VERIFICHE DI CADUTA MASSI

CADUTA MASSI- CAVA RONCHI – BEVERINO (SP)

Traiettorie di blocchi in caduta lungo una scarpata

Il moto di caduta di un blocco lungo una scarpata rocciosa dipende da numerosi fattori che non è facile esprimere numericamente.

Le traiettorie dei blocchi dipendono dalla geometria della scarpata, dalla forma del blocco in caduta e dalla sua velocità iniziale al momento del distacco dal pendio, ed inoltre dall'entità dell'energia dissipata per effetto degli urti durante la caduta.

I blocchi in caduta possono, infatti, scivolare, rotolare o rimbalzare a valle a seconda della loro forma, appiattita o arrotondata, e della inclinazione del pendio.

L'energia dissipata per effetto degli urti è in genere diversa al variare delle caratteristiche del moto e dipende dalle caratteristiche meccaniche del blocco e dai materiali presenti lungo la scarpata (*roccia, terreno, vegetazione*) che si oppongono in misura differente al moto dei blocchi.

Nella realtà, tuttavia, è molto difficile determinare puntualmente il profilo di un pendio ed individuare la forma dei diversi blocchi che potrebbero distaccarsi.

Inoltre la geometria del pendio e la natura dei materiali affioranti subiscono nel tempo modifiche, anche sensibili, per effetto, dell'alterazione della roccia, per l'accumulo di detriti nelle zone meno acclivi e per lo sviluppo della vegetazione.

Infine, diviene praticamente impossibile modellare il moto di caduta dei blocchi nei casi in cui questi si frantumino per effetto degli urti, né è possibile individuare le zone del pendi in cui si verifica la frantumazione.

Metodo di calcolo CRSP

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 al metodo *Lumped mass*, 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, 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.

Dall'intersezione vengono ricavate le coordinate del punto di impatto. Il vettore della velocità di pre-impatto V, forma un angolo con il pendio.

Ad ogni impatto l'inclinazione del pendio viene fatta variare casualmente in un campo di valori compreso tra 0 ed un valore funzione della rugosità del pendio e dalla dimensione del blocco.

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

$$\left(\frac{1}{2}J\varpi_1^2+\frac{1}{2}MV_{t1}^2\right)\times f(F)\times SF=\frac{1}{2}J\varpi_2^2+\frac{1}{2}MV_{t2}^2 \qquad (1)$$

dove:

M = *Massa del blocco;*

J = *Momento d'inerzia del blocco;*

ω_1 = *Velocità angolare prima dell'impatto;*

ω_2 = *Velocità angolare dopo l'impatto;*

V_{t1} = *Velocità tangenziale prima dell'impatto;*
V_{t2} = *Velocità tangenziale dopo l'impatto;*

La funzione *f(F)* di attrito così definita:

$$f(F) = SF + \frac{(1 - R_t)}{\left[\left(\frac{V_{t1} - \varpi_1 \times R}{20}\right)^2 + 1.2\right]}$$

Mentre la funzione di scala *SF*:

$$SF = \frac{R_t}{\left[\left(\frac{V_{n1}}{250 \times R_n}\right)^2 + 1\right]}$$

Dove:
R_n = *Coefficienti di restituzione normale;*
R_t = *Coefficienti di restituzione tangenziale;*
R = *Raggio del blocco;*

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:

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

che assume che i blocchi abbandonino il contatto con il pendio ruotando, indipendentemente dalla velocità angolare precedente.
Dalla (1) si ottiene V_{t2}, mentre la velocità normale post-collisione viene ricavata dalla seguente espressione empirica:

$$V_{n2} = V_{n1} \times \frac{R_n}{\left[1 + \left(\frac{V_{n1}}{9}\right)^2\right]}$$

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.

CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

==========

Forma del blocco	Sferico		
Densità		2650.0	Kg/m³
Elasticità		32000.0	kPa
Velocità iniziale in x	3.0	m/s	
Velocità iniziale in y	-3.0	m/s	
Velocità limite di arresto	0.01	m/s	
Diametro	2.0	m	

==========

Massa	10890.85	Kg	
Peso	10890.85	Kgf	
Momento d'inerzia	4356.342	Kgxm2	

==========

Elenco materiali

N	Descrizione	Rn	Rt	Rugosità (m)	Texture
1	Roccia integra	0.9	0.8	0	
2	Roccia alterata	0.7	0.7	0	
3	Sabbia	0.4	0.6	0	
4	Detrito	0.6	0.6	0	
5	Detrito fino	0.32	0.82	0	
6	Detrito vegetato	0.29	0.8	0	
7	Detrito con arbusti	0.3	0.7	0	
8	Terreno o prato	0.31	0.79	0	
9	Superficie pavimentata	0.4	0.9	0	

DATI PENDIO

N	X (m)	Y (m)	Materiale
1	-317.75	205.35	Roccia integra
2	-306.12	208.67	Roccia integra
3	-300.9	213.89	Roccia integra
4	-288.57	215.08	Roccia integra
5	-276.23	213.42	Roccia integra
6	-272.3	208.06	Roccia integra
7	-264.96	207.73	Roccia integra
8	-259.62	193.71	Roccia integra
9	-254.28	193.38	Roccia integra
10	-247.27	177.36	Roccia integra
11	-240.26	176.69	Roccia integra
12	-229.25	157.0	Roccia integra
13	-224.38	156.95	Detrito
14	-223.68	158.45	Detrito
15	-222.68	158.45	Detrito
16	-222.24	157.0	Roccia integra
17	-221.93	156.95	Roccia integra
18	-211.9	137.65	Roccia integra
19	-207.38	137.72	Detrito
20	-206.68	139.22	Detrito
21	-205.68	139.22	Detrito
22	-204.93	137.72	Detrito
23	-204.55	137.65	Roccia integra
24	-192.21	116.29	Roccia integra
25	-158.57	116.47	Detrito
26	-157.87	117.97	Detrito
27	-156.87	117.97	Detrito
28	-156.12	116.47	Roccia integra
29	-153.49	116.29	Roccia integra
30	-143.82	98.6	Roccia integra
31	-138.73	98.59	Detrito
32	-138.03	100.09	Detrito
33	-137.03	100.09	Detrito
34	-136.28	98.59	Roccia integra
35	-135.14	98.6	Roccia integra
36	-127.8	81.58	Roccia integra
37	-122.36	81.72	Detrito
38	-121.66	83.22	Detrito
39	-120.66	83.22	Detrito
40	-119.91	81.72	Roccia integra
41	-119.12	81.25	Roccia integra

