

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

1. TEORIA E NORMATIVA.....	2
<i>1.1 Introduzione.....</i>	<i>2</i>
<i>1.2 Analisi del fenomeno di caduta massi.....</i>	<i>3</i>
1.2.1 Rilievo di campagna.....	3
<i>1.3 Simulazione numerica.....</i>	<i>4</i>
1.3.1 Calibratura del modello.....	4
a) Coefficiente di restituzione (K).....	5
b) Angolo d'attrito masso-versante (ϕ).....	7
1.3.2 Equazioni del moto.....	8
1.3.3 Analisi con metodi probabilistici - Metodo di Montecarlo.....	11
<i>1.4 Dimensionamento delle opere di difesa.....</i>	<i>13</i>
1.4.1 Barriere paramassi rigide ed elastiche.....	14
1.4.2 Terrapieni paramassi.....	14

1. Teoria e Normativa

1.1 Introduzione

Per caduta massi s'intende il fenomeno di distacco e di successivo movimento verso valle di blocchi per lo più isolati e volumetricamente limitati (fino ad un massimo di alcuni metri cubi) da pareti rocciose particolarmente acclivi e tettonicamente disturbate. Il passaggio fra questo tipo di fenomeno gravitativo e le frane di crollo vere e proprie nella realtà è piuttosto sfumato: spesso viene fissato attraverso un criterio geometrico, classificando come frane di crollo quegli eventi che coinvolgono almeno alcune centinaia di metri cubi di materiale roccioso. Nella pratica ingegneristica è più utile però un criterio di tipo meccanico. Secondo tale criterio vanno trattati come fenomeni franosi quei movimenti gravitativi che mettono in gioco un'energia cinetica superiore a quella normalmente assorbibile dalle normali opere di difesa di tipo passivo (barriere e terrapieni paramassi, ecc.). Tale limite energetico può essere posto intorno ai 2000 kJoule.

Lo studio del fenomeno di caduta massi ha lo scopo di individuare con una approssimazione accettabile:

- la massima distanza percorribile dal masso distaccato;
- la traiettoria più probabile o più sfavorevole per la realizzazione delle opere di difesa;
- la massima energia d'impatto che dovrà essere dissipata dalla singola opera di difesa.

A tal fine l'analisi del problema dovrà essere effettuata in due fasi distinte:

- fase di rilievo in campagna dei dati relativi a distacchi avvenuti in passato;
- fase di simulazione numerica complessiva dei distacchi prevedibili per il futuro.

1.2 Analisi del fenomeno di caduta massi

1.2.1 Rilievo di campagna

Un'accurata indagine di campagna è indispensabile per permettere al geologo di fare previsioni sul cinematiso dei blocchi rocciosi in caduta. Non hanno alcun significato, ed anzi sono da ritenersi inutili ai fini del dimensionamento delle opere di difesa, le simulazioni numeriche non calibrate o calibrate in maniera insufficiente sui dati acquisiti in campagna. Il rilievo dovrà condurre all'individuazione:

1) delle aree di distacco dei blocchi rocciosi; queste generalmente corrispondono alle zone più fratturate e di maggiore pendenza del versante e sono riconoscibili dalla presenza di superfici fresche di distacco, individuabili per il minor grado di alterazione rispetto alla parte rimanente dell'affioramento; su tali affioramenti sarà opportuno condurre un rilievo geomeccanico speditivo, al fine di caratterizzare l'ammasso roccioso dal punto di vista geometrico (numero di famiglie di discontinuità meccaniche, giaciture rappresentative delle singole famiglie, spazature medie ecc...); utile è la stima del volume roccioso unitario massimo, calcolabile per es. attraverso la relazione di Hudson e Priest (1979)

$$(1) V_m = 8 / (s_1 + s_2 + s_3);$$

(con s_1, s_2, s_3 = spazature medie delle tre famiglie principali di discontinuità), che può fornire una indicazione delle dimensioni massime dei blocchi che si possono staccare dalla parete;

2) delle traiettorie più frequenti seguite dai massi in caduta; queste sono ricostruibili con una certa approssimazione individuando sul terreno i solchi lasciati dal rimbalzo o dal rotolamento dei singoli massi o i segni d'impatto lungo il pendio contro alberi, manufatti o affioramenti rocciosi; è importante anche segnalare le zone di possibile frammentazione del blocco roccioso in seguito all'urto contro ostacoli o superfici rigide, individuabili spesso per la presenza di schegge abbandonate dal masso nell'impatto;

3) della distribuzione dei massi al piede del versante; andranno rilevate le distanze dei singoli massi dal piede del pendio ed i loro volumi; da questi

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

dati potranno essere ricavati le distanze massime e più frequenti percorse dai massi ed i loro volumi massimi e più probabili.

