

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA
LEGGE OBIETTIVO N. 443/01**

**TRATTA A.V. /A.C. TERZO VALICO DEI GIOVI
PROGETTO DEFINITIVO**

VAR0031 – SSE BIVIO CORVI

PIAZZOLE TECNOLOGICHE

PIAZZOLA CORVI (BORZOLI)

Reti paramassi – Relazione di calcolo traiettorie di caduta massi

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI	
Consorzio Cociv Ing. F. Poma		

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
A 3 0 1	0 X	D	C V	C L	I N 2 1 0 X	0 1 0	A

Progettazione :								
Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	IL PROGETTISTA
A00	PRIMA EMISSIONE	IC 	20/07/2020	COCIV 	22/07/2020	A.Mancarella 	24/07/2020	 Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Paolo Costa Medich Ordine Ingegneri Prov. TO n. 10306 X
A01	Revisione per nome direttore COCIV	COCIV	08/09/21	COCIV	08/09/21	P. Costa Medich 	08/09/21	

n. Elab.:	File: A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC
-----------	---

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p style="text-align: center;">A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC</p> <p style="text-align: right;">Foglio 3 di 43</p>

INDICE

1.	PREMESSE.....	4
2.	NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO.....	5
3.	PROGRAMMI PER L'ANALISI AUTOMATICA	6
4.	INQUADRAMENTO GEOMECCANICO E GEOMORFOLOGICO.....	7
5.	CRITERI DI CALCOLO.....	10
	5.1. Analisi bidimensionale	10
	5.2. Parametri del modello di calcolo	10
6.	ANALISI DELLE TRAIETTORIE DI CADUTA MASSI – DATI DI INPUT.....	11
	6.1. Sezioni tipo di analisi	11
	6.2. Caratteristiche del masso	11
	6.3. Coefficienti di restituzione.....	11
	6.4. Angolo d'attrito masso-versante	11
	6.5. Condizioni iniziali e condizioni al contorno	12
7.	ANALISI DELLE TRAIETTORIE DI CADUTA MASSI – RISULTATI.....	14
	7.1. Sezione tipo 1	14
	7.2. Sezione tipo 2.....	16
	7.3. Sezione tipo 3.....	18
8.	RETI PARAMASSI – CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA	20
	8.1. Definizione dell'energia di progetto della rete paramassi.....	20
	8.2. Verifica degli ancoraggi	21
	8.3. Verifica di equilibrio del plinto di fondazione a base montante	22
9.	ALLEGATO 1 – SEZIONE TIPO 1 – TABULATO.....	24
10.	ALLEGATO 2 – SEZIONE TIPO 2 – TABULATO.....	31
11.	ALLEGATO 3 – SEZIONE TIPO 3 – TABULATO.....	39

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC</p>	<p>Foglio 5 di 43</p>

2. NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

Circolare 21 gennaio 2019, n.7 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Istruzioni per l'applicazione dell'«*Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. Gazzetta Ufficiale del 11.02.2019 n. 5, supplemento ordinario n.35.

D.M. 17/01/2018 «*Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*» - GU n°8 del 17/2/2018

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

G.P. GIANI (1997) – Caduta di massi (Helvetius Edizioni)

G.P. GIANI (1992) – Rock Slope Stability Analysis. A.A. Balkema

R.E. GOODMAN (1989) – Rock Mechanics

C. SCAVIA, G. BARLA, L. VAI – Analisi di tipo probabilistico

PITEAU, CLAYTON (1977) – Description of the slope model computer rockfall program for determining rockfall distributions.

DUNCAN WYLIE & CHRISTOPHER MAH (2004) – Rock Slope Engineering civil and minig. 4TH Edition.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC</p>	<p>Foglio 6 di 43</p>

3. PROGRAMMI PER L'ANALISI AUTOMATICA

Per l'analisi probabilistica delle traiettorie di caduta massi si è fatto ricorso al seguente codice di calcolo commerciale:

Rock 12.0 – Aztec (analisi caduta massi)

4. INQUADRAMENTO GEOMECCANICO E GEOMORFOLOGICO

Rimandando alla “Relazione Geologica, geomorfologica ed idrogeologica” (cfr. elaborato IG51-04-E-CV-RO-IN21-00-001-B00) per i dettagli circa l’assetto geologico e geomorfologico dell’area di intervento, ai fini della presente si evidenzia quanto segue.

- Dal punto di vista litologico le serpentiniti rilevate costituiscono l’affioramento roccioso, mostrano un carattere massivo e sono distinte da colore verde smeraldo, a tratti molto intenso; localmente si osservano patine dovute alla presenza di ossidi ferrosi, rare fratture colmate da riempimenti cristallini e manifestazioni intrusive di colore verde chiaro.
- Per quanto concerne i parametri geomeccanici dell’ammasso roccioso le discontinuità osservate sono generalmente prive di riempimento, chiuse ed asciutte; sono comunque presenti alcune fratture sigillate da un riempimento cristallino ed altre caratterizzate da un’apertura massima pari a 10 cm circa.
- La spaziatura media che distingue i sets rilevati è pari a 38 cm, mentre la persistenza lineare delle discontinuità assume valori compresi nell’intervallo 70% ÷ 90%. Le superfici di discontinuità sono prevalentemente planari (classe VII) o poco ondulate (classe V), associate ad alcune molto rugose (classe IV); il valore medio stimato per JRC è 8.
- Le prove di compressione monoassiale hanno dato valori medi pari a 51 MPa. In base a questi valori le rocce si collocano al limite tra il campo delle rocce a bassa ed a media resistenza (Deere & Miller, 1966).
- Per quanto concerne la caratterizzazione geomeccanica delle discontinuità è possibile fare riferimento al prospetto di cui al seguito.