42	-108.44	61.56	Roccia integra
43	-103.15	61.48	Detrito
44	-102.45	62.98	Detrito
45	-101.45	62.98	Detrito
46	-100.76	61.56	Roccia integra
47	-100.7	61.48	Roccia integra
48	-92.75	43.87	Roccia integra
49	-87.09	43.6	Detrito
50	-86.39	45.1	Detrito
51	-85.39	45.1	Detrito
52	-84.64	43.6	Roccia integra
53	-84.08	43.53	Roccia integra
54	-74.4	23.51	Roccia integra
55	-36.11	23.12	Roccia integra
56	-33.97	25.02	Roccia integra
57	-27.09	24.78	Roccia integra
58	-26.14	26.21	Roccia integra
59	-24.01	26.21	Roccia integra
60	-12.14	18.38	Roccia integra
61	-2.41	17.19	Roccia integra
62	1.38	14.82	Roccia integra
63	5.65	14.82	Roccia integra

LANCIO – 1 – FASE 1(RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)

IMPATTO

==========

Lancio n° 1 Xp=-262.98 m yp=202.53 m

==========

Ni	xi(m)	yi(m)	vx(m/s)	vy(m/s)	t(s)	E(KJ)
1.0	-259.553	193.706	3.742	3.542	1.142	1167.394
2.0	-256.674	193.528	3.955	2.659	0.769	190.539
3.0	-254.333	193.383	4.11	2.12	0.592	170.335
4.0	-245.935	177.232	5.382	2.882	2.044	1876.355
5.0	-242.209	176.876	5.679	2.146	0.692	297.27
6.0	-229.698	157.802	10.383	-11.85	2.203	2303.32
7.0	-229.013	156.998	11.424	3.813	0.066	1954.9
8.0	-224.018	157.727	0.115	6.665	0.437	994.198
9.0	-223.867	158.05	0.634	4.897	1.308	288.125
10.0	-223.291	158.45	2.355	2.02	0.909	138.284
11.0	-220.618	154.426	5.0	-5.708	1.135	494.41
12.0	-216.629	146.749	6.89	-9.868	0.798	1252.055
13.0	-211.893	137.65	7.808	3.584	0.687	2071.11
14.0	-207.23	138.041	-0.878	4.55	0.597	494.841
15.0	-208.104	137.709	1.99	3.577	0.068	183.099
16.0	-207.12	138.278	-0.745	1.522	0.495	39.539
17.0	-207.512	137.718	0.755	2.85	0.217	77.961
18.0	-207.213	138.077	-0.327	0.867	0.396	10.336
19.0	-207.318	137.853	-0.009	1.73	0.143	29.548

==========

ELABORAZIONI STATISTICHE

==========

Velocità massima 20.276 m/s

Velocità minima 1.282 m/s

Velocità media 9.116 m/s

Scarto quadratico medio 6.106 m/s

Energia massima pre-impatto 2303.32 KJ

Energia media pre-impatto 738.612 KJ
Scarto quadratico energia 791.549 KJ
Ascissa media di arresto -207.318m
Ascissa massima raggiunta 0.0 m

% Massi fermati

X (m)	% Massi fermati
-262.98	0
-229.98	0
-196.98	100
-163.98	100
-130.98	100
-97.98	100
-64.98	100
-31.98	100
1.02	100

LANCIO – 2 FASE 1(RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)

IMPATTO

Lancio n° 2 Xp=-221.21 m yp=155.56 m

Ni	xi(m)	yi(m)	vx(m/s)	vy(m/s)	t(s)	E(KJ)
1.0	-218.761	150.852	5.899	-6.953	0.815	727.314
2.0	-213.472	140.675	7.946	-11.518	0.897	1712.151
3.0	-211.58	137.655	9.101	3.91	0.238	1808.915
4.0	-207.069	138.388	-0.452	5.506	0.496	638.784
5.0	-207.626	137.716	2.4	3.942	0.111	288.103
6.0	-207.083	138.357	-0.882	1.851	0.226	60.711
7.0	-207.609	137.717	0.918	3.042	0.219	95.02
8.0	-207.202	138.101	-0.394	1.076	0.443	15.91
9.0	-207.356	137.771	-0.008	2.088	0.172	43.848

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima 16.817 m/s
Velocità minima 1.597 m/s
Velocità media 7.932 m/s
Scarto quadratico medio 5.754 m/s
Energia massima pre-impatto 1808.915 KJ
Energia media pre-impatto 598.973 KJ
Scarto quadratico energia 707.958 KJ
Ascissa media di arresto -207.356m
Ascissa massima raggiunta 0.0 m

% Massi fermati

X (m)	% Massi fermati
-221.21	0
-188.21	100

-155.21	100
-122.21	100
-89.21	100
-56.21	100
-23.21	100

LANCIO – 3 FASE 1(RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)

IMPATTO

Lancio n° 3 Xp=-151.32 m yp=112.32 m

Ni	xi(m)	yi(m)	vx(m/s)	vy(m/s)	t(s)	E(KJ)
1.0	-149.006	108.088	5.911	-6.545	0.772	676.831
2.0	-143.862	98.676	7.964	-10.912	0.87	1589.367
3.0	-143.806	98.6	9.242	4.028	0.007	1392.703
4.0	-138.408	99.279	-0.548	5.309	0.584	666.647
5.0	-139.066	98.591	2.393	3.872	0.117	274.354
6.0	-138.405	99.286	-0.824	1.714	0.276	50.939
7.0	-138.891	98.59	0.942	3.055	0.24	97.158
8.0	-138.523	99.035	-0.404	0.788	0.392	10.102
9.0	-138.659	98.742	-0.039	1.899	0.177	36.136

