

Regione Autonoma Valle d'Aosta  
GEOBRUGG  
Falzoni s.a.s.

---

## **Giornate di Studio 2002**

---

Rotolamento massi  
Presentazione modelli

7 marzo 2002

---

## **Presentazione del codice di calcolo PCMASSI**

---

Software dedicato per le problematiche  
della caduta massi

A cura di A. Bruschi

Geosoft di Bruschi Alberto – Piazza Virgilio 3 – 21023 Milano

0290753333 – 3385962653 – fax 024814367 – e\_mail [geosoft@aladata.it](mailto:geosoft@aladata.it)

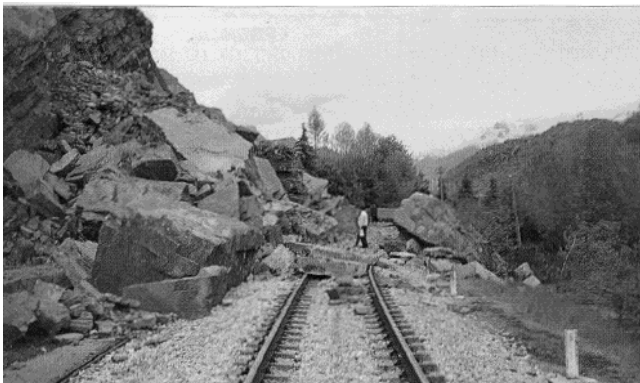
## Presentazione del programma

Il codice di calcolo **PCMassi**, originariamente sviluppato (1996) per la simulazione dinamica delle traiettorie di cadute massi lungo un pendio, si è recentemente evoluto (2000) in un pacchetto integrato dedicato alle problematiche relative alle aree soggette a caduta massi.

Le cadute di massi, che sono prevalentemente una conseguenza dell'alterazione e del disfacimento di scarpate naturali o all'esposizione di tagli artificiali in roccia, costituiscono un problema sempre più grave sia per gli insediamenti abitati sia per le strutture legate alla viabilità in genere (ponti, viadotti, strade ed autostrade, gallerie) a causa del crescente aumento demografico e al crescente sviluppo industriale che porta ad una inevitabile antropizzazione di un sempre maggior numero di aree a rischio (Grasso et al., 1988).

Si consideri, ad esempio, che nel solo territorio della Provincia di Trento, le frane di crollo rappresentano quasi il 40% degli eventi franosi (Cocco, 1991), mentre nel vicino Canton Ticino, in Svizzera, sono segnalati nelle aree antropizzate, una ventina di casi di crolli l'anno (Valenti, 1996).

Fenomeni di caduta massi sono diffusi nell'arco alpino e prealpino nel Nord Italia ed in Europa, spesso con conseguenze pesanti sulla comunità:



Darfo-Boario Terme (Bs)

Massi che hanno interrotto la ferrovia Brescia – Edolo e la ex S.S. del Tonale e della Mendola.

da Chiessi e D'Orefice (1999)

Risulta quindi evidente la necessità di avere a disposizione degli strumenti che permettano, ai fini di una valutazione del grado di rischio e di una progettazione di opere di difesa rispetto al fenomeno della caduta massi, di poter prevedere la traiettoria del masso nonché la velocità e l'energia cinetica assunta dallo stesso durante la sua caduta.

Nel tentativo di recepire le direttive della legge 267/98 sulla valutazione della pericolosità e del rischio da frana, il programma PCMassi è articolato in una successione di opzioni a cascata, attivabili in toto od in parte, che permettono di:

- Individuare il grado di instabilità del settore di parete rocciosa origine dei crolli sulla base di rilievi giaciture in posto e attraverso il test di compatibilità cinematica di Matheson (1988,1991) per fenomeni di instabilità dovuti a ribaltamento, scivolamento planare, scivolamento a cuneo.
- Classificare l'ammasso roccioso sulla base di rilievi strutturali attraverso le classificazioni di Bieniawski (1989) e di Romana (1985) modificato in accordo con i suggerimenti di Castelli et al. (1999)
- Valutare il rischio di crollo per le sole condizioni di instabilità della roccia in posto secondo la procedura proposta da Barisone & Bottino (1991) e illustrata da Montaldo & Sechi (1994)

