

Programma di simulazione per lo scoscendimento di blocchi rocciosi

RIASSUNTO

Viene presentato un programma di calcolo che simula la caduta di blocchi rocciosi lungo profili di versanti schematizzati a qualsiasi scala.

L'algoritmo prevede quattro ipotesi di scoscendimento gestite direttamente dall'operatore secondo ipotesi di salto, rimbalzo e rotolamento.

Sono stati prodotti due esempi dimostrativi di caduta di massi lungo profili reali determinando i parametri fondamentali della traiettoria.

SUMMARY

A computation program is illustrated for the simulation of rock block fall along slope profiles to any scale.

The algorithm admits four rock fall cases, directly managed by the user according to fall-rebound and rolling assumptions.

Two demonstrative examples of rock fall along real profiles have been produced, showing the fundamental parameters of the paths.

1. Premessa

Questo lavoro rientra in una ricerca che gli autori conducono da tempo (Bassato e Silvano, 1981; Bassato et al., 1982) sulla valutazione delle condizioni di stabilità di versanti rocciosi e dei conseguenti effetti sul territorio. In questo contesto viene presentato un programma di calcolo, che simulando la caduta di blocchi rocciosi lungo un versante, determina i principali parametri del loro moto.

Il programma è scritto in linguaggio HPL adatto al calcolatore HP 9825B ed è facilmente trasferibile su qualsiasi elaboratore di caratteristiche simili o superiori.

La verifica del buon funzionamento del programma, la taratura di alcuni parametri di caduta ed il controllo dei risultati, sono stati ottenuti attraverso il confronto con numerosi esempi relativi a casi reali ricavati dalla bibliografia e da rilievi di campagna.

2. Descrizione dell'algoritmo

Le relazioni che costituiscono l'algoritmo si riducono essenzialmente alle leggi fondamentali del moto dei gravi (Fleury e Mathieu, 1970). Esse studiano le modalità di caduta di un corpo secondo le seguenti ipotesi:

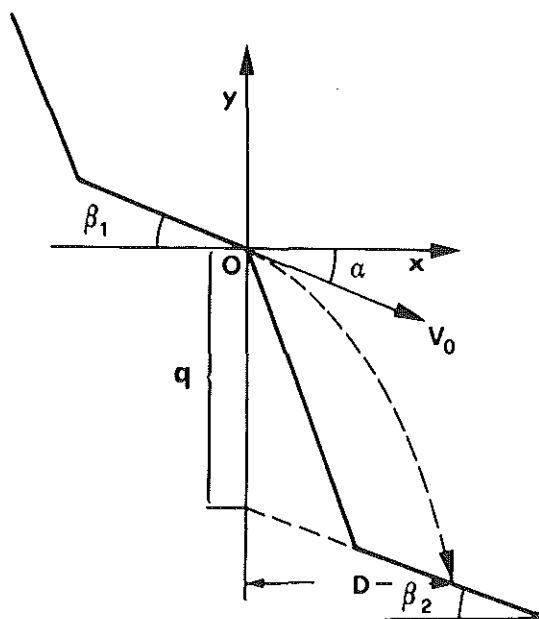
- caduta libera;
- rotolamento;
- salto, rimbalzo.

L'algoritmo definisce le traiettorie di un blocco in relazione alle caratteristiche fisico-meccaniche del masso e del versante secondo le ipotesi di caduta desiderate dall'operatore. Tali caratteristiche (angolo di attrito masso-versante, coefficiente di restituzione all'urto) stabilite per tratti di versante considerati omogenei, permettono di calcolare i parametri fondamentali delle traiettorie e in particolare le velocità iniziali e finali del grave in ciascuno di questi tratti (Paiola, 1978; Paiola, 1979).

- In questo programma si assume che:
- il masso sia sferico;
 - l'attrito con l'aria sia trascurabile;
 - l'attrito sia costante all'interno di ciascun tratto di versante;
 - il coefficiente di restituzione dell'energia all'urto sia correlato con l'angolo di incidenza masso-versante;
 - l'urto non sia perfettamente elastico;
 - gli angoli di incidenza e di uscita da un urto, rispetto al versante siano considerati eguali.

Il programma principale acquisisce da tastiera e da digitizer le coordinate dei vertici della spezzata che schematizza il versante, e calcola le corrispondenti inclinazioni e lunghezze di ciascun tratto. Associa a ciascuno di questi i valori dell'angolo di attrito e del coefficiente di restituzione all'urto precedentemente stabiliti (Bertozzi, 1979; Bertozzi e Onofri, 1978; Broili, 1978). Il programma principale gestisce inoltre quattro routines che individuano le modalità di caduta del grave lungo il versante e precisamente:

Fig. 1: schematizzazione di una fase di salto lungo un versante.



I: «PARTENZA CROLLO»

Si assume che la caduta avvenga con traiettoria verticale, senza contatto con il

pendio, posto nullo l'attrito con l'aria. La velocità di caduta è data da:

$$V = \sqrt{2gs} \quad (1)$$

$$V_n = \sqrt{(V \sin \theta \cdot J)^2 + (V \cos \theta)^2} \quad (2)$$

dove: J = coefficiente di restituzione all'urto;
 θ = angolo di incidenza della traiettoria del masso rispetto al versante.

2,3: «PARTENZA ROTOLAMENTO», «ROTOLAMENTO»

Entrambe queste routines determinano la velocità di un grave che si sia spostato rotolando lungo il tratto iniziale ($V_0 = 0$)

o lungo qualsiasi altro tratto di pendio.

La velocità del blocco al termine del tratto percorso rotolando è data da:

$$V = \sqrt{V_0^2 + (10/7) g \Delta x (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \theta)} \quad (3)$$

dove: V_0 = velocità iniziale;

Δx = distanza tra il punto iniziale e finale del tratto considerato;

β = inclinazione del versante nel tratto considerato;

θ = angolo di attrito massa-versante nel tratto considerato.

Nei profili concavi, con modalità di caduta di tipo a rotolamento, la velocità di uscita da ciascuno tratto, subirà una riduzione dovuta all'urto del blocco nei punti

di diminuzione di pendenza del versante. Di conseguenza il valore di V_0 nella (3) subirà una riduzione secondo:

$$V_0 = \sqrt{(V \sin(\beta_1 - \beta_2))^2 J + (V \cos(\beta_1 - \beta_2))^2} \quad (4)$$

dove: V = velocità di uscita dal tratto precedente (n-1);

β_1 = inclinazione del versante nel tratto (n-1);

β_2 = inclinazione del versante nel tratto (n);

J = coefficiente di restituzione all'urto riferito al tratto (n).