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	16.2	m/s
Velocità minima	1.227	m/s
Velocità media	7.469	m/s
Scarto quadratico medio	5.335	m/s
Energia massima pre-impatto	**1589.367**	**KJ**
Energia media pre-impatto	532.693	KJ
Scarto quadratico energia	602.4	KJ
Ascissa media di arresto	-138.659	m
Ascissa massima raggiunta	0.0	m

% Massi fermati

X (m)	% Massi fermati
-151.32	0
-118.32	100
-85.32	100
-52.32	100
-19.32	100

LANCIO – 4 FASE 1(RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)

IMPATTO

Lancio n° 4 Xp=-203.34 m yp=135.56 m

Ni	xi(m)	yi(m)	vx(m/s)	vy(m/s)	t(s)	E(KJ)

1.0	-201.159	131.78	5.929	-6.117	0.727	628.002
2.0	-196.149	123.108	7.99	-10.282	0.845	1470.451
3.0	-191.92	116.292	8.926	3.645	0.529	2013.967
4.0	-185.373	116.327	8.743	2.85	0.733	676.805
5.0	-180.376	116.353	8.572	2.352	0.572	624.731
6.0	-176.346	116.375	8.408	1.996	0.47	588.415
7.0	-173.002	116.393	8.251	1.724	0.398	559.122
8.0	-170.176	116.408	8.098	1.506	0.342	533.84
9.0	-167.762	116.421	7.95	1.326	0.298	511.21
10.0	-165.682	116.432	7.807	1.174	0.262	490.509
11.0	-163.88	116.442	7.667	1.045	0.231	471.311
12.0	-162.311	116.45	7.53	0.933	0.205	453.337
13.0	-160.94	116.457	7.397	0.835	0.182	436.401
14.0	-159.74	116.464	7.266	0.75	0.162	420.364
15.0	-158.687	116.469	7.139	0.674	0.145	405.122
16.0	-158.566	116.479	-0.694	4.693	0.017	390.053
17.0	-159.231	116.467	2.095	3.366	0.003	158.067
18.0	-158.321	117.003	-0.711	1.518	0.434	37.977
19.0	-158.69	116.469	0.79	2.797	0.21	74.857
20.0	-158.4	116.835	-0.346	0.741	0.368	8.376
21.0	-158.504	116.611	-0.027	1.686	0.151	28.131

==========

ELABORAZIONI STATISTICHE

==========

Velocità massima	17.415	m/s
Velocità minima	1.131	m/s
Velocità media	7.793	m/s
Scarto quadratico medio	3.881	m/s
Energia massima pre-impatto	**2013.967**	**KJ**
Energia media pre-impatto	522.907	KJ
Scarto quadratico energia	464.149	KJ
Ascissa media di arresto	-158.504	m
Ascissa massima raggiunta	0.0	m