PARAMETRO	K1	K2	K3	K4
Giacitura	20-45/080	65-80/040-210	30-45/140-315	70-80/330-160
Spaziatura media (cm)	60	65	85	65
JCS (MPa)	30 (stimato)	30 (stimato)	30 (stimato)	30 (stimato)
JRC	5	5	5	5
ϕ_b (°)	≈ 23 (stimato)	≈ 23 (stimato)	≈ 23 (stimato)	≈ 23 (stimato)
σ'_n (MPa)	1.4	0.7	1.4	0.7
ϕ_{picco} (°) - BARTON	29 - 30	31	29 - 30	31
ϕ_{picco} (°) - Mohr-Coulomb	27	28 - 29	27	28 - 29
Coesione picco (kPa)	70	36	70	36

- Per quanto concerne la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso è possibile fare riferimento al prospetto di cui al seguito (criterio di rottura di Mohr-Coulomb equivalente).

Litotipo	γ	Coesione (c)	ϕ	E	E dilatom.	\square
	KN/m ³	MPa	°	GPa	GPa	-
Serpentinite massiva	28	0.6 ÷ 1.4	25 ÷ 36	3.2 ÷ 9.6	8.06 ÷ 8.34	0.25
Serpentinite fratturata	28	0.3 ÷ 0.9	20 ÷ 28	1.0 ÷ 1.5	-	0.25
Zone di faglia e/o serpentinoscisti	28	0.2 ÷ 0.3	13 ÷ 20	1.2 ÷ 1.5	-	0.30

- Dal punto di vista dell'evoluzione geomorfologica dei versanti, il rilievo effettuato nel 2019 ha permesso di mettere in evidenza i seguenti aspetti:
 - Nella parte alta del versante sono osservabili alcune nicchie di distacco legate a crolli di detrito: tali fenomeni di crollo possono localmente incanalarsi, come testimoniato dai numerosi canali di versante con direzione est-ovest rispetto all'opera in progetto, dando luogo a processi tipo "debris flow".
 - Queste incisioni vallive ripide sul versante, di profondità da 1m a 2-3m, sono di tipo evolutivo regressivo. L'evoluzione dei versanti è dipendente dai fenomeni di dilavamento causati dagli eventi pluviometrici più o meno intensi, la progressiva esposizione degli affioramenti rocciosi interessati da discontinuità disposte a frana poggio.
 - Alla base dei canali di versante, sono presenti degli apparati conoidali di potenza da metrica a plurimetrica, costituiti da materiali di origine mista e eterometrici; spesso è stata rilevata la presenza di blocchi plurimetrici trasportati sino ai piedi del versante.
 - Tutti i settori sono stati interessati dal distacco di blocchi di dimensione plurimetrica, riposizionatosi sul versante e a valle del versante stesso, ostruendo in parte i canali di scolo ai piedi del versante.

Di seguito (figure n.4.1÷4.4) sono riportate alcune immagini inerenti ai blocchi di detrito plurimetrici rilevati durante la campagna di rilevamento geologico 2019.



Figura n.4.1 – Blocco di distacco rilevato all'estremità del canale di scolo



Figura n.4.2 – Blocco di distacco rilevato nel settore centrale



Figura n.4.3 – Blocco di distacco rilevato nel settore meridionale



Figura n.4.4 – Blocco di distacco rilevato nel settore settentrionale

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC	Foglio 10 di 43

5. CRITERI DI CALCOLO

5.1. ANALISI BIDIMENSIONALE

Nel caso di analisi bidimensionale della traiettoria di caduta il pendio viene discretizzato con una serie di segmenti mentre il masso è considerato come punto materiale, considerando quindi il moto del suo baricentro.

La modellazione del masso avviene tramite il suo peso, posizione e velocità iniziale al momento del distacco dal pendio.

5.2. PARAMETRI DEL MODELLO DI CALCOLO

I parametri necessari per il calcolo dell'interazione masso-versante sono rappresentati da:

- Geometria del versante oggetto di analisi;
- Dimensioni e peso del masso;
- Coefficienti di restituzione tangenziale e normale al pendio (rispettivamente K_t e K_n) che rappresentano il rapporto fra la velocità prima e dopo l'impatto del masso con il versante (movimento in volo);
- Angolo d'attrito masso-versante (ϕ) attraverso il quale si porta in conto la dissipazione dell'energia cinetica (movimento di traslazione e rotazione);
- Condizioni iniziali relative a posizione e velocità iniziale del masso;
- Condizioni al contorno relative a posizione, geometria e caratteristiche di assorbimento delle opere di difesa.