4: «SALTO», «RIMBALZO»

Queste routines calcolano i parametri di caduta libera secondo le modalità delle traiettorie di un volo balistico conseguenti a:

- brusco aumento dell'inclinazione del versante (in questo caso il programma opera automaticamente);

- rimbalzo.

Il programma determina i seguenti para-

metri:

- l'angolo con il quale il grave inizia la traiettoria; esso corrisponde alla inclinazione del versante nel caso di «SALTO» (fig. 1), oppure nel caso di precedente «SALTO», «RIMBALZO» o «PARTENZA CROLLO», all'angolo di incidenza;

- la lunghezza della traiettoria; essa è data dalla relazione:

$$D = \tan(\beta_1 - \beta_2) / (9.81 / (2 V^2 \cos^2 \beta_2)) \quad (5)$$

dove: β_1 = inclinazione del tratto di versante da cui il grave inizia il salto o l'angolo di impatto derivato da una traiettoria precedente di tipo "SALTO", "RIMBALZO" o "PARTENZA CROLLO";

β_2 = inclinazione del versante;

V = velocità nel punto di inizio del salto o rimbalzo.

Qualora la lunghezza del salto o rimbalzo sia superiore a quella del tratto di versante considerato, dovrà essere calcolato un nuovo valore di «D» in funzio-

ne dei parametri del tratto di versante successivo. Ciò si ottiene risolvendo in «D» il sistema costituito dalle equazioni della retta (versante)

$$Y = D \operatorname{tg} \beta + q$$

e della parabola (traiettoria di volo)

$$Y = D \operatorname{tg} \alpha + \frac{g D^2}{2 V_0^2 \cos^2 \alpha}$$

ottenendo

$$a D^2 + b D + c = 0$$

dove: $a = \frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha}$; $b = \operatorname{tga} - \operatorname{tg}\beta$

$c = \pm q$ lunghezza del tratto di ordinata con origine nel punto di inizio della traiettoria individuata dall'intersezione del prolungamento del tratto di versante in cui termina il salto (fig. 1).

Delle due soluzioni dell'equazione, il programma sceglie quella che stabilisce la caduta del grave all'interno del tratto di versante in esame. Qualora l'equazione non presenti soluzioni per quel tratto di retta-versante, il programma provve-

derà a ripetere il calcolo introducendo i dati relativi al tratto di versante successivo, e così di seguito.

Calcolata la distanza di volo e la corrispondente parabola sono pure definiti:

- in tempo di volo secondo la relazione

$$t = \frac{D}{V_0 \cos \alpha}$$

dove: $V_0 =$ velocità iniziale della traiettoria;

$\alpha =$ angolo iniziale della traiettoria calcolato rispetto al piano orizzontale; esso sarà positivo se questo è rivolto verso il basso, negativo se rivolto verso l'alto;

- l'angolo Θ di impatto rispetto al versante

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{Dg}{V_0^2 \cos^2 \alpha} + \operatorname{tga} \right)$$

- la velocità di impatto (V_i)

$$V_i = \sqrt{V_0^2 + 2g(tV_0 \operatorname{sen} \alpha + \frac{1}{2}gt^2)}$$

- la velocità di uscita (V) dopo l'impatto secondo la (2).

L'operatore ha la possibilità di scegliere tra le routines presentate quella che meglio si adatta alle più probabili condizioni di scoscendimento, procedendo in questo modo per tutti i tratti in cui è stato schematizzato il versante, fino a che:

- il grave si arresta all'interno di un tratto di versante schematizzato (il programma fornisce la distanza dal termine dell'ultimo tratto di versante considerato);
- il grave esce dall'ultimo tratto di versante schematizzato (il programma fornisce la velocità di uscita).

3. Verifica del programma

La disponibilità di dati relativi a scoscendimento di blocchi rocciosi lungo versanti per casi realmente accaduti, ha permesso il controllo del programma e in particolare la taratura dei coefficienti di restituzione all'urto e degli angoli di attrito masso-versante, relativi a pendii costituiti da materiale con caratteristiche tecniche diverse.

Gli esempi utilizzati si riferiscono a profili di pendii con indicate le zone di distacco, il punto di arresto dei blocchi più so-

pravanzati, e quando molto evidenti, le zone di impatto dei blocchi di caduta. La casistica è stata ricavata dai profili realizzati da Govi e Sorzana (1977) relativi a frane causate dal terremoto del Friuli del 1976, da quelli forniti dalla Provincia Autonoma di Trento, e da numerosi altri esempi reperiti in bibliografia.

La simulazione di caduta massi effettuata con questo programma, utilizzando i profili citati, ha condotto alla constatazione che l'equazione (2) relativa al calcolo della velocità dopo il rimbalzo, non soddisfa i parametri della traiettoria desunti dal-

le osservazioni di campagna, poiché le velocità calcolate all'uscita di ciascun tratto di versante risultano troppo elevate. Ciò è dovuto all'espressione che penalizza esclusivamente la componente verticale della velocità. Questo fatto comporta l'impossibilità di rendere nulla la velocità di un masso che si muove per soli rimbalzi anche nel caso di assorbimento totale dell'energia che si genera nell'urto (coefficiente di restituzione eguale a zero). Si è reso quindi necessario ridurre nella (2) anche la componente orizzontale secondo la nuova espressione:

$$V_n = \sqrt{(V \sin \theta)^2 J + (V \cos \theta)^2 (J 0,3 \log J)} \quad (6)$$

che effettua una correzione del coefficiente di restituzione all'urto in modo inversamente proporzionale alla sua grandezza.

Questa formula ha permesso una più realistica valutazione dei valori del coefficiente di restituzione per i casi esaminati, utilizzando i valori normalmente citati in letteratura (nota 1).