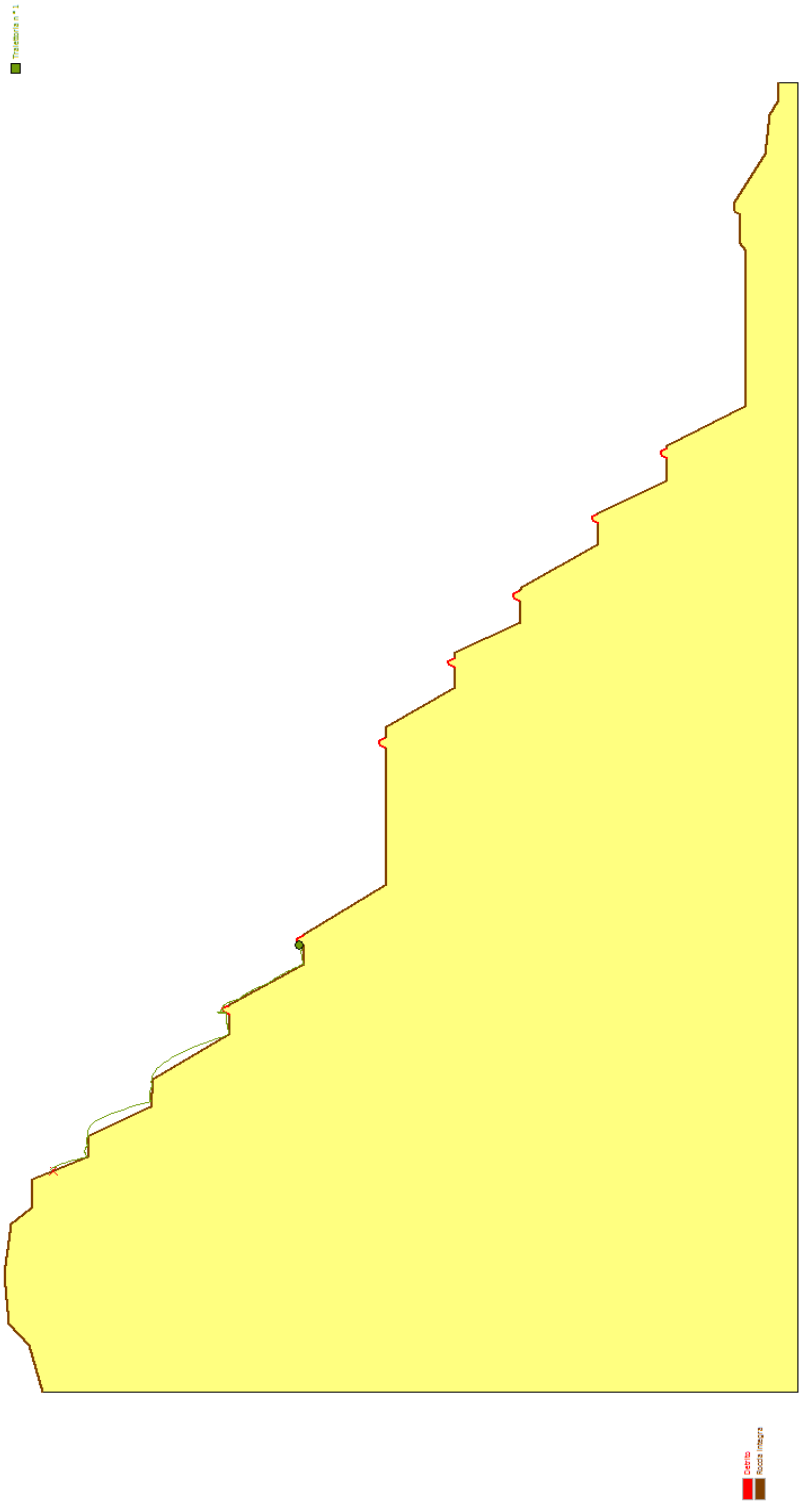
==========

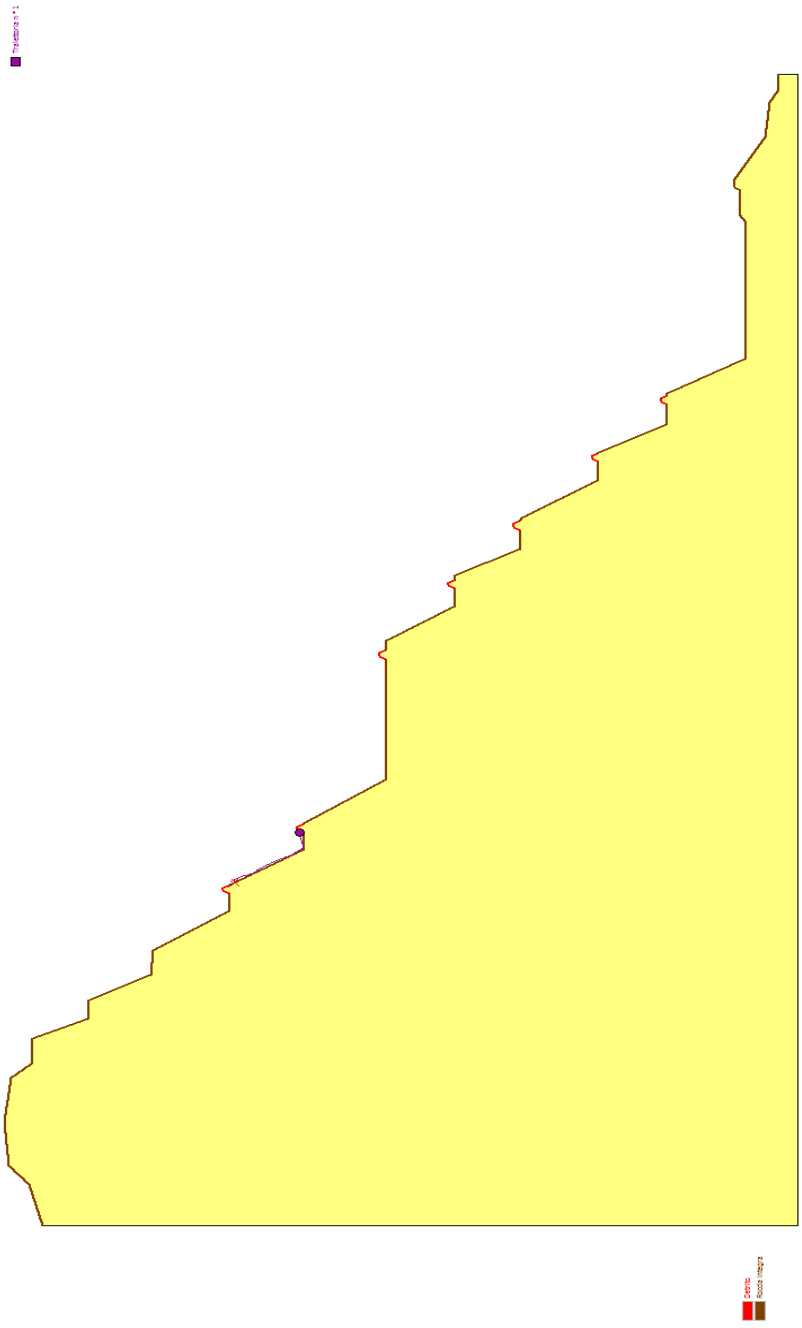
% Massi fermati

==========

X (m)	% Massi fermati
-203.34	0
-170.34	0
-137.34	100
-104.34	100
-71.34	100
-38.34	100
-5.34	100