- Analizzare le traiettorie di caduta dei massi e raccogliere i parametri più significativi statisticamente secondo un modello numerico di tipo stocastico derivato principalmente dal modello noto come CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) sviluppato da Pfeiffer et al. (1988,1990, 1993); tale modello è attualmente il più usato negli Stati Uniti (Branwer, 1994)
- Valutare la massima distanza di avanzamento teorica di un masso secondo la procedura di Onofri & Candian (1979) e di Evans & Hungr (1993) convalidata da Wieczorek et al. (1998)
- Valutare un Indice di Pericolosità del sito nel caso di aree antropizzate seguendo la procedura proposta da Cancelli & Crosta (1993) e da Crosta & Locatelli (1999) modificata da Bruschi
- Valutare un Indice di Pericolosità del sito nel caso di vie di comunicazione seguendo la procedura nota come RHRS (Rockfall Hazard Rating System) sviluppata dall'Oregon State Highway Division (Pierson et al., 1990)
- Valutare il Rischio accettabile in termini di perdita di vite umane seguendo la procedura nota come "Albero degli Eventi" sviluppata da Bunce (1994) e semplificata da Hoek (1999)
- Scegliere ed ottimizzare gli interventi di difesa con il metodo delle somme pesate applicando la procedura proposta da Agostoni et al. (1996)
- Dimensionare in via preliminare alcuni interventi di difesa

Per facilitare l'utilizzo del programma in ambito universitario ed a scopo didattico, all'interno del programma vi è un ampio catalogo fotografico che illustra le cause, le forme, le evidenze dei fenomeni legati alla caduta massi e le tipologie delle opere di difesa.

### Modellazione del fenomeno di caduta massi

Per studiare il fenomeno della caduta massi, negli ultimi anni sono stati messi a punto vari modelli analitici del moto, suddivisibili in quattro grandi gruppi (per una descrizione completa dei vari metodi vedasi anche Paronuzzi, 1987 – Paronuzzi & Artini, 1999 – Nosetto, 1997 e le voci bibliografiche relative agli Autori menzionati):

I modelli cosiddetti del punto materiale o *lumped-mass*, in cui il blocco è considerato come un semplice punto dotato di massa e di velocità, e in cui il meccanismo di impatto con il terreno è funzione di due coefficienti di restituzione, tangenziale e normale, tipici i metodi di Piteau-Clayton (1977, 1980) e di Hungr-Evans (1988),

I modelli del corpo rigido, in cui il blocco è assimilato ad un corpo rigido dotato di forma e massa, tipico il metodo di Descoudres & Zimmermann (1989),

I modelli cosiddetti ibridi, in cui il blocco è assimilato o ad un corpo rigido dotato di forma e massa o ad un punto materiale, a seconda della fase di moto considerato, tipici i metodi proposti da Bozzolo & Pamini (1981) e da Azzoni et al. (1995),

I modelli *rigorosi*, che tengono conto della forma del blocco ed esaminano tutti i tipi di movimento dello stesso (rotazionale e traslazionale), tipico il metodo ad elementi distinti di Cundall (1971).

## L'analisi della caduta massi nel modello PcMassi

Sviluppato in ambiente Visual Basic 6 Professional della Microsoft®, il programma, nella sezione dedicata all'analisi delle traiettorie dei massi, è basato su un modello che, pur appartenendo alla categoria *lumped-mass*, è in grado di tenere conto della dimensione e della forma del masso; quest'ultima può essere impostata come sferica, cilindrica o discoidale.

Per descrivere il movimento del masso lungo un versante, il modello applica equazioni di accelerazione gravitazionale e di conservazione di energia.

Vengono utilizzate funzioni derivate empiricamente relative alla velocità, all'attrito e alle proprietà del materiale costituente il versante per analizzare l'interazione dinamica fra il masso ed il pendio.