Nelle figg. 3a, 3b, vengono illustrate le traiettorie di caduta di un masso secondo il programma descritto (allegato 1) rappresentato per mezzo di una stampante (printer-plotter). In esse sono anche riportate i valori delle ascisse e ordinate dei vertici dei tratti in cui è stato diviso il versante, la loro inclinazione, gli angoli di attrito blocco-versante e i coefficienti di restituzione. Vengono anche riportati (a sinistra) le modalità e i parametri essenziali relativi alle traiettorie di ciascun tratto di caduta e precisamente:

- il tipo di caduta e il tratto di versante corrispondente;

- la velocità del blocco all'inizio e all'uscita di ciascun tratto;
- gli angoli di arrivo e di uscita;
- i tempi di volo;
- la lunghezza dei voli.

I parametri fisici del blocco e quelli inerenti alla sua caduta, permettono di calcolare la sua energia cinetica in ogni punto della traiettoria e quindi dimensionare le opere di difesa più opportune (Bertozzi e Broili, 1979; Broili, 1979; ISMES, 1977).

Particolare attenzione va posta nella fase di schematizzazione del versante. Infatti, sulla base di numerosi esempi si è osservato che all'aumentare del numero di tratti in cui viene suddiviso il pendio, corrisponde una variazione dei parametri di caduta.

In particolare all'accresciuto frazionamento del profilo, corrisponde una variazione della velocità terminale del masso secondo una relazione del tipo (fig. 3a):

$$V = Ae^{(-BN)} \quad (7)$$

dove V = velocità terminale;

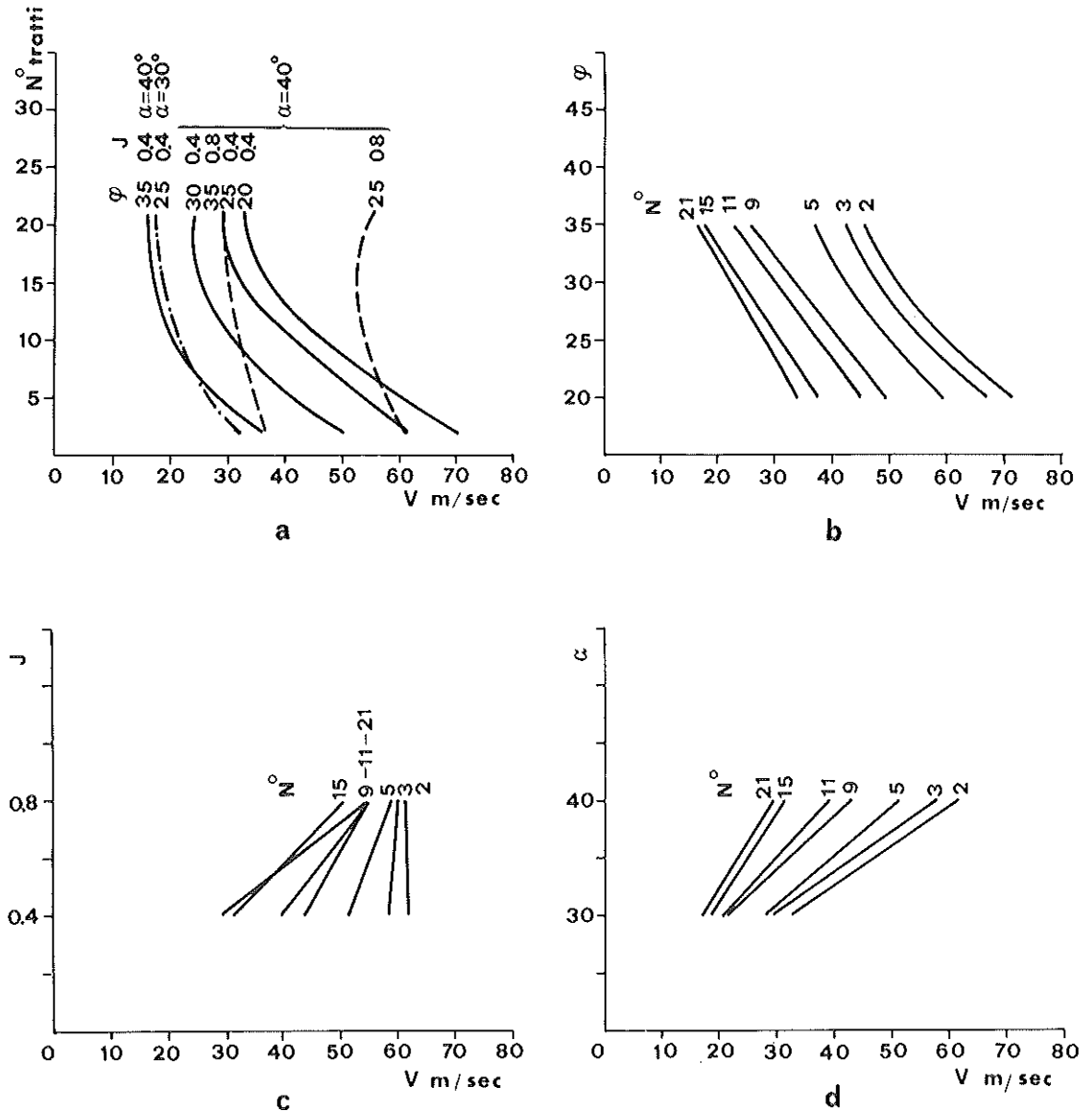
N = numero dei tratti;

A, B = coefficienti legati ai valori degli angoli di attrito (μ) e al coefficiente di restituzione (J).

Come conseguenza si è pure osservato che la velocità terminale, in relazione all'angolo di attrito masso-versante, decresce in modo quasi lineare all'aumentare di quest'ultimo e del numero di tratti (fig. 2b), mentre se si considera il coefficiente di smorzamento, la velocità decresce meno

rapidamente per valori più elevati di questo (fig. 2c). Analogamente prove eseguite con inclinazioni del versante diverse, comportano una diminuzione della velocità terminale al diminuire della pendenza (fig. 2d), diminuzione che si mostra sempre più sensibile al diminuire del numero di tratti.

Fig. 2: diagramma sulle variazioni delle velocità terminali di un blocco, relative allo stesso versante suddiviso in un numero di tratti variabili: a) in funzione del numero di tratti, b) in funzione dell'angolo di attrito masso-versante, c) in funzione al coefficiente di restituzione all'urto, d) in funzione dell'inclinazione del versante.