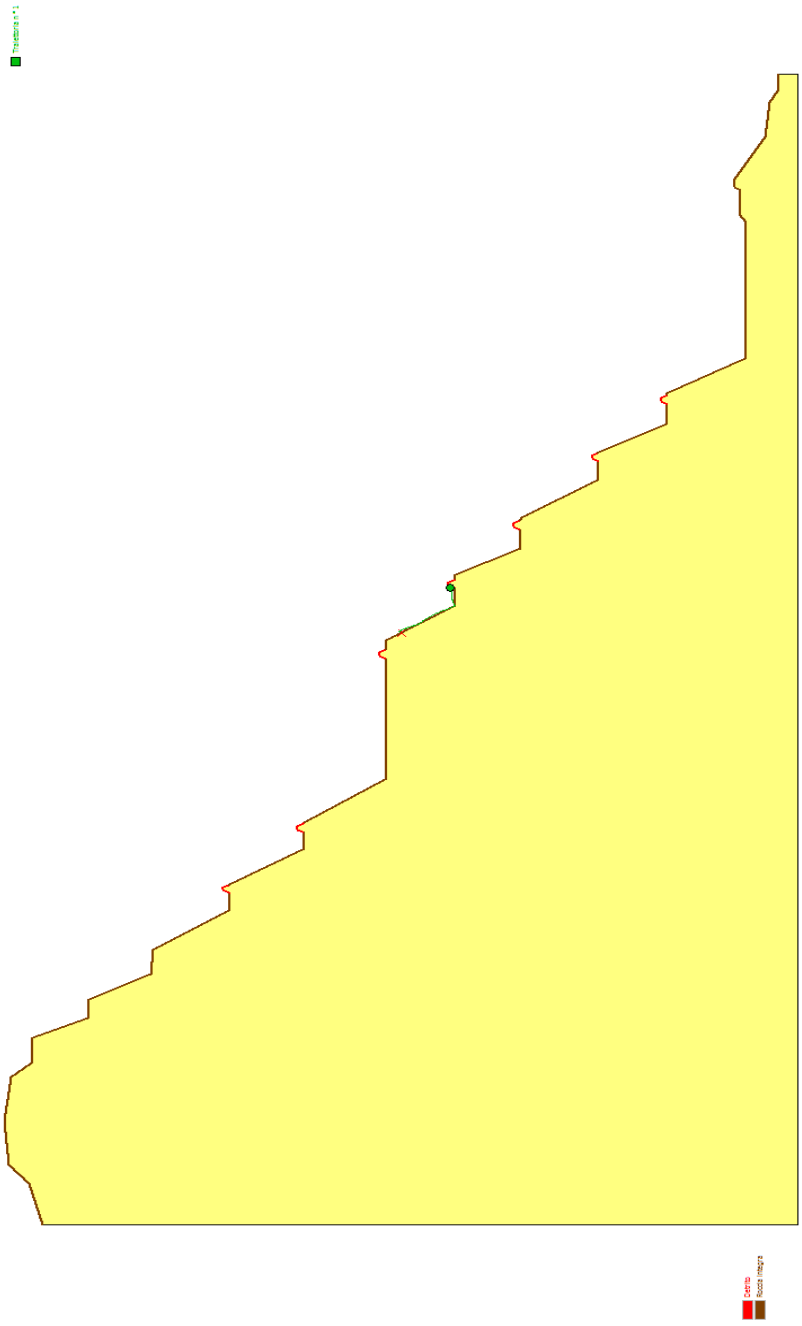
==========


Trasettore n° 1
Detrito
Roccia integra

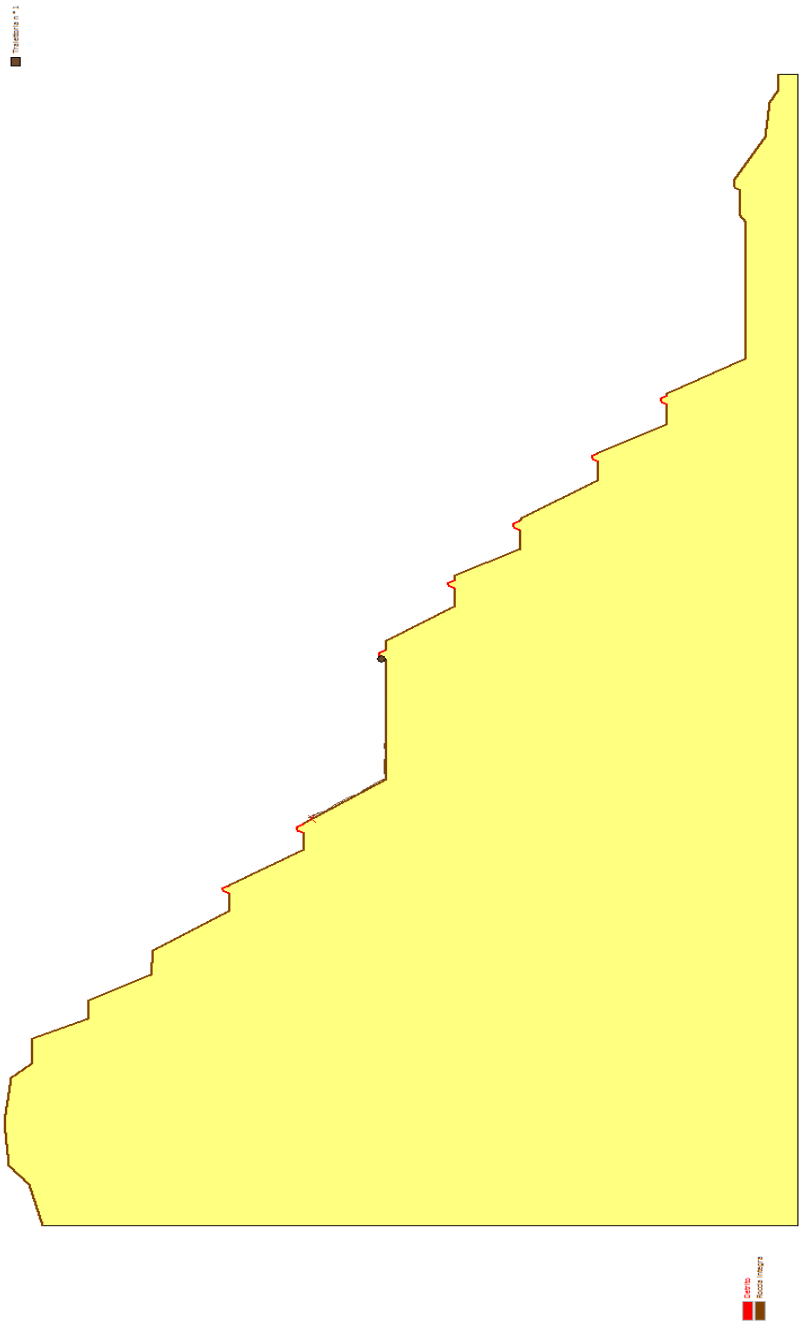


1° LANCIO– 1 FASE (RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)