Le ipotesi alla base dell'algoritmo di calcolo sono:

- Tutti i calcoli vengono sviluppati in forma bidimensionale.
- Il versante oggetto di analisi viene simulato mediante la sua scomposizione in segmenti rettilinei (celle) con propria lunghezza ed inclinazione e ad ogni cella vengono assegnate, in funzione della morfologia del terreno formante la cella stessa, le proprietà che influenzano la dinamica del masso che rimbalza sul versante: il *coefficiente normale di restituzione* ( $R_n$  - misura del grado di elasticità in una collisione normale alla cella) ed il *coefficiente tangenziale* di resistenza di attrito ( $R_t$  - misura della resistenza di attrito al movimento parallelo alla cella) (Wu, 1984).
- Si assume che il masso non si frantumi all'impatto durante la caduta, mantenendo quindi costanti forma e dimensione, che influenzano in modo sostanziale la ripartizione dell'energia di traslazione e di rotazione attraverso il momento d'inerzia, e simulando così il caso peggiore.
- La variazione statistica osservata nella realtà delle cadute massi aventi origine da una stessa fonte viene configurata variando casualmente l'angolo a cui avviene l'impatto tra un masso ed il pendio, entro limiti stabiliti dalla dimensione del masso e da un *coefficiente di rugosità* proprio della cella, funzione anch'esso della morfologia, che simula la interazione delle irregolarità della superficie del terreno con il masso; la tipologia del rimbalzo è sostanzialmente determinata proprio da tale angolo di impatto (Wu, 1984).

La simulazione della caduta massi inizia entro una zona verticale (zona di alimentazione) selezionata dall'Utente e che rappresenta il punto, o i punti, di partenza del masso, e assegnando le componenti nominali iniziali di velocità in orizzontale e in verticale del masso stesso.

Su tali componenti di velocità agisce l'accelerazione gravitazionale finché la traiettoria del masso interseca il versante alla velocità risultante  $V_1$ .

Ad ogni impatto, la velocità, l'angolo di impatto, e la velocità di rotazione vengono utilizzate per calcolare nuove componenti di velocità e di velocità di rotazione.

Al punto d'impatto, l'angolo della pendice ( $\phi$ ) viene fatto variare con tecnica random entro e non oltre il limite stabilito dalla variazione massima probabile nella cella ( $\theta_{max}$ ).

La rugosità della superficie (S), definita come la variazione perpendicolare del pendio entro una distanza del pendio uguale al raggio del masso (descrive così l'angolo del pendio come lo vede il masso al momento dell'impatto) e il raggio del masso (R) vengono utilizzati nel calcolo della variazione massima consentita nell'angolo  $\theta_{max}$  con la:

$$\theta_{\max} = \tan^{-1} \frac{S_{\max}}{R}$$

L'angolo di variazione ( $\theta$ ) è pertanto un angolo selezionato casualmente, inferiore rispetto al massimo calcolato, che determina la variazione nell'inclinazione del pendio ( $\phi$ ).

L'angolo di impatto " $\alpha$ " viene utilizzato per scomporre la velocità d'ingresso ( $V_{t1}$ ) in componenti di velocità tangenziale ( $V_{t1}=V_1 \cos \alpha$ ) e normale ( $V_{n1}=V_1 \sin \alpha$ ) rispetto alla superficie del pendio.

Un nuovo valore di velocità tangenziale, dal teorema della conservazione dell'energia viene calcolato dalla:

$$\frac{1}{2} I \omega_1^2 + \frac{1}{2} M V_{t1}^2 f(F) SF = \frac{1}{2} I \omega_2^2 + \frac{1}{2} M V_{t2}^2$$

dove:

M = massa del masso

I = momento d'inerzia del masso

I =  $2MR/5$  (masso sferico)

I =  $MR/2$  (masso discoidale)

I =  $MR/4 + ML/12$  (masso cilindrico; L = lunghezza)

$\omega_1$  = velocità iniziale di rotazione

$\omega_2$  = velocità finale di rotazione

$V_{t1}$  = velocità tangenziale iniziale

$V_{t2}$  = velocità tangenziale finale

$f(F)$  = Funzione d'attrito =  $R_t + (1-R_t) / \{ (V_{t1} - W_1 R) / 20 + 1.2 \}$

SF = Fattore di scala =  $R_t / \{ [V_{n1} / (250 R_n)] + 1 \}$

In qualsiasi collisione non perfettamente elastica, l'energia cinetica viene perduta.

All'impatto fra un masso e il pendio, la componente di energia cinetica parallela rispetto al pendio e l'energia di rotazione sono attenuate dall'attrito e da collisioni con elementi perpendicolari al pendio.