1) Dalla sperimentazione è emerso (Broili, 1979) che i valori del coefficiente di restituzione all'urto assumono valori compresi tra 0,75 e 0,8 per impatti su materiale lapideo, e tra 0,2 e 0,35 per impatti su materiali terroso-detritici. Per quanto riguarda invece le altezze della parabole e le massime velocità raggiun-

gibili dai blocchi, è stato osservato che queste sono in funzione delle loro dimensioni. È quindi necessario stabilire in campagna, per simulare in modo più fedele possibile il fenomeno di caduta, oltre alle caratteristiche del terreno anche le dimensioni più probabili dei massi rocciosi che possono scendere.

```

0: prt "PROGPAI. POCIOLAMENTO SALTO MASSI";sfq 14;spc ;spc ;ldk 25
1: dim A[6,30],L[6,30],C[2,2000],D[7,85]
2: ent "No TRATTI VERSCANTE",r1;r1+r41
3: for I=1 to r1
4: ent "ANGOLO ATTRITO",A[5,I],"COEFFICIENTE FESTITUZIONE",A[6,I]
5: next I
6: ent "SCALA",r1;r1+r35
7: ent "INGRESSO DATI DA TASTIERA? si=1",r40;if r40=1;c11 'ING.DATI';jmg 2
8: red 4,X,Y;X*2.54+X;Y*2.54+Y;1+N+M;X*r1/100+A[1,N];Y*r1/100+A[2,N];jmp C
9: 0+X+Y+N+r1
10: for I=1 to 29
11: if A[1,I+1]#0;if A[2,I+1]#0;c11 'CALC. ANG. VERS. DIST.';1+r34+r34
12: next I;0+1
13: ara A+B+B;1+I
14: c11 'TIPO CADUTE';jmp 0
15: 0+U+V+V+X+Y+H;ldf 26,DS;c11 'TITOLO';c11 'STAMPA'
16: end
17: "CALC. ANG. VERS. DIST.":
18: A[1,I+1]-A[1,I]+r1+A[4,I];A[2,I+1]-A[2,I]+r2;abs(r2)+r2
19: atn(r2/r1)+A[3,I];0+r1+r2
20: ret
21: "TIPO CADUTE":
22: ent "P.CR.=1;P.ROT.=2;ROT.=3;RIMB.=4",Z
23: if Z=1;c11 'PARTENZA CROLLO';I+1+I
24: if Z=2;c11 'PARTENZA ROTOLAMENTO';I+1+I
25: if Z=3;c11 'INC.I';c11 'ROTOLAMENTO';c11 'INC.II';0+r12
26: if Z=4;c11 'INC.I';c11 'RIMBALZO';c11 'INC.II';0+r12
27: ret
28: "PARTENZA CROLLO":prt "CROLLO-I",I;A[6,I+1]+J;4+r13
29: A[2,I]-A[2,I+1]+r1;sqrt(2*9.81*r1)+V
30: 90-A[3,I+1]+0;sqrt((Vsin(0))^2*J+(Vcos(0))^2*(J*.2^log(J)))+V
31: prt "ANG.INC.",0
32: prt "V USC.CRO.",V
33: c11 'GRAFICA PETTA';0+r1+r2+J;spc
34: ret
35: "PARTENZA ROTOLAMENTO":prt "PART.ROT.-I",I;A[5,I]+M;5+r13
36: if M>A[3,I];prt "NON PARTE-DIM.ANGOLO ATTRITO";stp
37: sqrt(10/7*9.81*A[4,I](tan(A[3,I])-tan(M)))+V;A[3,I]+0
38: prt "V USC.",V;0+M;spc
39: c11 'GRAFICA RETTA'
40: if A[3,I+1]>A[3,I];c11 'SALTO'
41: ret
42: "ROTOLAMENTO":prt "ROTOL.-I",I;1+r13
43: A[6,I]+J;A[5,I]+M;J*.2^log(J)+r40
44: if r12=2;sqrt((Vsin(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*J+(Vcos(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*r40)+V
45: if r12=8;sqrt((Vsin(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*J+(Vcos(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*r40)+V
46: 10/7*9.81*A[4,I]*(tan(A[3,I])-tan(M))+r8
47: if V^2+r8>0;sqrt(V^2+r8)+V;jmp 3
48: V^2/(10/7*9.81*(tan(A[3,I])-tan(M)))+D
49: c11 'AUS.II';c11 'GRAFICA RETTA';stp
50: prt "V USC.ROT.",V;spc
51: c11 'GRAFICA RETTA';0+J+M
52: if A[3,I+1]>A[3,I];c11 'SALTO'
53: ret
54: "RIMBALZO":prt "RIMBALZO-I",I;2+r13
55: A[5,I]+M;A[6,I]+J;J*.2^log(J)+r40
56: if r12=1;sqrt((Vsin(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*J+(Vcos(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*r40)+V
57: if r12=8;sqrt((Vsin(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*J+(Vcos(A[3,I-1]-A[3,I]))^2*r40)+V
58: if r12=1;A[3,I-1]-A[3,I]+0
59: if r12=8;A[3,I-1]-A[3,I]+0
60: A[3,I]+H
61: if H<=0;0-H+C;-C+C;jmp 2
62: H-0+C
63: (tan(H)-tan(C))/(9.81/(2V^2*cos(C)^2))+D+P
64: prt "ANG.INC.",0
65: prt "V IN.RIMB.",V
66: prt "DIST.RIM.",D
67: if D<A[4,I];3+r14;C+G;c11 'PARAMETRI';0+J+r14;jmp 2
68: 1+r7;c11 'SALTO';0+r7
69: ret
70: "SALTO":prt "SALTO-I",I;I+r1
*10989