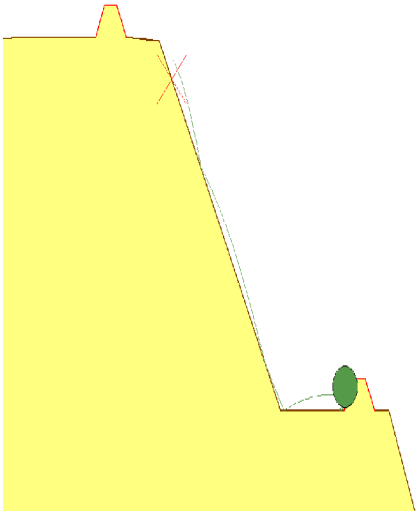
2° LANCIO– 1 FASE (RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)



3° LANCIO– 1 FASE (RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)



4° LANCIO– 1 FASE (RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)



DETTAGLIO LANCIO TIPO – 1 FASE (RIFERITO ALLA SOTTOFASE C)

LANCIO – 5 – ULTIMA FASE DI SCAVO

IMPATTO

Lancio n° 5 Xp=-251.4 m yp=186.6 m

Ni	xi(m)	yi(m)	vx(m/s)	vy(m/s)	t(s)	E(KJ)
1.0	-256.516	186.406	2.393	3.807	1.159	1192.577
2.0	-254.703	186.474	2.187	2.953	0.758	116.799
3.0	-253.423	186.522	2.017	2.428	0.585	79.875
4.0	-252.456	186.558	1.872	2.056	0.48	60.04
5.0	-251.698	186.587	1.746	1.772	0.405	47.327
6.0	-251.091	186.61	1.634	1.546	0.348	38.409
7.0	-248.632	177.837	4.388	-9.406	1.504	971.098
8.0	-246.509	172.137	5.995	3.823	0.484	1423.981
9.0	-242.407	172.456	-1.063	3.71	0.684	320.765
10.0	-243.283	172.18	1.655	3.234	0.068	128.192
11.0	-242.388	172.494	-0.659	1.702	0.541	44.584
12.0	-242.703	172.188	0.791	2.444	0.131	54.164
13.0	-242.419	172.433	-0.337	0.896	0.359	11.224
14.0	-242.527	172.217	-0.008	1.701	0.138	28.982

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	14.818	m/s
Velocità minima	1.338	m/s
Velocità media	5.663	m/s
Scarto quadratico medio	4.841	m/s
Energia massima pre-impatto	**1423.981**	**KJ**
Energia media pre-impatto	322.716	KJ
Scarto quadratico energia	487.341	KJ
Ascissa media di arresto	-242.527	m
Ascissa massima raggiunta	0.0	m

% Massi fermati

X (m)	% Massi fermati
-259.99	0
-226.99	100
-193.99	100
-160.99	100
-127.99	100
-94.99	100
-61.99	100
-28.99	100

LANCIO – 6 – ULTIMA FASE DI SCAVO

IMPATTO

Lancio n° 6 Xp=-239.67 m yp=167.83 m

Ni	xi(m)	yi(m)	vx(m/s)	vy(m/s)	t(s)	E(KJ)
1.0	-236.114	158.37	2.896	3.696	1.186	1235.387
2.0	-233.932	158.37	2.844	2.859	0.753	138.302
3.0	-232.275	158.37	2.794	2.344	0.583	106.154
4.0	-226.723	143.66	2.679	3.414	1.987	1661.026
5.0	-224.858	143.66	2.632	2.697	0.696	118.208
6.0	-223.411	143.66	2.586	2.233	0.55	92.392
7.0	-218.46	129.951	1.295	3.59	1.915	1542.771
8.0	-217.542	130.032	0.936	2.818	0.709	76.295
9.0	-217.02	130.078	0.648	2.318	0.558	46.139
10.0	-216.722	130.104	0.413	1.955	0.461	30.313
11.0	-216.56	130.118	0.223	1.674	0.391	20.961
12.0	-216.485	130.125	0.078	1.449	0.337	15.119

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	17.376	m/s
Velocità minima	1.65	m/s
Velocità media	6.516	m/s
Scarto quadratico medio	6.032	m/s
Energia massima pre-impatto	**1661.026**	**KJ**
Energia media pre-impatto	423.589	KJ
Scarto quadratico energia	644.885	KJ
Ascissa media di arresto	-216.485	m
Ascissa massima raggiunta	0.0	m

% Massi fermati

X (m)	% Massi fermati
-239.67	0
-206.67	100
-173.67	100
-140.67	100
-107.67	100
-74.67	100
-41.67	100