Noti i parametri di input sopra elencati, l'analisi delle traiettorie di caduta viene effettuata integrando le equazioni del moto di caduta di un grave e suddividendo la traiettoria stessa in tratti parabolici (rimbalzi), tratti verticali (caduta libera) e tratti rettilinei (rotolamento o scivolamento sul pendio).

In particolare, per quanto riguarda i parametri K_t , K_n e ϕ , è possibile definire un range di valori massimi e minimi per poter effettuare un'analisi di tipo probabilistico sulla base del metodo Montecarlo basato sulla generazione di numeri casuali.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC	Foglio 11 di 43

6. ANALISI DELLE TRAIETTORIE DI CADUTA MASSI – DATI DI INPUT

6.1. SEZIONI TIPO DI ANALISI

L'analisi delle traiettorie di caduta massi è stata svolta con riferimento a n.3 sezioni "caratteristiche" di seguito descritte:

- SEZIONE TIPO 1: sezione tracciata in corrispondenza del settore Nord-Est del versante all'altezza del piazzale a quota +85.00m s.l.m. (tratto con rete paramassi perimetrale);
- SEZIONE TIPO 2: sezione sezione tracciata in corrispondenza del settore Est del versante all'altezza del piazzale a quota +79.00m s.l.m. (tratto con rete paramassi perimetrale e tratti di rete aggiuntivi in corrispondenza delle incisioni);
- SEZIONE TIPO 3: sezione tracciata in corrispondenza del settore Sud-Est del versante all'altezza del piazzale a quota +75.00m s.l.m. (tratto con rete paramassi perimetrale);

6.2. CARATTERISTICHE DEL MASSO

Con riferimento alla "Relazione Geologica, geomorfologica ed idrogeologica" (cfr. elaborato IG51-04-E-CV-RO-IN21-00-001-B00) l'analisi delle traiettorie di caduta massi è stata svolta considerando un masso avente peso pari a 2'800kg, corrispondente ad un volume pari a circa 1mc.

6.3. COEFFICIENTI DI RESTITUZIONE

In accordo con le indicazioni di letteratura relative a pendii con roccia affiorante e detrito, è stato definito il seguente range di valori del coefficiente di restituzione normale e tangenziale:

$$K_n = 0.75 \div 0.85$$

$$K_t = 0.75 \div 0.85$$

6.4. ANGOLO D'ATTRITO MASSO-VERSANTE

In accordo con le indicazioni di letteratura e tenendo conto di quanto documentato nella "Relazione Geologica, geomorfologica ed idrogeologica" (cfr. elaborato IG51-04-E-CV-RO-IN21-00-001-B00) è stato definito il seguente range di valori dell'angolo d'attrito masso-versante:

$$\phi = 26 \div 28^\circ$$

Si precisa che i valori di cui sopra risultano consistenti con la stima proposta da Cocco (1991) che propone di considerare l'angolo d'attrito in fase di rotolamento e scivolamento come somma di tre contributi legati alla natura del terreno, alla copertura vegetale ed all'asperità del versante.

Nel caso specifico in studio si ottiene:

Natura del terreno: roccia nuda/detrito → contributo $\phi' = 19 \div 21^\circ$

Copertura vegetale: nudo/prato → contributo $\phi' = 0 \div 3^\circ$

Asperità versante: piccola/media → contributo $\phi' = 3 \div 7^\circ$

6.5. CONDIZIONI INIZIALI E CONDIZIONI AL CONTORNO

Le analisi delle traiettorie di caduta sono state effettuate considerando velocità iniziale del masso nulla.

Per quanto riguarda la posizione iniziale, sono state definite, in funzione della morfologia del versante, specifiche "zone di distacco" la cui geometria ed ubicazione è illustrata nelle seguenti figure n.6.2÷6.4 (cfr. poligoni marroni); il calcolo probabilistico è stato impostato per la ricerca di n°1000 traiettorie per ciascuna zona di distacco.

Per quanto concerne invece le condizioni al contorno (cfr. linee nere nelle figure n.6.1÷6.3), sono state modellate le reti paramassi lungo il versante ed il tomo a tergo del muro di controripa MC01 nel rispetto delle geometrie di progetto.