```

```

71: if r13=1 or r13=5;r1+l+r1;l+r15
72: if r13=2;l+r16;gto 79
73: 3+r13
74: A[3,I+1]→H;A[3,I]→G
75: (tan(H)-tan(G))/(9.81/(2V^2*cos(G)^2))+D
76: prt "DIST.SALTO",D,"LUNG.VERS.",A[4,I+1]
77: if D<A[4,I+1];l+r14;c11 'PARAMETRI';ret
78: l+I→I;l+r16
79: prt "I****",I
80: A[1,I+2]-A[1,r1]+r3
81: A[2,r1]-A[2,I+2]+r4
82: r3*tan(A[3,I+1])+r5
83: r5-r4+Q;-Q+Q
84: c11 'AUS.III';if r7=1;C+G;2+r14
85: A[3,I+1]→H
86: tan(H)-tan(G)+√((tan(G)-tan(H))^2+2Q*9.81/(V^2*cos(G)^2))+r6
87: r6/(9.81/V^2*cos(G)^2)+D
88: tan(H)-tan(G)-√((tan(G)-tan(H))^2+2Q*9.81/V^2*cos(G)^2)+r6
89: r6/(9.81/V^2*cos(G)^2)+L
90: prt "D",D,"L",L
91: prt "L.VERS.",r3
92: if D<=r3;if D>r3-A[4,I+1];3+r13;c11 'PARAMETRI';0+r16+r14;ret
93: if L<=r3;if L>r3-A[4,I+1];L+D;3+r13;c11 'PARAMETRI';0+r16+r14;ret
94: gto 78
95: "PARAMETRI":prt "PARAMETRI-I",I;V+r15;A[6,I]+J;A[5,I]+M
96: prt "ANG.PART.",G
97: D/Vcos(G)+T
98: atn(D*9.81/V^2*cos(G)^2+tan(G))+O;O-H→O
99: T*Vsin(G)+.5*9.81*T^2+r10
100: √(V^2+2*9.81*r10)+V+r11
101: √((Vsin(O))^2*J+(Vcos(O))^2*(J*.2^log(J)))+V
102: c11 'GRAFICA PARABOLA'
103: prt "TEMPO VOLO",T
104: prt "AN.IN.VER.",O
105: prt "V ARRIVO",r11
106: prt "V USCITA",V;0+r10+r23
107: c11 'RIFACIMENTO COORDINATE';0+r15
108: spc;ret
109: "INC.I":
110: if r13=1;if Z=4;l+r12;ret
111: if r13=1 and Z=3;2+r12;ret
112: if r13=2 and Z=4;3+r12;ret
113: if r13=2 and Z=3;4+r12;ret
114: if r13=3 and Z=4;5+r12;ret
115: if r13=3 and Z=3;6+r12;ret
116: if r13=5 and Z=4;l+r12;ret
117: if r13=5;8+r12;ret
118: "INC.II":
119: if r13=1 and Z=4;I+1→I;ret
120: if r13=1 and Z=3;I+1→I;ret
121: if r13=2 and Z=4;ret
122: if r13=2 and Z=3;ret
123: if r13=3 and Z=4;I+1→I;ret
124: if r13=3 and Z=3;I+1→I;ret
125: "RIFACIMENTO COORDINATE":prt "RIF.COORD-I",I
126: if r13=2;I-1→F
127: if r13=3;I→F
128: A[1,F+2]+r23;A[2,F+2]+r24;A[1,F+1]+r10;A[2,F+1]+r8;c11 'AUS.I'
129: ((r24-r8)*r25+r8*r23-r10*r24)/(r23-r10)+r26
130: r25→A[1,F+1];r26→A[2,F+1];A[1,F+2]-r25→A[4,F+1]
131: ret
132: "GRAFICA RETTA":
133: if r17#0;C[2,r17]→r9
134: A[1,I]+r19;A[1,I+1]+r20
135: A[2,I]+r21;A[2,I+1]+r22;√((r20-r19)^2+(r22-r21)^2)+r30
136: r20-r19→r27;r21-r22→r28;r19*r22-r20*r21→r29
137: if r33=1;A[1,I+1]-D→r20
138: for R=r19 to r20 by (r20-r19)/r30
139: (-r28*R-r29)/r27+C[1,l+r17+r17];R+r9-r19+C[2,r17]
140: next R
*15450