1.3 Simulazione numerica

1.3.1 Calibratura del modello

La simulazione numerica del fenomeno di caduta massi ha lo scopo di permettere la costruzione di un modello che permetta di fare delle previsioni sul comportamento cinematico di singoli blocchi rocciosi distaccatisi dal versante.

La calibratura del modello va effettuata sulla base dei dati acquisiti in campagna e non può essere considerata accettabile, se non è in grado di riprodurre la situazione osservata (traiettorie dei massi, distribuzione degli stessi al piede del versante, ecc...).

Nel modello il moto viene supposto bidimensionale, cioè svolgentesi nel piano x,z, con il pendio discretizzato in una serie di segmenti retti. Il masso inoltre può essere supposto puntiforme, considerando cioè solo il moto del suo baricentro, o approssimato ad un ellissoide triassiale.

Il modello richiede che vengano determinate due serie di parametri, una riguardante il blocco in caduta, l'altra il versante.

1) Parametri del blocco roccioso:

è richiesta l'introduzione delle seguenti grandezze:

- volume del masso;
- dimensione dei semiassi **a,b,c** dell'ellissoide che approssima il masso;
- peso di volume apparente del blocco;
- velocità iniziale lungo gli assi x e z (diversa da zero se il blocco è sollecitato inizialmente da altre forze oltre alla forza di gravità, per es. da un evento sismico);
- eventualmente, minima energia d'impatto necessaria per la frantumazione del masso.

2) Parametri del versante:

E' richiesta l'introduzione per ogni singolo tratto di pendio di alcuni parametri necessari per il calcolo dell'interazione masso-versante.

a)Coefficiente di restituzione (K)

Viene definito come il rapporto fra la velocità prima e dopo (V_1 / V_0 dove V_1 è la velocità dopo l'urto, V_0 prima dell'urto) l'impatto del masso con il terreno; è uguale a zero nel caso di un urto completamente anelastico (tutta l'energia cinetica del blocco impattante viene dissipata sotto forma di calore e la velocità del masso dopo l'urto è uguale a zero), uguale a uno nel caso di urto completamente elastico (tutta l'energia cinetica viene conservata ed il masso avrà una velocità dopo l'impatto uguale a quella precedente l'urto, cioè $V_1=V_0$) e compreso fra 0 e 1 nel caso di urto parzialmente elastico (parte dell'energia cinetica viene conservata e parte dissipata sotto forma di calore; la velocità del masso sarà data da $V_1= K \times V_0$).

Il valore di K è legato principalmente alla litologia ed alla morfologia del versante. Broilli (1979) propone di assumere indicativamente valori di K compresi fra 0.75 e 0.8 per impatti su roccia o detrito di grossa pezzatura e tra 0.2 e 0.35 per impatti su materiale terroso. Altri Autori (Mazzalai, Vuillermin, 1995) propongono invece i seguenti valori indicativi:

Tipo substrato	K
apice di conoide detritico	0,05 - 0,10
bosco con sottobosco sviluppato, prato	0,05 - 0,15
copertura detritica con vegetazione folta	0,10 - 0,15
copertura detritica con vegetazione rada	0,20 - 0,30
detrito eluviale di spessore ridotto	0,30 - 0,40
strutture rigide e strade	0,40 - 0,60
roccia affiorante fratturata	0,60 - 0,70
roccia affiorante integra	0,75 - 0,85

Volendo distinguere le componenti normale e tangenziale della velocità del blocco in caduta, si possono definire i parametri K_y e K_x (coefficienti di restituzione normale e tangenziale) come segue:

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

$K_y = V_{1n} / V_{0n}$ [V_{1n} = velocità normale (perpendicolare alla superficie topografica) del masso dopo l'urto; V_{0n} = velocità normale del masso prima dell'urto];

$K_x = V_{1t} / V_{0t}$ [V_{1t} = velocità tangenziale (parallela alla superficie topografica) del masso dopo l'urto; V_{0t} = velocità tangenziale del masso prima dell'urto].