In particolare per le reti paramassi si è assunto quanto segue:

Altezza: 5m da p.c. locale

Inclinazione: 34° rispetto alla verticale

Assorbimento: 1'500kJ

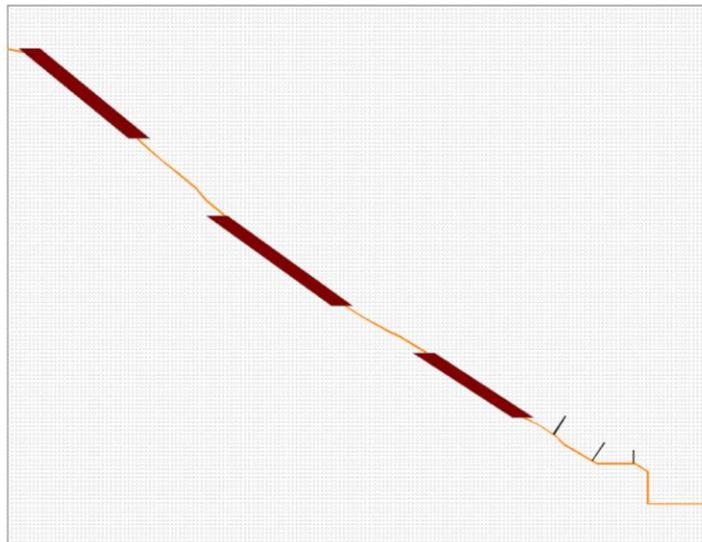


Figura n.6.1 – Sezione tipo 1 – Zone di distacco e opere di difesa per analisi di caduta massi

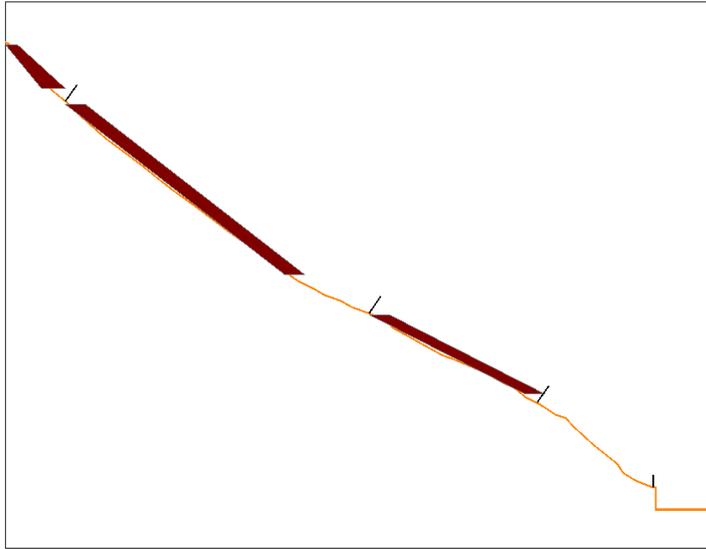


Figura n.6.2 – Sezione tipo 2 – Zone di distacco e opere di difesa per analisi di caduta massi

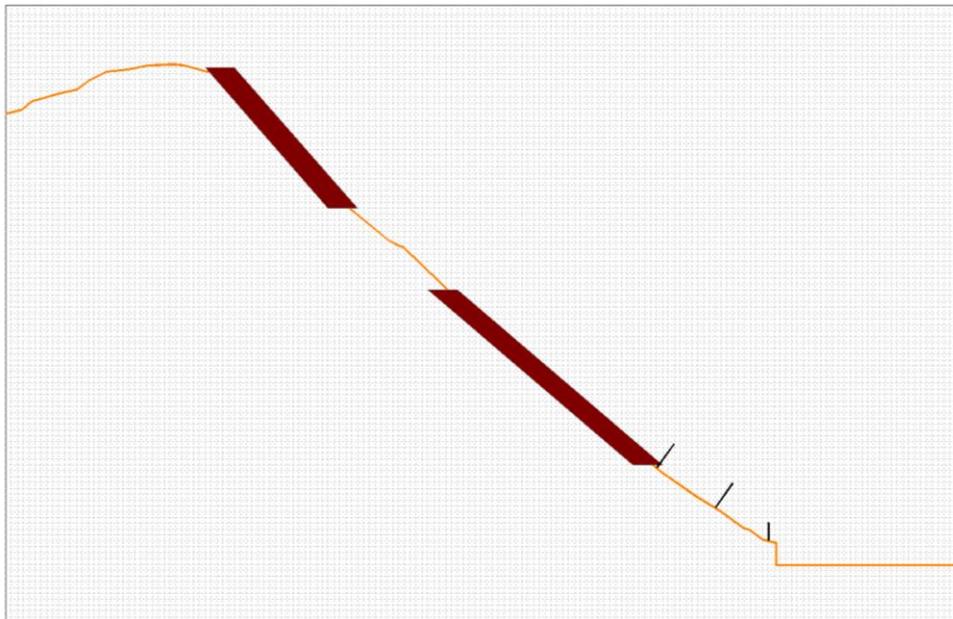


Figura n.6.3 – Sezione tipo 3 – Zone di distacco e opere di difesa per analisi di caduta massi

7. ANALISI DELLE TRAIETTORIE DI CADUTA MASSI – RISULTATI

7.1. SEZIONE TIPO 1

Si riportano di seguito i principali risultati della simulazione numerica.

In figura n.7.1 è illustrata la distribuzione delle traiettorie di caduta calcolate; si verifica che in tutti i casi il percorso del masso raggiunge la barriera di monte con impatti che avvengono anche nella parte sommitale della barriera stessa.