L'attrito è una funzione del materiale costituente il versante, determinata sia dal coefficiente tangenziale sia dall'eventualità che il masso stia inizialmente rotolando o scivolando lungo la superficie.

La funzione di attrito regola il coefficiente tangenziale in accordo alla differenza tra la velocità alla superficie del masso relativamente al terreno all'inizio dell'impatto.

La velocità normale al pendio riveste anch'essa un ruolo fondamentale sulla perdita di energia cinetica tangenziale al pendio.

Un aumento della velocità normale rispetto alla superficie dà come risultato una forza normale maggiore durante l'impatto.

Il fattore di scala permette una correzione per le aumentate resistenze di attrito dovute ad un aumento della forza normale.

L'equazione su riportata può essere risolta al fine di ricavare nuove velocità tangenziali e di rotazione, imponendo la seguente relazione tra velocità di rotazione e velocità tangenziale:

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

Questa equazione descrive la situazione in cui il masso rotola, anziché scivolare, lungo la superficie durante l'impatto.

Da osservazioni del rimbalzo dei massi si è dimostrato che, a prescindere dalla velocità di rotazione iniziale, i massi si distaccano sempre dalla superficie rotolando.

La relazione vista sopra rende possibile l'applicazione dell'energia di rotazione alla velocità tangenziale, o l'applicazione della velocità tangenziale alla velocità di rotazione.

L'energia perduta durante il rimbalzo è determinata dalla differenza tra le velocità rotazionali e tangenziali, la velocità normale al pendio e il coefficiente tangenziale.

Le costanti utilizzate nella funzione di attrito e il fattore di scala sono stati determinati attraverso prove sperimentali.

Risolvendo l'eguaglianza per ricavare la nuova velocità tangenziale si ha:

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 (I\omega_1^2 + MV_{t1}^2) f(F) SF}{I + MR^2}}$$

La nuova velocità normale è data dalla:

$$V_{n2} = \frac{V_{n1} R_n}{1 + \frac{V_{n1}^2}{30}}$$

Questa equazione utilizza il coefficiente di restituzione ( $R_n$ ) e un fattore di scala funzione della velocità  $[1/(1+V_{n1}/30)]$  per determinare la nuova velocità normale ( $V_{n1}$ ).

Tale fattore di scala impone una correzione per la diminuzione del coefficiente normale di restituzione man mano che la velocità di impatto aumenta.

Questo fattore rappresenta una transizione da un rimbalzo più elastico a basse velocità verso un rimbalzo molto meno elastico causato dall'accresciuta frantumazione del masso e dalla formazione di impronte sul pendio a velocità di impatto più elevate (Habib, 1976).

Dopo ogni rimbalzo il programma esegue una iterazione per trovare il lasso di tempo trascorso fino al rimbalzo successivo.

Il tempo trascorso è calcolato dalle velocità x e y, dall'accelerazione gravitazionale e dal profilo del pendio.

Dopo aver stabilito una nuova posizione di impatto, il rimbalzo successivo viene calcolato come in precedenza.

Se la distanza percorsa dal masso tra un rimbalzo e il successivo è inferiore al suo raggio, si considera che il masso stia rotolando e gli viene data una nuova posizione x, y uguale ad una distanza di un raggio rispetto alla sua posizione precedente.

Questo procedimento consente di configurare un masso che rotola sotto forma di una serie di brevi rimbalzi, in maniera simile al modo in cui un masso irregolare rotola su di una superficie irregolare.

### Dati restituiti dal programma di caduta massi

Al termine della simulazione delle cadute il programma permette:

- la visualizzazione delle traiettorie di caduta nell'intorno di una coordinata X scelta dall'Utente
- la restituzione grafica dell'involuppo massimo delle velocità, dell'energia cinetica e dell'altezza dei rimbalzi lungo la sezione del versante
- l'analisi statistica in termini di numero di massi transitati, velocità, energia cinetica, altezza del rimbalzo, ad una stazione di monitoraggio la cui posizione sull'intercetta verticale X è imposta preliminarmente dall'Utente
- La restituzione delle distanze d'arresto lungo il pendio sia come numero che come percentuale
- L'importazione in Word per Windows® di un file testo di relazione in cui sono raccolti tutti i dati di input e di output e in cui sono inseribili tutte le immagini grafiche create dal programma e salvate a giudizio dell'Utente