Per i valori indicativi di K_y e K_x si presentano qui quelli proposti da Piteau e Clayton (1987) e da Hoek (1987).

Piteau e Clayton

Tipo substrato	K_y	K_x
Roccia compatta	0,8 - 0,9	0,65-0,75
Detrito misto a grossi massi	0,5 - 0,8	0,45-0,65
Detrito compatto con piccoli massi	0,4 - 0,5	0,35-0,45
Scarpate ricoperte da vegetazione	0,2 - 0,4	0,2 - 0,3

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

Hoek

Tipo substrato	K_y	K_x
Roccia compatta e pulita	0,53	0,99
Strada asfaltata	0,40	0,90
Roccia coperta con grossi massi	0,35	0,85
Conoidi di detrito	0,32	0,82
Conoidi di detrito con vegetazione	0,32	0,80
Suolo soffice	0,30	0,80

b) Angolo d'attrito masso-versante (ϕ)

Nei tratti di pendio in cui il masso si muove rotolando o scivolando, l'energia cinetica viene dissipata attraverso l'attrito che si sviluppa fra blocco e versante. Quest'attrito viene introdotto nel calcolo attraverso il parametro angolo d'attrito masso-versante. Nel caso di un blocco che rotola ϕ generalmente possiede valori compresi fra 20° e 35°, con i valori inferiori corrispondenti a tratti di pendio in roccia e privi di scabrosità. Nel caso di un blocco che scivola (per es. nel caso di un masso lastriforme che si muove tenendo a contatto con il terreno la faccia arealmente più estesa) l'attrito ovviamente è superiore.

Cocco (1991) propone di considerare per la stima dell'angolo d'attrito terra-masso in fase di rotolamento tre componenti distinte legate rispettivamente alla natura del terreno, alla copertura vegetale e alle asperità del terreno in relazione alle dimensioni del masso. Ogni componente fornisce un contributo, dalla cui somma si ottiene l'angolo d'attrito totale.

Questi i valori dei parametri parziali:

Natura del terreno	Contributo parziale (°)
Roccia nuda	19,5
Detrito	21,0
Alluvioni	26,5
Morena	26,5

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

Copertura vegetale	Contributo parziale (°)
Terreno nudo	0,0
Prato	3,0
Arbusti	3,5
Frutteto	6,0
Bosco ceduo	4,5
Bosco d'alto fusto	8,5

Asperità del terreno	Contributo parziale (°)
Nessuna	0
Piccola	3
Media	7
Elevata	11

I parametri qui definiti ed in particolare quelli relativi all'interazione masso-versante andranno inseriti nel modello procedendo a tentativi, fino ad ottenere simulazioni di distacchi con traiettorie compatibili con quelle osservate o ricostruite sul terreno.

1.3.2 Equazioni del moto

Trascurando la resistenza dell'aria, le forze che condizionano il moto del masso in movimento lungo il versante sono la forza di gravità e l'attrito masso-pendio.

Vengono distinti nella simulazione numerica i tratti di versante in cui il moto avviene per caduta libera da quelli in cui avviene per rotolamento o scivolamento. I calcoli vengono eseguiti sulla base delle equazioni proposte da Piteau e Clayton (1977) e da Bassato et al. (1985).

a. Masso in caduta libera e traiettoria da saltellamento

Questo tipo di moto è dominante in pendii con inclinazione superiore ai 45° (Ritchie, 1963).

Il masso inizialmente si muove senza mantenere il contatto con il pendio. La velocità finale di caduta del masso, cioè quella posseduta

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

immediatamente prima dell'impatto con il terreno, secondo le equazioni della meccanica, è data da:

$$(2) V = \sqrt{2 \times g \times d};$$

con

g = 9.807 m/s², accelerazione di gravità;
d = distanza percorsa in aria dal masso.

