benevento  
per conto di HEVELIUS EDIZIONI srl  
Via Vanvitelli, pal. Ricciardi  
82100 Benevento - 0824/317558







La protezione dalla caduta di massi viene trattata attraverso la descrizione di una metodologia che si articola in più fasi: osservazioni, misure, modelli, decisioni, scelte e dimensionamento delle strutture di difesa. Partendo dalla osservazione dei fenomeni naturali e classificandoli sulla base delle caratteristiche fisiche e geometriche vengono descritte metodologie di prove in sito e tecniche di misura delle caratteristiche del moto di caduta di massi e dei parametri che regolano il fenomeno. Vengono quindi trattati metodi di calcolo analitici o numerici per la modellazione del percorso di caduta di massi e per la determinazione delle equazioni del moto. Le tipologie di opere paramassi vengono descritte in modo da individuare l'intervento necessario per il tipo di fenomeno in esame. Infine vengono trattati i metodi di dimensionamento delle opere stesse.

**Gian Paolo Giani** ha svolto la sua attività scientifica ed accademica al Politecnico di Torino fino al 1994, dove è stato prima assistente e poi professore associato. Dal 1994 è professore straordinario di Geotecnica all'Università di Parma. La sua attività di ricerca è prevalentemente rivolta a studi nel campo della Meccanica delle rocce e della Stabilità dei pendii.

---

COLLANA DIRETTA DA CARLO VIGGIANI

---

LIRE 28.000

ISBN - 88-86977-05-0