```



```

141: ret
142: "GRAFICA PARABOLA":
143: C[1,r17]+r18;if r17#0;C[2,r17]+r9
144: if r14=1;A[3,I]+r31;jmp 3
145: if r14=2;G+r31;ent "CORR.GRAF.ANG.GRADI(+)",A;r31+A+r31;0+A;jmp 2
146: if r14=3;C+r31;ent "CORR.GRAF.ANG.GRADI(+)",A;r31+A+r31;0+A
147: for R=0 to D by .5
148: -(R*tan(r31)+(9.81/(2*r15^2*cos(r31)^2))R^2)+r18+C[1,1+r17+r17]
149: r9+R+C[2,r17]
150: next R
151: 0+r14;ret
152: "AUS.I":
153: if r16=1;A[1,r1]+D+r25;ret
154: A[1,F+1]+D+r25;ret
155: "AUS.II":
156: A[1,I+1]-(-D+A[1,I])+D;prt "DIS.FINE",D
157: 1+r33;ret
158: "AUS.III":
159: if r15=1;r1-1+r1;0+r7;2+r14
160: A[3,r1]+G;c11 'AUS.IV';ret
161: "AUS.IV":
162: if r13=2;ret
163: r1+1+r1;ret
164: "TITOLO":
165: fmt 1,c1,z
166: for I=7 to 1 by -1;for J=1 to 85
167: wrt 6.1,D$(I,J,J)
168: next J;wtb 6,10,13;next I
169: wtb 6,10,13
170: for I=1 to 8;wtb 6,27,10;next I
171: for I=7 to 1 by -1;for J=1 to 85
172: if num(D$(I,J,J))=77;"X"+D$(I,J,J)
173: wrt 6.1,D$(I,J,J);next J;wtb 6,10,13;next I
174: for I=1 to 7;wtb 6,27,10;next I
175: ret
176: "STAMPA":
177: for I=1 to 29;if A[1,I]#0;A[1,I]*100/r35+A[1,I];A[2,I]*100/r35+A[2,I]
178: next I
179: csv;6+r0;0+r17
180: for I=1 to 29;if A[1,I]#0;A[1,I]+B;A[2,I]+C
181: next I;B-A[1,1]+B;A[2,1]-C+C
182: c11 'form'(13.2,11,11)
183: c11 'psiz'(C/2.54,B/2.54,0,0)
184: c11 'scl'(0,B/2.54,0,C/2.54)
185: c11 'xaxis'(0,0,0,B/2.54)
186: c11 'yaxis'(0,0,0,C/2.54)
187: c11 'move'(0,0)
188: for I=1 to 2000;if C[1,I]#0;C[1,I]*100/r35+C[1,I];C[2,I]*100/r35+C[2,I]
189: next I
190: for I=1 to 2000
191: l+S+S
192: C[2,I]+r32;r32/2.54+r32
193: if C[1,I]#0;(C[1,I]-(C[1,1]-C))/2.54+E;c11 'plt'(r32,E,46)
194: next I
195: c11 'PENDIO'
196: ret
197: "PENDIO":c11 'move'(0,0)
198: ina A;ara A+B+A
199: for I=1 to 29;if A[1,I]#0;A[1,I]*100/r35+A[1,I];A[2,I]*100/r35+A[2,I]
200: next I
201: 0+r17+S+M
202: for I=1 to 29
203: if A[2,I]#0;A[2,I]+r17
204: next I
205: for I=1 to 29
206: if A[2,I]#0;c11 'plt'((A[1,I]-A[1,1])/2.54,(A[2,I]-r17)/2.54,111)
207: next I
208: c11 'move'(0,0)
209: for I=1 to 4;wtb 6,10,13,13;next I
210: fmt 1,f10.2,2x,z
*25717

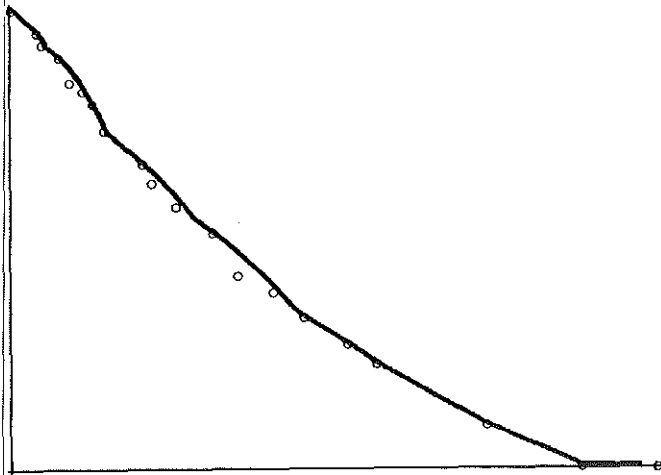
```

```

211: wrt 6,"MODELLO MECCANICO DI CADUTA DI GRAVI LUNGO UN VERSANTE"
212: wtb 6,10,13,13
213: wrt 6,"ASCISSE PUNTI VERSANTE (m)"
214: for I=1 to r34+1;wrt 6.1,B[1,I]-B[1,1];if I/5=int(I/5);wtb 6,10,13
215: next I
216: wtb 6,10,13,13;wtb 6,10,13
217: wrt 6,"ORDINATE PUNTI VERSANTE (m)"
218: for I=1 to r34+1;wrt 6.1,B[2,I]-B[2,r34+1];if I/5=int(I/5);wtb 6,10,13
219: next I
220: wtb 6,10,13,13;wtb 6,10,13
221: wrt 6,"ANGOLO TRATTI VERSANTE (gradi)"
222: for I=1 to r34;wrt 6.1,B[3,I];if I/5=int(I/5);wtb 6,10,13
223: next I
224: wtb 6,10,13,13;wtb 6,10,13
225: wrt 6,"ANGOLO DI ATTRITO TRATTI VERSANTE"
226: for I=1 to r34;wrt 6.1,B[5,I];if I/5=int(I/5);wtb 6,10,13
227: next I
228: wtb 6,10,13,13;wtb 6,10,13
229: wrt 6,"COEFFICIENTE DI SMORZAMENTO NELL'URTO TRATTI VERSANTE"
230: for I=1 to r34;wrt 6.1,B[6,I];if I/5=int(I/5);wtb 6,10,13
231: next I
232: wtb 6,10,13,13;wtb 6,10,13,13
233: wrt 6,"SCALA 1: ";fmt 2,7x,f6.0,z;wtb 6,27,10;wrt 6.2,r35
234: wtb 6,10,13
235: ret
236: "ING,DATI":
237: for I=1 to r41+1
238: ent "Xi m",A[1,I],"Yi m",A[2,I]
239: next I
240: ret
241: "move":
242: wtb r0,27,65,int((p1-X)U/64),int((p1-X)U),int((p2-Y)V/64),int((p2-Y)V)
243: ret
244: "plt":
245: wtb r0,27,65,int((p1-X)U/64),int((p1-X)U),int((p2-Y)V/64),int((p2-Y)V)
246: if p3=0;46+p3
247: if p3=46;wtb r0,27,82,0,0,0,6
248: wtb r0,p3;wtb r0,8
249: if p3=46;wtb r0,27,82,0,0,63,-6
250: ret
251: "psiz":
252: pl+H;p2+W
253: wtb r0,27,79,int(p4*120/64),p4*120,int(p3*96/64),p3*96
254: ret
255: "scl":
256: 120W/(p2-pl)+U
257: 96H/(p4-p3)+V
258: pl+X;p3+Y
259: ret
260: "xaxis":
261: wtb r0,27,46,95,0,5,9
262: if p3=0 and p4=0;X+p3;X+120W/U+p4
263: if p2=0;p4-p3+p2
264: wtb r0,27,65,int((p3-X)U/64),int((p3-X)U),int((p1-Y)V/64),int((p1-Y)V)
265: p3+p5;wtb r0,43;wtb r0,8
266: wtb r0,27,114,int(p2U/64),int(p2U),0,0;wtb r0,43,8;jmp (p5+p2+p5)>=p4
267: ret
268: "yaxis":
269: wtb r0,27,46,124,0,3,0
270: if p3=0 and p4=0;Y+p3;Y+96H/V+p4
271: if p2=0;p4-p3+p2
272: wtb r0,27,65,int((p1-X)U/64),int((p1-X)U),int((p3-Y)V/64),int((p3-Y)V)
273: p3+p5;wtb r0,43;wtb r0,8
274: wtb r0,27,114,0,0,int(p2V/64),int(p2V);wtb r0,43,8;jmp (p5+p2+p5)>=p4
275: ret
276: "form":
277: wtb r0,27,77
278: wtb r0,27,84
279: if pl=0;13.2*pl;11+p2+p3
280: wtb r0,27,87,int(120*pl/64),120*pl
281: wtb r0,27,76,int(96*p2/64),96*p2
282: wtb r0,27,70,int(96*p3/64),96*p3
283: ret
284: csv;for I=1 to 33;0+rI;next I
285: ina A;ina C;ara B+A+A;l>I;gto l4
*28968

```

Studio caduta massi



MODELLO MECCANICO DI CADUTA DI GRAVI LUNGO UN VERSANTE

ASCISSE PUNTI VERSANTE (m)				
0,00	27,94	34,29	52,07	66,04
80,01	91,44	104,14	146,05	157,48
182,88	222,25	248,92	288,29	322,58
370,84	402,59	524,51	628,65	711,20