In seguito all'urto con il terreno il blocco viene proiettato in avanti con una velocità data da:

$$(3) V = \sqrt{(V_i \times \sin\beta)^2 \times K + (V_i \times \cos\beta)^2 \times (K \times 0.3^{\text{Log } K})};$$

con

V_i = velocità d'impatto;
β = angolo d'incidenza della traiettoria del masso rispetto al versante;
K = coefficiente di restituzione dell'energia.

Per quanto riguarda la determinazione dell'angolo di proiezione del blocco nel rimbalzo dopo l'impatto (angolo θ), l'esperienza dimostra che non è da ritenersi valida l'assunzione, spesso usata nelle simulazioni numeriche, che sia uguale all'angolo d'incidenza. Nella simulazione in pratica si può procedere in due modi differenti: si può considerarlo come un parametro variabile in maniera del tutto casuale o porlo in funzione di altre grandezze, in particolare del coefficiente di restituzione K. Le esperienze condotte da vari Autori evidenziano per l'angolo θ valori compresi fra l'orizzontale e la superficie topografica qualunque sia l'angolo d'incidenza (Paronuzzi, 1989). Tali valori possono essere considerati in pratica distribuiti in maniera casuale, con distribuzione di probabilità uniforme, normale, log-normale, ecc., in quanto influenzati spesso dalla presenza di piccole asperità od ostacoli nel terreno. In alternativa spesso viene utilizzata una correlazione con il coefficiente di restituzione K:

$$(4) \text{tg } \theta = K \times \text{tg } \beta;$$

dove β è l'angolo d'incidenza del masso.

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

Data però l'approssimazione con cui è nota la grandezza K, tale approccio andrebbe utilizzato solo nell'ambito di una procedura d'analisi di tipo probabilistico (per es. con il metodo di Montecarlo).

β. Massa in rotolamento o scivolamento

Questo tipo di moto è dominante in pendii con inclinazione inferiore ai 45° (Ritchie, 1963).

Il blocco, nel caso di rotolamento, si muove con un moto di rototraslazione lungo il pendio, attraverso una serie di piccoli rimbalzi o, nel caso di scivolamento, con un moto di traslazione pura, mantenendo il contatto con la superficie del pendio lungo una faccia, generalmente la più estesa arealmente.

La velocità finale del masso al termine del tratto di pendio considerato può essere valutata attraverso la relazione:

$$(5) V = \sqrt{V_i^2 + (10/7) \times g \times s \times (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi)}$$

nel caso di moto per rotolamento, o con la formula:

$$(6) V = \sqrt{V_i^2 + 2 \times g \times s \times (\operatorname{sen} \alpha - \operatorname{tg} \varphi \times \operatorname{cos} \alpha)}$$

nel caso di moto per scivolamento,
con

- V_i = velocità iniziale lungo il tratto di pendio considerato;
- s = distanza percorsa dal masso lungo il tratto;
- α = inclinazione del pendio;
- φ = angolo d'attrito terra-masso.

Il passaggio da un moto di rotolamento ad uno di scivolamento, nel caso di un masso approssimato da un ellissoide triassiale, avviene quando è verificata la relazione:

$$(7) E < \Delta H \times g \times m;$$

dove:

- ΔH = differenza fra il semiasse maggiore a e quello minore c ($a-c$);

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

g	= accelerazione di gravità;
m	= massa del blocco;
E	= $E = 0,5 \times m \times V^2 + 0,5 \times I \times \omega^2$, energia totale posseduta dal masso;
V	= velocità del blocco;
I	= momento d'inerzia del blocco, uguale a $(2/5)mR$ per un masso sferico;
ω	= velocità angolare del blocco (velocità di rotazione del masso).

Nel caso di un blocco sferico $\Delta H = 0$, per cui il moto avverrà in pratica solo per rotolamento.

1.3.3 Analisi con metodi probabilistici - Metodo di Montecarlo.

L'incertezza insita nella scelta delle grandezze da introdurre nella simulazione di caduta massi, ed in particolare nei parametri E (coef. di restituzione), φ (angolo d'attrito masso-versante), e V (volume del masso in caduta). consiglia un approccio di tipo probabilistico al problema.

Il metodo probabilistico generalmente utilizzato è quello di Montecarlo.