Nelle figure n.7.2 e n.7.3 è illustrato rispettivamente l'andamento della velocità e dell'energia di impatto in funzione dei punti di arrivo dei massi; si verifica che in corrispondenza della barriera paramassi di monte le velocità di impatto sono dell'ordine di 30m/s cui corrisponde un'energia di impatto dell'ordine di 1'300kJ.

Per maggiori dettagli si rimanda al tabulato di calcolo di cui all'allegato 1.

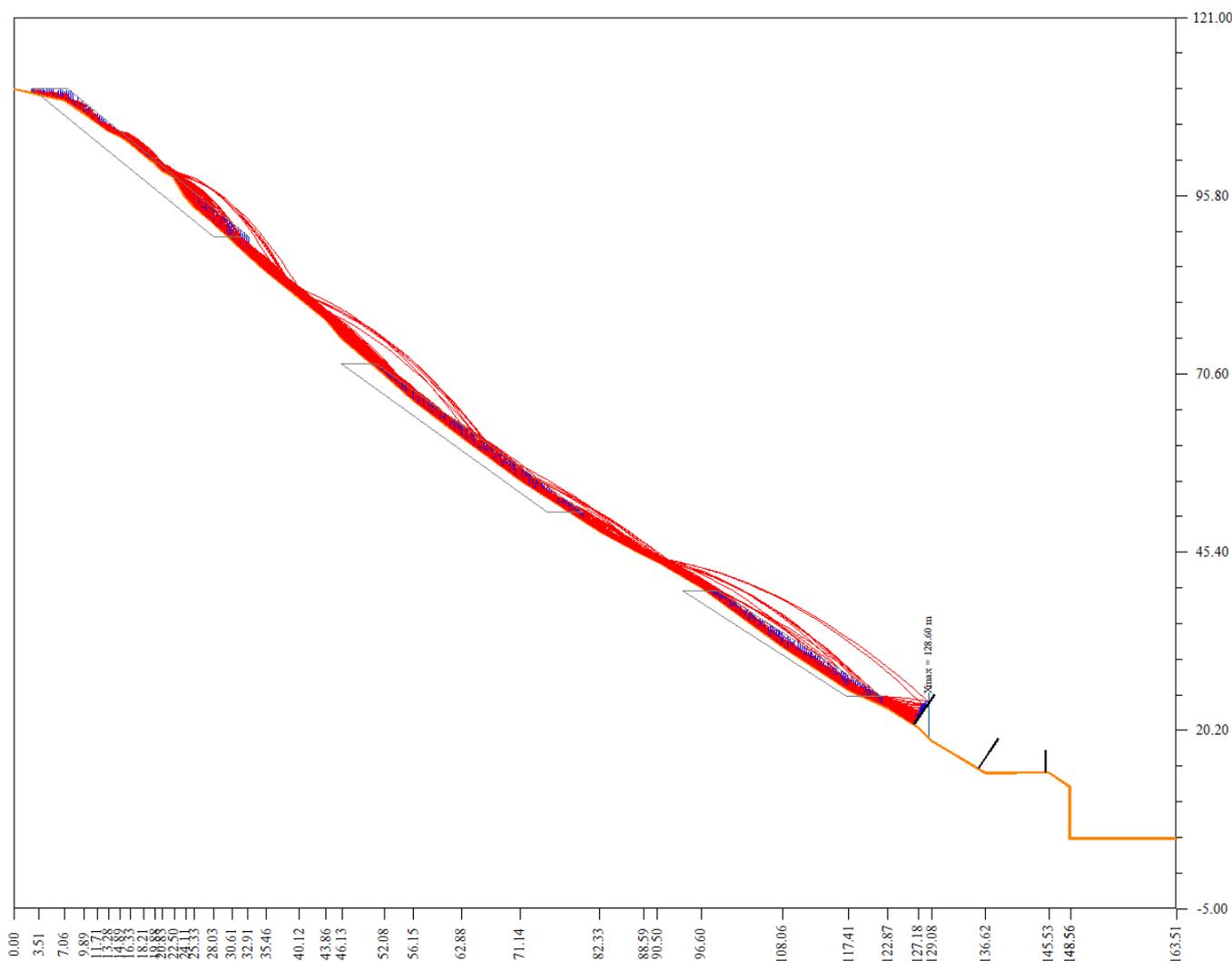


Figura n.7.1 – Sezione tipo 1 – Risultati – Traiettorie di caduta massi

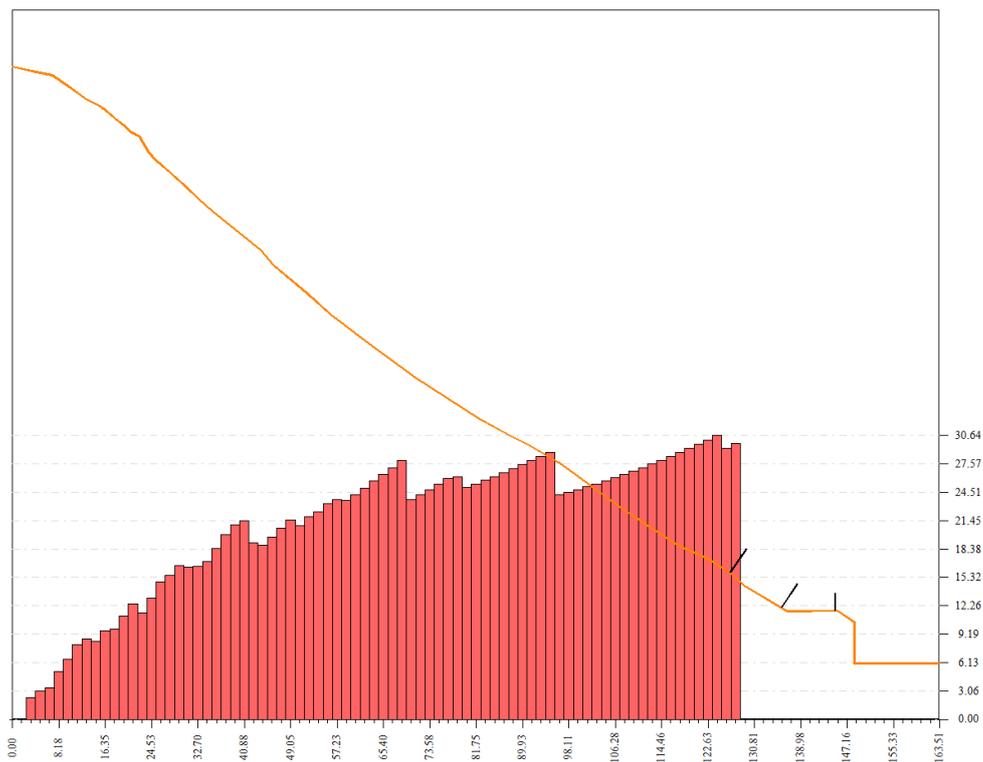


Figura n.7.2 – Sezione tipo 1 – Risultati – Distribuzione velocità di impatto

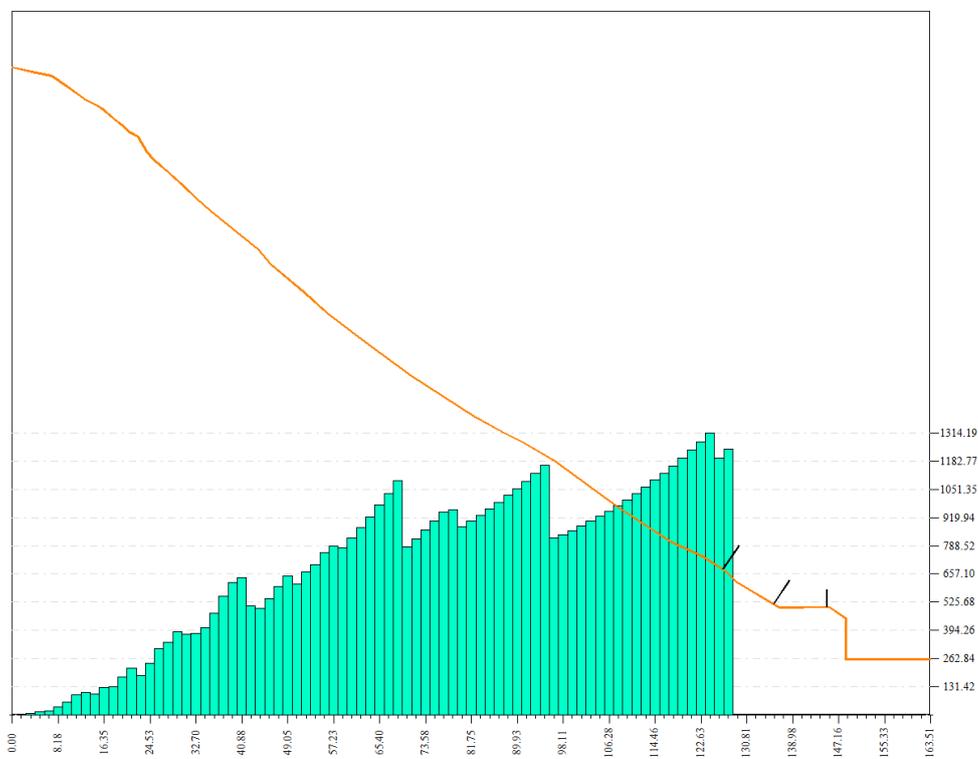


Figura n.7.3 – Sezione tipo 1 – Risultati – Distribuzione energia di impatto

7.2. SEZIONE TIPO 2

Si riportano di seguito i principali risultati della simulazione numerica.

In figura n.7.4 è illustrata la distribuzione delle traiettorie di caduta calcolate; si verifica che in tutti i casi il percorso del masso raggiunge la barriera di monte.

Nelle figure n.7.5 e n.7.6 è illustrato rispettivamente l'andamento della velocità e dell'energia di impatto in funzione dei punti di arrivo dei massi; si verifica che in corrispondenza della barriera paramassi di monte le velocità di impatto sono dell'ordine di 20m/s cui corrisponde un'energia di impatto dell'ordine di 650kJ.