ORDINATE PUNTI VERSANTE (m)				
510,54	483,87	469,90	455,93	427,99
419,10	403,86	374,65	337,82	316,23
290,83	261,62	213,36	195,58	167,64
138,43	115,57	48,26	2,54	0,00

ANGOLO TRATTI VERSANTE (gradi)				
43,67	65,56	38,16	63,43	32,47
53,13	66,50	41,31	62,10	45,00
36,57	61,07	24,30	39,17	31,18
35,75	28,90	23,70	1,76	

ANGOLO DI ATTRITO TRATTI VERSANTE				
20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
20,00	20,00	33,00	33,00	33,00
33,00	33,00	33,00	33,00	

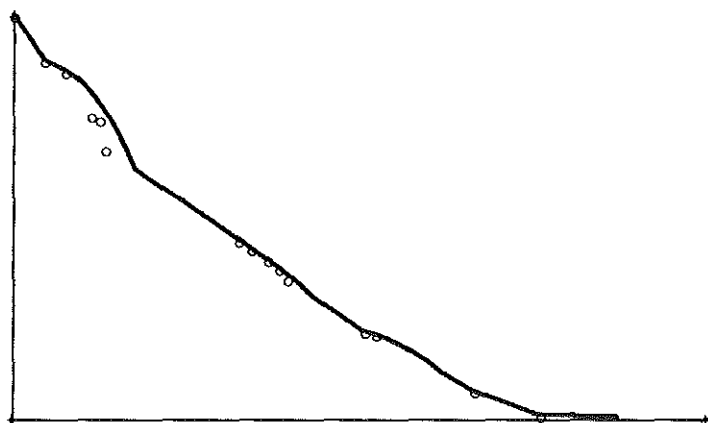
COEFFICIENTE DI SMORZAMENTO NELL'URTO TRATTI VERSANTE				
0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
0,80	0,80	0,30	0,30	0,30
0,30	0,30	0,30	0,30	

SCALA 1: 5000

PARAMETRI-I			
PART.ROT.-I	1,00	ANG.PART.	10,00
V USC.	15,21	TEMPO VOLO	41,31
SALTO-I	1,00	AN.IN.VER.	15,01
DIST.SALTO	30,72	V ARRIVO	59,75
LUNG.VERS.	6,35	V USCITA	57,46
I****	2,00	RIF.COORD-I	10,00
D	12,95	ROTOL.-I	11,00
L	-17,11	V USC.ROT.	58,35
L.VERS.	24,13	SALTO-I	11,00
PARAMETRI-I	2,00	DIST.SALTO	477,95
ANG.PART.	43,67	LUNG.VERS.	26,67
TEMPO VOLO	1,18	I****	12,00
AN.IN.VER.	25,33	D	77,97
V ARRIVO	24,64	L	-207,94
V USCITA	23,51	L.VERS.	66,04
RIF.COORD-I	2,00	I****	13,00
ROTOL.-I	3,00	D	92,08
V USC.ROT.	24,87	L	-59,46
SALTO-I	3,00	L.VERS.	100,73
DIST.SALTO	94,70	PARAMETRI-I	13,00
LUNG.VERS.	13,97	ANG.PART.	36,57
I****	4,00	TEMPO VOLO	1,97
D	33,16	AN.IN.VER.	3,90
L	-44,81	V ARRIVO	71,53
L.VERS.	27,94	V USCITA	59,17
I****	5,00	RIF.COORD-I	13,00
D	41,92	ROTOL.-I	14,00
L	0,79	V USC.ROT.	59,33
L.VERS.	39,37	ROTOL.-I	15,00
I****	6,00	V USC.ROT.	48,92
D	81,09	SALTO-I	15,00
L	37,01	DIST.SALTO	40,97
L.VERS.	52,07	LUNG.VERS.	31,75
I****	7,00	I****	16,00
D	56,39	D	35,14
L	-49,13	L	-54,15
L.VERS.	-93,98	L.VERS.	153,67
PARAMETRI-I	7,00	PARAMETRI-I	16,00
ANG.PART.	38,16	ANG.PART.	31,18
TEMPO VOLO	2,88	TEMPO VOLO	0,94
AN.IN.VER.	24,56	AN.IN.VER.	9,63
V ARRIVO	47,83	V ARRIVO	53,15
V USCITA	45,67	V USCITA	44,15
RIF.COORD-I	7,00	RIF.COORD-I	16,00
ROTOL.-I	8,00	ROTOL.-I	17,00
V USC.ROT.	48,55	V USC.ROT.	42,53
SALTO-I	8,00	ROTOL.-I	18,00
DIST.SALTO	273,89	V USC.ROT.	20,78
LUNG.VERS.	11,43	L	-93,89
I****	9,00	L.VERS.	76,00
D	71,43	ROTOL.-I	19,00
L	-38,57	DIST.FINE	13,55
L.VERS.	36,82		
I****	10,00		
D	56,79		
L	-93,89		
L.VERS.	76,00		

Fig. 3: esempi di scoscentimenti di massi lungo un versante riferiti a due profili da Govi a Sorzana (1977);

Studio caduta massi



MODELLO MECCANICO DI CADUTA DI GRAVI LUNGO UN VERSANTE

ASCISSE PUNTI VERSANTE (m)				
0.00	34.29	57.15	86.36	95.25
101.60	248.92	262.89	280.67	293.37
302.26	387.35	400.05	509.27	582.93
765.81				

ORDINATE PUNTI VERSANTE (m)				
447.04	396.24	384.81	335.28	331.47
298.45	198.12	187.96	176.53	167.64
154.94	97.79	93.98	31.75	5.08
0.00				

ANGOLO TRATTI VERSANTE (gradi)				
55.98	26.57	59.47	23.20	79.11
34.26	36.03	32.74	34.99	55.01
33.89	16.70	29.67	19.90	1.59

ANGOLO DI ATTRITO TRATTI VERSANTE				
20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
31.00	31.00	31.00	31.00	31.00

COEFFICIENTE DI SMORZAMENTO NELL'URTO TRATTI VERSANTE				
0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
0.38	0.38	0.38	0.38	0.38