Il metodo di Montecarlo si basa sulla generazione di numeri casuali, scelti in determinati intervalli, che godano nel complesso di proprietà statistiche. Fra le varie applicazioni possibili di tali metodi, vi è quella detta 'del campionamento' che consiste nel dedurre proprietà generali di un insieme grande, studiandone solo un sottoinsieme casuale, giudicato rappresentativo dell'insieme stesso. E' evidente che maggiori saranno le dimensioni del campione random, più rappresentative potranno essere considerate le proprietà dedotte.

Nel caso di applicazione del metodo alla simulazione di caduta massi, la procedura da seguire è la seguente:

- si genera la distribuzione delle variabili aleatorie E (coef. di restituzione), φ e V misurate in situ o stimate, supponendo che sia di tipo gaussiano (cioè rappresentate da una curva a campana, con il valore centrale corrispondente al valore medio);
- attraverso un generatore di numeri casuali, si crea una serie, estesa quanto si vuole, di valori numerici compresi fra 0 e 1;
- si associa ad ogni valore numerico casuale della serie un valore di E, φ e V, rispettando la curva di distribuzione delle probabilità di queste grandezze (facendo cioè in modo che la frequenza con cui un certo

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

parametro viene chiamato nel calcolo sia uguale alla sua probabilità ricavata dalla curva gaussiana di probabilità del parametro stesso); in

questo modo si trasforma la serie di numeri casuali generati nel punto precedente in una serie di coppie di valori di E , φ e V ;

- si esegue la simulazione per ogni terna di valori E , φ e V .

L'andamento delle traiettorie di caduta collegata ad ogni terna di E , φ e V consente di valutare l'influenza della dispersione dei valori di questi parametri sui percorsi di caduta.

Normalmente per ottenere distribuzioni stabili delle traiettorie sono necessarie alcune centinaia di verifiche.

1.4 Dimensionamento delle opere di difesa

Valutata attraverso la simulazione numerica la distribuzione delle traiettorie dei massi in caduta lungo il pendio, può essere effettuato un primo dimensionamento delle opere di difesa. Queste opere devono essere in grado di intercettare i blocchi rocciosi in caduta e di resistere alle sollecitazioni prodotte dagli impatti.

Vanno effettuate quindi due tipi di verifiche:

1. Verifica al superamento per proiezione

Si ripete la simulazione numerica della caduta massi, facendo variare la posizione e l'altezza delle opere di difesa. Si valuta quindi di volta in volta come varia la distribuzione degli arrivi dei massi a valle e la possibilità, attraverso l'esame delle traiettorie, che i blocchi scavalchino le singole opere.

Alla fine andrà ovviamente adottata quella combinazione di opere che permettano di raggiungere la massima efficienza nell'intercettazione dei massi.

2. Verifica al superamento per sfondamento

L'opera di difesa deve essere in grado di resistere all'impatto e di dissipare l'energia cinetica posseduta dal masso, data da:

$$(8) E_c = (1/2) \times m \times V^2 + (1/2) \times I \times w^2;$$

con

m	=	peso del masso;
g	=	accelerazione di gravità;
V	=	velocità di traslazione del baricentro del masso;
I	=	momento d'inerzia del blocco;
w	=	velocità angolare del blocco.

Dalla (8) si nota che l'energia cinetica totale posseduta dal masso è data dalla somma di una componente dovuta al moto di traslazione del baricentro del blocco ($0,5 \times m \times V^2$) ed una legata al moto di rotazione del masso intorno al baricentro stesso ($0,5 \times I \times w^2$). Normalmente la seconda

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

componente viene trascurata per la difficoltà di stimare il valore della velocità angolare.

Vengono qui prese in considerazione tre tipi di opere di difesa: le barriere paramassi rigide elastiche ed i terrapieni paramassi. Vengono invece trascurate tutte le opere di difesa attiva (reti addossate, ecc...), che non necessitano di simulazioni numeriche delle traiettorie di caduta.

1.4.1 Barriere paramassi rigide ed elastiche

Le barriere rigide sono di solito costituite da opere in legno o acciaio, qualche volta da muri in cemento armato. Le barriere elastiche sono invece composte da reti in fune d'acciaio sostenute da puntoni ancorati nel terreno, poste in opera in un numero dispari di campate. L'energia dell' impatto viene dissipata dalla deformazione delle funi della rete ed eventualmente, nel caso delle paramassi flessibili, anche dai dissipatori di energia.