LANCIO – 7 – ULTIMA FASE DI SCAVO

IMPATTO

Lancio n° 7 Xp=-176.89 m yp=83.64 m

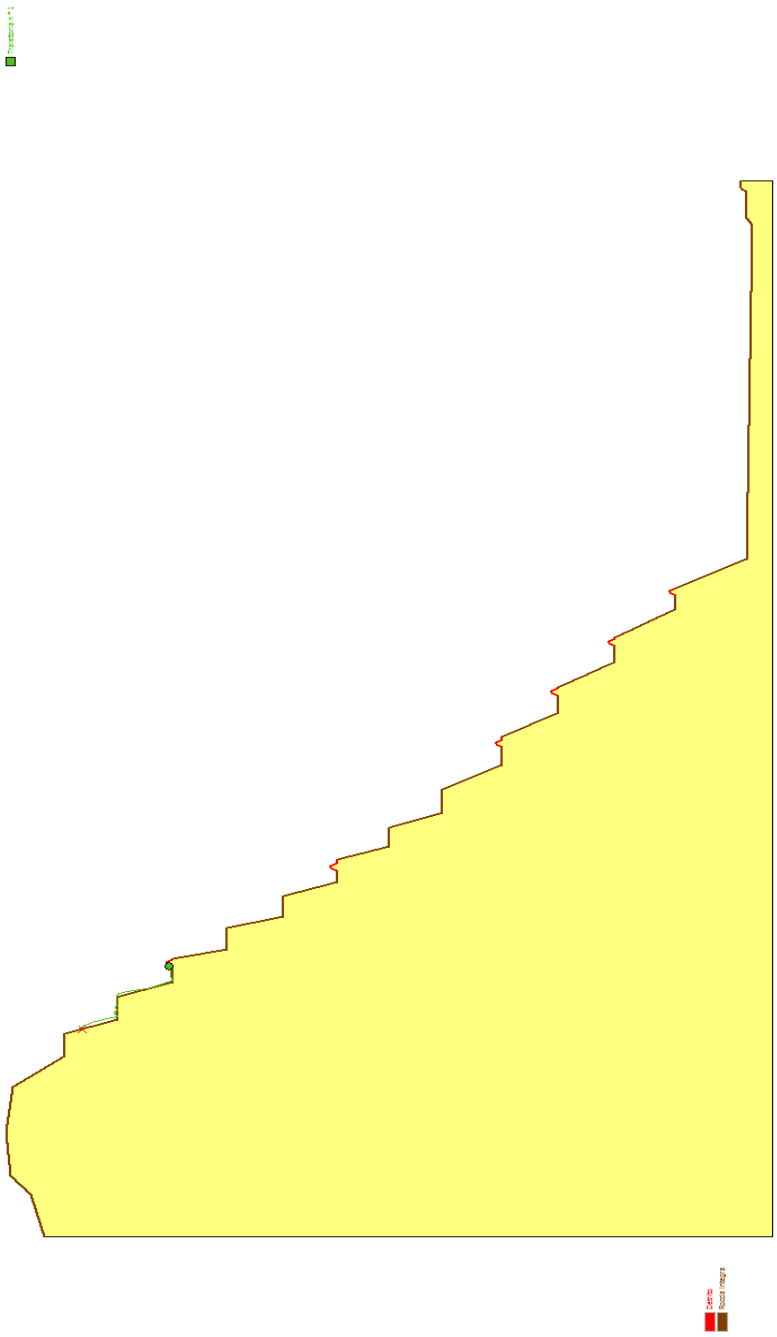
Ni	xi(m)	yi(m)	vx(m/s)	vy(m/s)	t(s)	E(KJ)
1.0	-174.026	77.299	5.885	-8.182	0.955	901.421
2.0	-171.553	72.993	5.899	4.411	0.42	1225.696
3.0	-167.153	73.555	-1.017	3.78	0.746	320.627
4.0	-168.0	73.296	1.328	3.372	0.063	129.719
5.0	-167.178	73.503	-0.47	2.067	0.619	55.0
6.0	-167.407	73.347	0.684	2.33	0.066	47.07
7.0	-167.158	73.544	-0.263	1.018	0.365	12.696
8.0	-167.241	73.379	0.031	1.594	0.107	25.074

ELABORAZIONI STATISTICHE

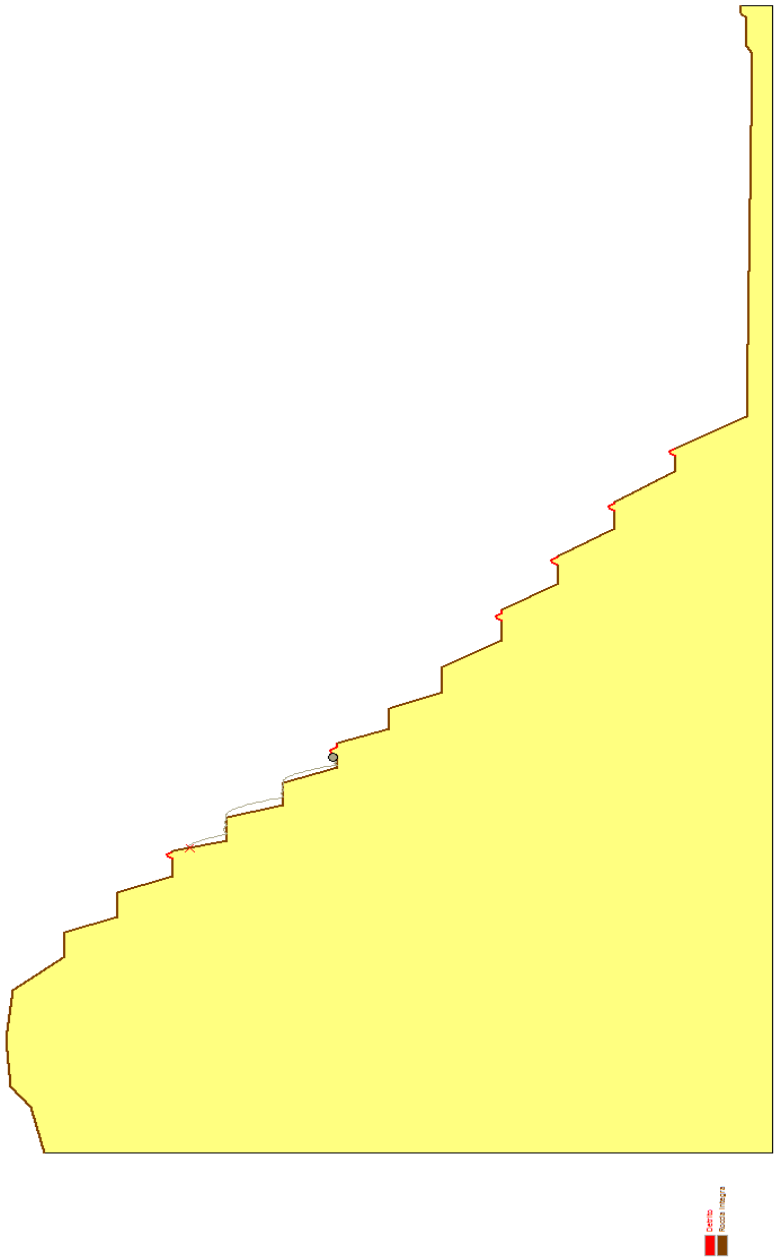
Velocità massima		13.64	m/s
Velocità minima		1.422	m/s
Velocità media	5.841 m/s		
Scarto quadratico medio	4.806 m/s		
Energia massima pre-impatto		**1225.696**	**KJ**
Energia media pre-impatto		339.663	KJ
Scarto quadratico energia	465.615 KJ		
Ascissa media di arresto	-167.241m		
Ascissa massima raggiunta	0.0 m		