SCALA 1: 5000

PROGRAM. ROTOLAM ENTO SALTO MASSI	ROTOL.-I 8.00 V USC.ROT. 45.00
PART.ROT.-I 1.00 V USC. 23.17	SALTO-I 8.00 DIST.SALTO 16.23 LUNG.VERS. 12.97 I**** 9.00 D 219.00 L 12.25 L.VERS. 21.59 I**** 10.00 D 50.00 L -41.00 L.VERS. 106.60 PARAMETRI-I
ROTOL.-I 2.00 V USC.ROT. 22.98	ANG.PART. 32.74 TEMPO VOLO 1.00 AN.IN.VER. 10.00 V ARRIVO 53.00 V USCITA 45.00 RIF.COORD-I
SALTO-I 2.00 DIST.SALTO	103.01 LUNG.VERS. 29.21 I**** 3.00 D 53.47 L -59.63 L.VERS. 38.10 I**** 4.00 D 371.32 L 33.59 L.VERS. 44.45 I**** 5.00 D 77.75 L -62.15 L.VERS. 191.77 PARAMETRI-I 5.00 ANG.PART. 26.57 TEMPO VOLO 3.78 AN.IN.VER. 32.29 V ARRIVO 51.65 V USCITA 48.90 RIF.COORD-I 5.00
ROTOL.-I 6.00 V USC.ROT. 58.20	ROTOL.-I 11.00 V USC.ROT. 46.00
SALTO-I 6.00 DIST.SALTO 16.23 LUNG.VERS. 13.97 I**** 7.00 D 14.72 L -28.12 L.VERS. 31.75 PARAMETRI-I 7.00 ANG.PART. 34.26 TEMPO VOLO 0.35 AN.IN.VER. 4.68 V ARRIVO 52.23 V USCITA 45.08 RIF.COORD-I 7.00	ROTOL.-I 12.00 V USC.ROT. 38.00
	SALTO-I 12.00 DIST.SALTO 74.60 LUNG.VERS. 109.21 PARAMETRI-I
	ROTOL.-I 12.00 V USC.ROT. 41.00
	ROTOL.-I 13.00 V USC.ROT. 41.00
	ROTOL.-I 14.00 V USC.ROT. 31.00
	ROTOL.-I 15.00 DIS.FINE 94.00

4. Considerazioni conclusive

Risulta oltremodo difficile determinare in campagna l'esatta traiettoria dei massi in caduta lungo un versante. Avendo infatti assai raramente a disposizione casi di scoscendimento di blocchi isolati, si ha una oggettiva difficoltà nel discernere tra gli impatti quelli relativi ad uno solo di essi.

Ne consegue che il programma elaborato ed in particolare gli esempi riportati (figg. 2a, 2b) non devono essere considerati come una fotografia delle condizioni di caduta di un masso, ma una simulazione approssimata, in quanto è impensabile riprodurre in modo esatto il profilo topografico del versante ed individuare con assoluta precisione le caratteristiche tecniche dei materiali interessati al movimento. Infatti una variazione di giacitura del versante irrilevabile anche a grande scala, o locali disomogeneità del materiale soggetto ad impatto, possono produrre sensibili cambiamenti nella traiettoria del blocco. Ciò non toglie che ad una maggiore fedeltà di

riproduzione di questi parametri corrisponda una più verosimile simulazione delle cadute.

La taratura del programma, sulla base di quanto sovraesposto, è stata effettuata ponendo particolare attenzione nel far coincidere il punto di arresto dei blocchi più sopravanzati, desumibili con certezza dai rilievi di campagna, con quanto simulato dal programma. In questo modo si ottiene una coincidenza, nelle ipotesi di caduta più favorevoli, per i valori di angolo di attrito medio del versante e per la distribuzione delle velocità lungo il pendio.

dott. Giuseppe Bassato

Istituto di Selvicoltura
Facoltà di Agraria
Università degli Studi di Padova

dott. Saverio Cocco

Servizio Geologico della Provincia
Trento

dott. Sandro Silvano

Istituto di Geologia Applicata
C.N.R. Padova

BIBLIOGRAFIA

- BASSATO G., SILVANO S., 1981. *Definizione delle condizioni di instabilità di un ammasso roccioso per mezzo di programmi adatti per personal computers*. Ass. Mineraria Subalpina, XVII, 3-4, Torino.
- BASSATO G., DE FLORENTIS N., SILVANO S., 1982. *Algoritmo per la digitalizzazione di carte topografiche per mezzo di personal computers*. Atti Acc. Scienze, Ferrara.
- BASSATO G., RUZZIER D., SILVANO S., 1983. *Data base geologico-strutturale e programma per il calcolo del grado di franosità di versanti rocciosi*. Studi Trentini Sc. Nat., Acta Geologica, 60, Trento.
- BERTOZZI E., 1979. *La descrizione e la quantificazione dei parametri morfologici e geomeccanici. Lo studio dei processi di scoscendimento massi*. Rass. Tecnica del Friuli Venezia Giulia, Udine.
- BERTOZZI E., BROLLI L., 1979. *Considerazioni e criteri di progettazione delle opere di difesa nei processi di scoscendimento massi*. Atti 69° Congresso SGI, Perugia.
- BERTOZZI E., ONOFRI R., 1978. *Considerazioni tecnico e pratiche sui fenomeni franosi verificatisi lungo i versanti del Colle di Osoppo (Udine) durante i sismi del 1976*. Mem. Soc. Geol. It., 19, Roma.
- BROILI L., 1978. *Il problema dello scoscendimento massi in relazione agli eventi sismici*. Atti Cong. ANGI, Perugia.
- BROILI L., 1979. *La progettazione delle strutture paramassi nella programmazione dell'utilizzo del territorio*. Rass. Tec. Friuli Venezia Giulia, Udine.
- FLEURY A., MATHIEU J.P., 1970. *Trattato di fisica generale e sperimentale*. Vol. 1, Zanichelli, Bologna.
- ISMES, 1977. *La dinamica di cadute delle masse rocciose e l'efficacia delle opere di protezione*. 90, Bergamo.
- PAIOLA A., 1978. *Movimenti franosi in Friuli: comportamento dei corpi che cadono su di un pendio e calcolo del limite di espansione potenziale*. Tecnica Italiana, 6.
- PAIOLA A., 1979. *Caduta massi nel comune di Villa Santina (UD) nel territorio compreso tra Borgo S. Antonio e Case Vineda e progetto di massima nelle relative opere di salvaguardia*. Inedito.