### Modellazione dei parametri di risposta del pendio in funzione della sua morfologia

Il programma permette l'assegnazione automatica dei parametri di risposta del pendio in funzione della morfologia assegnata ad ogni cella dopo un rilievo in sito sulla base di dati pubblicati in letteratura, di raffronti con situazioni già analizzate con altri modelli di calcolo e di applicazioni pratiche su casi reali durante la pratica professionale sia mia che di Utenti che utilizzano il programma.

La finestra relativa permette di attribuire tali parametri a seconda della presenza sul pendio delle seguenti unità geomorfologiche:

- Roccia in posto
- Affioramenti di roccia con detrito
- Detrito grossolano non vegetato
- Detrito medio-fine non vegetato
- Detrito vegetato ad arbusti
- Detrito vegetato a bosco
- Terreno nudo o prato
- Superfici pavimentate

Logicamente, nel corso di una sessione di calcolo, tali parametri possono essere modificati in toto od in parte per eseguire delle analisi di sensitività.

### Caratteristiche del programma PCMassi

Dimensioni file eseguibile: 16.4 MB

Dimensioni file di scambio: 1.0 MB

Monitor a colori con risoluzione 1.024x768 pixel a 120 dpi

Numero di segmenti massimo in cui suddividere il pendio: 100

Numero di simulazioni massimo di traiettorie: 1.000

## Bibliografia

Agostoni S., Laffi R., Nardo M., Papini M.: Ottimizzazione della scelta degli interventi di sistemazione di un versante soggetto a frane di crollo - in Sicurezza del Territorio: la stabilità dei versanti, Giornata di Studio, Ascona, 1996

Azzoni A., La Barbera G., Zaninetti A.: Analysis and predicting of rockfalls using a mathematical model, Journal of Rock Mechanics, Mineral Science & Geomechanics, 32, 1995

Azimi C., Desvarreux P., Giraud A., Martin-Cocher J.: Methode de calcul de la dynamique des chutes de bloc: Application à l'étude du versant de la montagne de La Pale (Vercors), Bulletin Liaison Laboratoire Ponts et Chaussées, 122, 1982

Barisone G., Bottino G.: Metodologia adottata per lo studio generale delle condizioni di stabilità dei versanti nel comune di Carema, Bollettino Associazione Mineraria Subalpina, XXVIII, 1-2, 1991

Bieniawski Z.T.: Engineering rock mass classification, J. Wiley & Sons, New York (1989)

Bozzolo D., Pamini R.: Modello matematico per lo studio della caduta massi, Laboratorio di Fisica Terrestre, Dipartimento Pubblica Edicazione, Lugano-Trevano, 1982

Brawner C.O., Participant workbook for rockfall hazard mitigation methods, Federal Highway Administration, Pubblicazione n. FHWA SA-93-085, 1994

Bunce C.M.: Risk analysis for rock fall on highways, Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada, 1994

Cancelli A., Crosta G.B.: Rockfall hazard and risk mapping, Proceedings 7a International Conference and Field Workshop on Landslides, Balkema, 1993

Cancelli A., Crosta G.B.: Previsione e prevenzione per frane di crollo: descrizione del fenomeno e analisi del rischio, Convegno sulla Previsione e Prevenzione di Movimenti Franosi Rapidi, Trento, 1998

Castelli E., Cucchi F., Zanolla S.: Considerazioni sull'applicabilità della classificazione geomeccanica SMR (in corso di pubblicazione)

Chiessi V., D'Orefice M.: La frana di Darfo-Boario Terme (BS): un caso di studio, Geologia Tecnica e Ambientale, 2/1999

Cocco S.: Frane di crollo - definizione dei coefficienti di dissipazione dell'energia - in Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica, vol. 68/2, 1991

Crosta G.B., Locatelli C.: Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo, Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 1999

Cundall P.A.: A computer model for simulating large scale movements in blocky rock systems, Symposium on Rock Fracture, Nancy, 1971