% Massi fermati

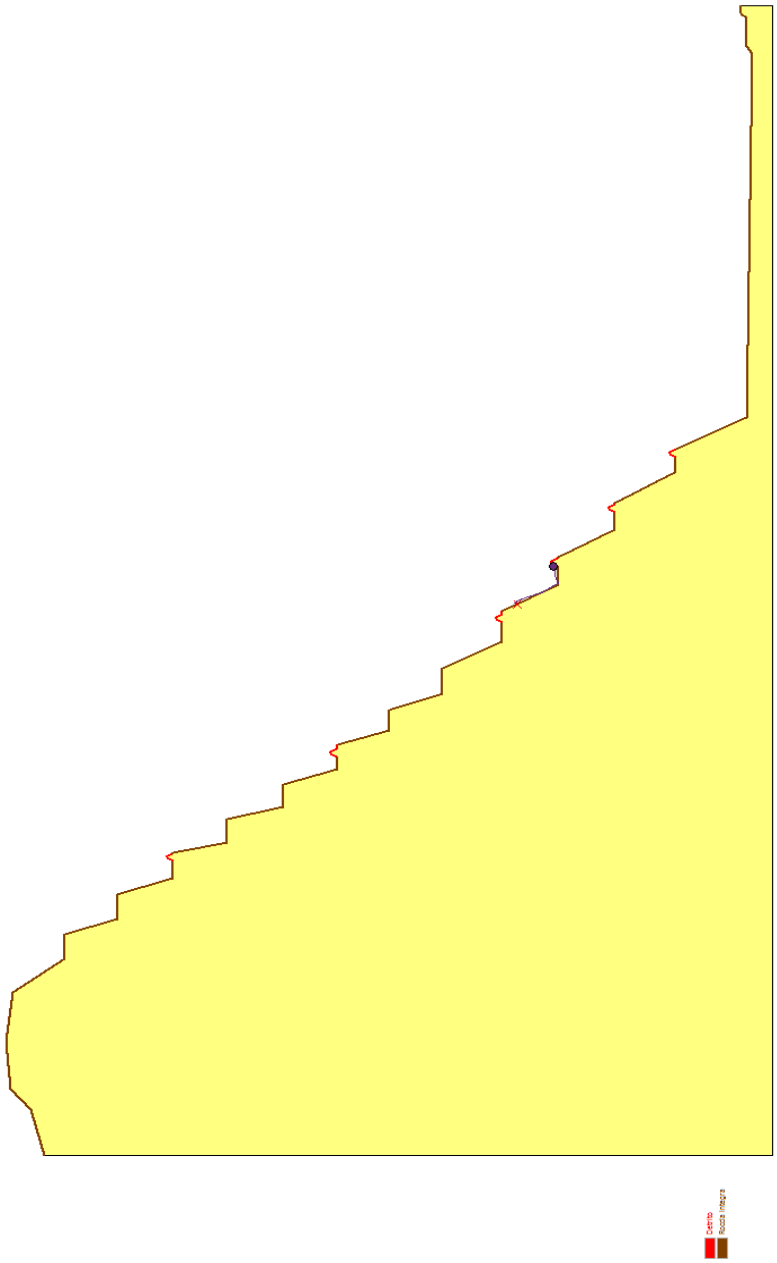
X (m)	% Massi fermati
-176.89	0
-143.89	100
-110.89	100
-77.89	100
-44.89	100



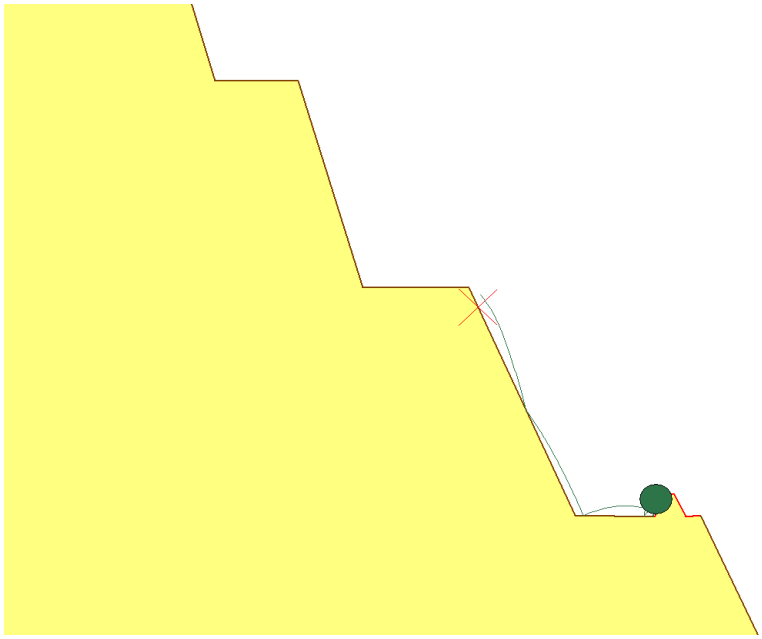
LANCIO – 5 – ULTIMA FASE DI SCAVO



LANCIO – 6 – ULTIMA FASE DI SCAVO



LANCIO – 7– ULTIMA FASE DI SCAVO



DETTAGLIO LANCIO TIPO– ULTIMA FASE DI SCAVO