1.4.2 Terrapieni paramassi

Si tratta di una struttura in terra a geometria trapezia, a volte sostenuta da un muro o da una gabbionata a monte, completata spesso dalla presenza di un fossato (rocktrap) rivestito da materiale a basso coefficiente di restituzione elastico (per es. ghiaia).

A differenza delle barriere paramassi elastiche, un terrapieno dissipa l'energia cinetica d'impatto del masso attraverso il lavoro che il masso stesso deve compiere per penetrare nella struttura in terra. Va quindi calcolata la profondità di penetrazione del blocco roccioso e verificata che sia inferiore allo spessore dell'opera. In caso contrario il manufatto va considerato sottodimensionato.

La profondità di penetrazione può essere valutata con la relazione di Kar (1978), nel caso d'impatto diretto con il materiale terroso:

$$(16)Zf=[27183/\sqrt{(s)}] \times Nf \times (E/Ea)^{1.25} \times [P / (d^{2.31})] \times (V/1000)^{1.25}$$

con

s = resistenza alla compressione semplice del terreno (kN/mq);
Nf = fattore di forma del masso(1 per corpi appuntiti, 0.72 per corpi piatti);

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

E	= modulo di elasticità del blocco roccioso (kN/mq);
Ea	= modulo di elasticità medio dell'acciaio (circa 206.850×10^3) (kN/mq);
P	= peso del masso (kg);
d	= diametro impronta impatto (m);
V	= velocità d'impatto (m/s).

La profondità di penetrazione è quindi data da:

$$(17) z(\text{cm}) = \text{sqr}(Z_f) \times 2 \times d, \text{ se } z/d \leq 2;$$

$$(18) z(\text{cm}) = (Z_f + 1) \times d, \text{ se } z / d > 2$$

Nella pratica, vista la doppia soluzione possibile [(17) e (18)], andrà preso in considerazione il valore maggiore, e si dovrà verificare che la rispettiva condizione z/d sia rispettata. In caso contrario si assumerà come risultato valido l'altro valore calcolato.

Nel caso il terrapieno sia sostenuto a monte da un muro o da una gabbionata la (16) va riscritta nel seguente modo:

$$(19) Z_f = [120328 / \sqrt{(s)}] \times N_f \times (E/E_a)^{1.25} \times [P / (d^{2.8})] \times (V/1000)^{1.8}$$

Se dal calcolo della (19) risultasse che il masso penetra per una profondità superiore allo spessore del muro o della gabbionata, occorrerà valutare la velocità residua del blocco come segue:

$$(20) V_r = (V^{1.25} - V_m^{1.25});$$

con

V	= velocità d'impatto del masso;
V _m	= velocità minima necessaria per attraversare il muro o la gabbionata, valutabile ponendo il valore dello spessore del muro al posto del parametro z nella (17) o nella (18) (a seconda del rapporto z/d risultante), determinando quindi Z_f e risolvendo la (19) rispetto a V .

La penetrazione del masso dotato di una velocità residua V_r nel terreno costituente il terrapieno potrà essere quindi calcolata con la (16).

Nota la profondità di penetrazione del masso, può essere eseguita una stima della forza impulsiva generata dall'impatto.

PROGRAM GEO - Masco ver.3.0 per Windows

Nell'ipotesi di comportamento elasto-plastico del terreno costituente il terrapieno e di un carico dinamico variabile nel tempo, la forza impulsiva massima generata dal masso può essere calcolata con la relazione di Mc Carty e Carden (1962):

$$(21) F_{max}(kgf) = K \times m \times V / T;$$

con

K = costante posta uguale generalmente a 2.022;

m (kgf) = P/g, massa del blocco roccioso;

P(kg) = peso del masso;

g = accelerazione di gravità(9.807 m/s²);

V(m / s) = velocità d'impatto del masso;

T (s) = durata dell'impatto;

Problematica è la determinazione del parametro T, per il quale Kar (1979) e Knight (1980) propongono la seguente relazione:

$$(22) T(s) = 3.335 \times z / V;$$

con

z(m) = profondità di penetrazione del masso;

V(m / s) = velocità d'impatto del masso.