Descoudres F., Zimmermann T.H.: Three dimensional dynamic calculations of rock falls, VI Congress on Rock Mechanics, Montreal, 1987

Evans S.G., Hungr O.: The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes, Canadian Geotechnical Journal, 30, 1993



Giani G.P.: Potenzialità dei metodi di analisi nella previsione del moto di caduta massi lungo versante, IV ciclo di conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce, Torino, MIR 1992

Grasso P., Mahtab A., Rabbi E., Morino A.: Geotechnical characterization of rock slopes above civil works and in urban areas, Boll. Associazione Mineraria Subalpina, n. 2-3, 1988

Habib P.: Note sur le rebondissement des bloc rocheux, Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works, Bergamo, 1976

Hoek E.: Course notes on Rock Engineering, 1999 (disponibile in linea al sito Internet <http://www.rockscience.com/Hoekcorner.htm>)

Hungr O., Evans S.G.: Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards, V Symposium on Landslides, Losanna, 1988

Matheson G.D.: The collection and use of field discontinuity data in rock slope engineering, Quarterly J. of Engineering Geology (1988)

Matheson G.D.: The use of field data in the design of rock slopes, Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Ed Roegiers, Rotterdam, 1991

Montaldo L., Sechi M.L.: Caratterizzazione geologico-tecnica del settore Bussoleno – San Giorgio della media Val di Susa: applicazione di una classificazione tecnica per la pianificazione del territorio, Memorie GEAM – Geingegneria Ambientale e Mineraria, XXXI, 2-3, 1994

Onofri R., Candian C.: Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976: Considerazioni sulle opere di difesa, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia & Università degli Studi di Trieste, 1979

Paronuzzi P.: Modelli di calcolo per l'analisi della propagazione di blocchi rocciosi in frana, Geotecnica, n. 4, 1987

Paronuzzi P., Artini E.: Un nuovo programma in ambiente Windows per la modellazione della caduta massi, Geologia Tecnica e Ambientale, 1, 1999

Pfeiffer T.J.: Rockfall hazard analysis using computer simulation of rockfalls, Master of Science Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado

Pfeiffer T.J., Higgins J.A.: Rockfall hazard analysis using the Colorado Rockfall Simulation Program, Transportation Research Board, 1990

Pfeiffer T.J., Higgins J.A., Andrew R.D., Barrett R.K., Beck R.B.: Colorado Rockfall Simulation Program Version 3.0 Users Manual, Colorado Transportation Institute, 1993

Pierson L.A., Davis S.A., Van Vickle R.: Rockfall Hazard Rating System Implementation, Federal Highway Administration, Rapporto FHWA-OR-EG-90-01, 1990

Pisani S.: Fisica dei processi attivi sui versanti - in Sicurezza del Territorio: la stabilità dei versanti, Giornata di studio, Ascona, 1996

Piteau D.R., Clayton R.: Discussion of paper: "Computerized design of rock slopes" by Cundall et al., XVI Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, 1977

Piteau and Associates Ltd.: Slope stability analysis for rockfall problems, in Rock Slope Engineering, FHA, Washington D.C., 1980

Richards L.R.: Rockfall Protection: A review of current analytical and design methods, in II ciclo di conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce, Torino, MIR 1988

Richtie A.M.: The evaluation of rockfall and its control, Proc. XX Symposium on Engineering Geology, HRB, Washington D.C., 1963

Rochet L.: Methode de calcul de la dynamique des chutes des blocs, Bull. L.P.C., n. 122, 1982

Romana M.: New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, International Symposium on Rock Mechanics, Excavations, Mining, Civil Works, Mexico City, 1985

Romana M.: A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating, in Comprehensive Rock Engineering a cura di J.A. Hudson, volume 3, Pergamon Press, Oxford

Stevens W.D.: Rocfall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfall, Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1998

Valenti G.: Classificazione dei movimenti di versante - in Sicurezza del Territorio: la stabilità dei versanti, Giornata di studio, Ascona, 1996

Wieczorek G.F., Morrissey M.M., Iovine G., Godt J.: Rockfall hazards in the Yosemite Valley, USGS, open file report n. 98-467, 1998 (disponibile in linea al sito Internet <http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-98-0467/>)

Wu S.S.: Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Research Record, n. 1031, 1984