Per maggiori dettagli si rimanda al tabulato di calcolo di cui all'allegato 2.

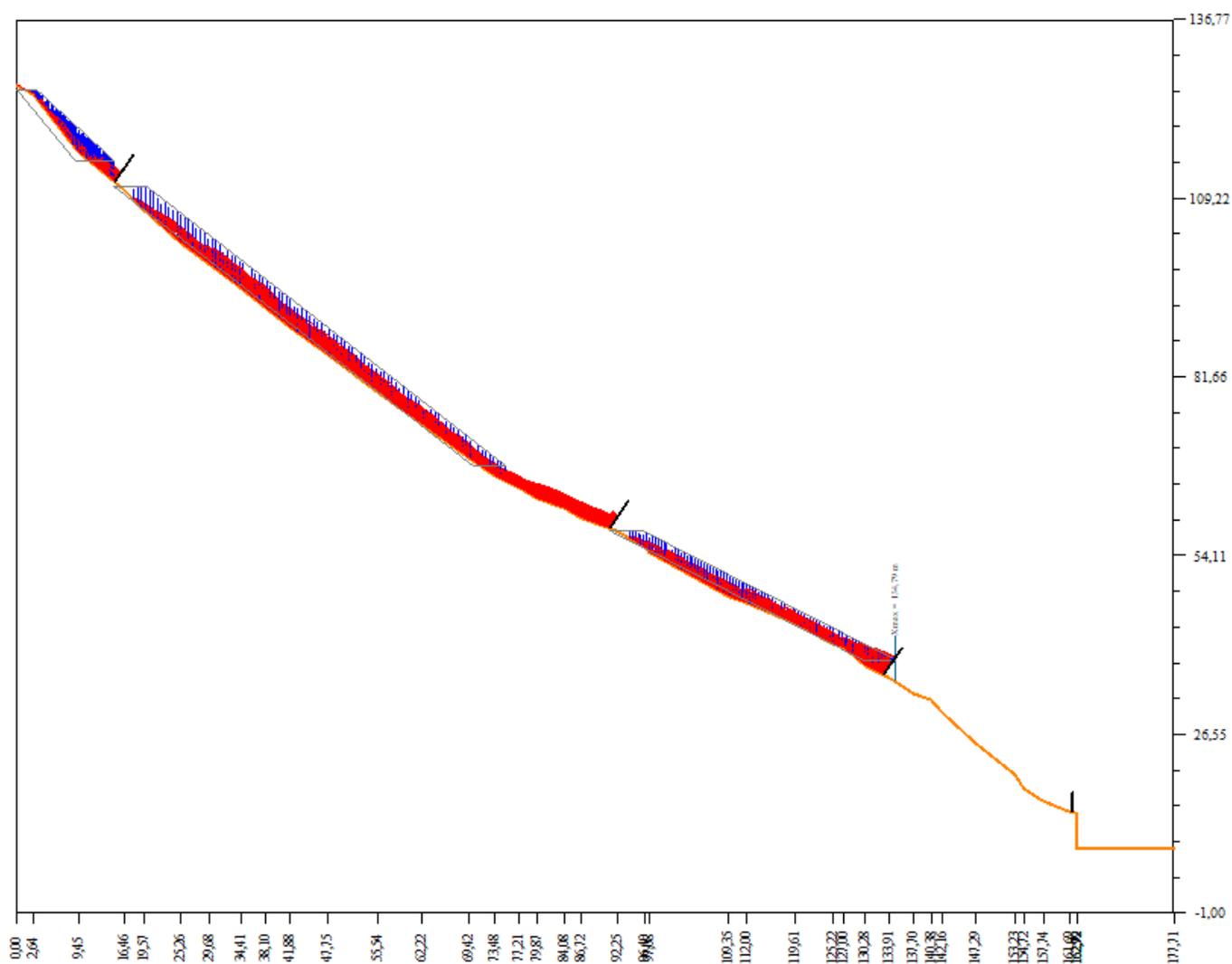


Figura n.7.4 – Sezione tipo 2 – Risultati – Traiettorie di caduta massi

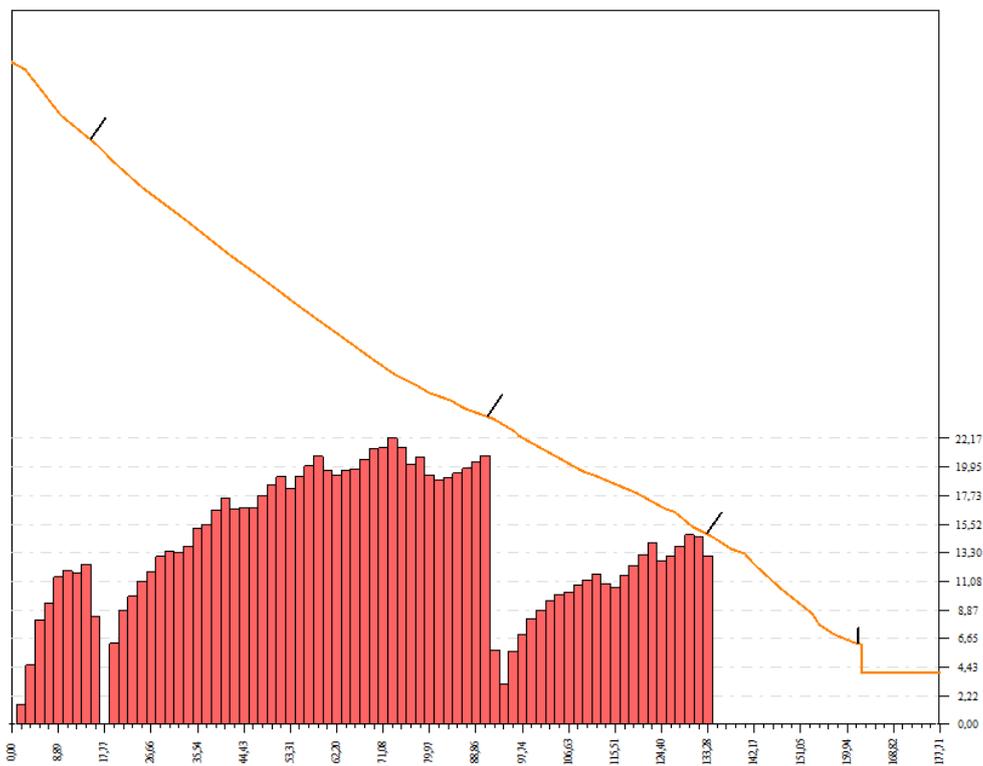


Figura n.7.5 – Sezione tipo 2 – Risultati – Distribuzione velocità di impatto

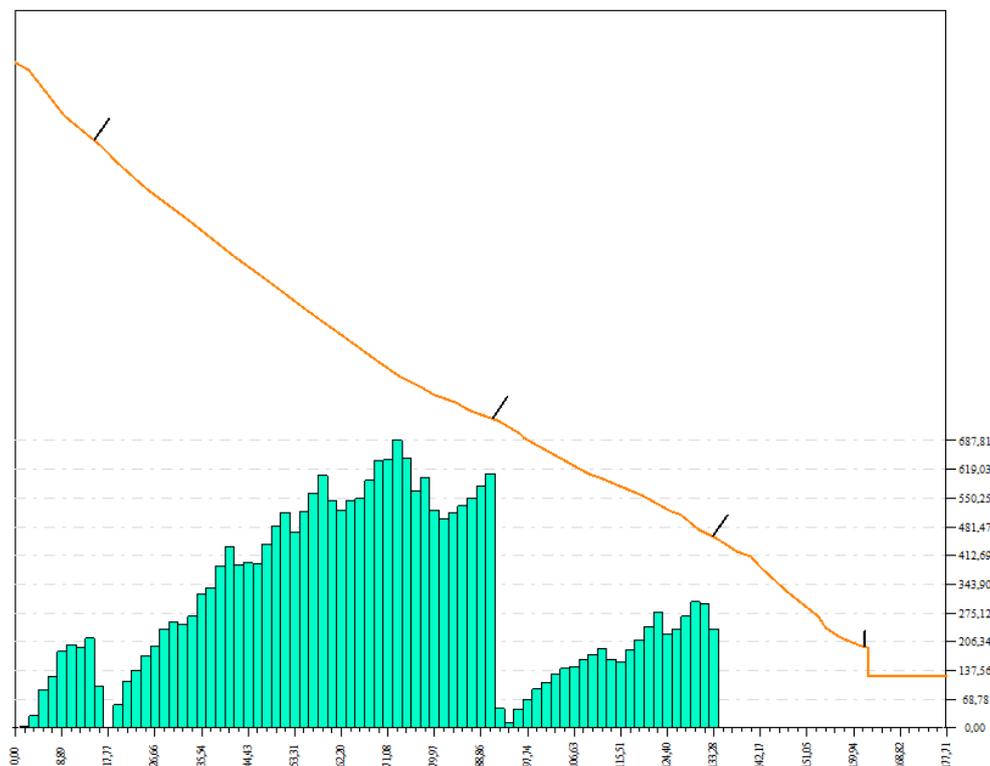


Figura n.7.6 – Sezione tipo 2 – Risultati – Distribuzione energia di impatto

7.3. SEZIONE TIPO 3

Si riportano di seguito i principali risultati della simulazione numerica.

In figura n.7.7 è illustrata la distribuzione delle traiettorie di caduta calcolate; si verifica che in tutti i casi il percorso del masso raggiunge la barriera di monte con impatti che avvengono anche nella parte sommitale della barriera stessa.

Nelle figure n.7.8 e n.7.9 è illustrato rispettivamente l'andamento della velocità e dell'energia di impatto in funzione dei punti di arrivo dei massi; si verifica che in corrispondenza della barriera paramassi di monte le velocità di impatto sono dell'ordine di 28m/s cui corrisponde un'energia di impatto dell'ordine di 1000÷1'100kJ.

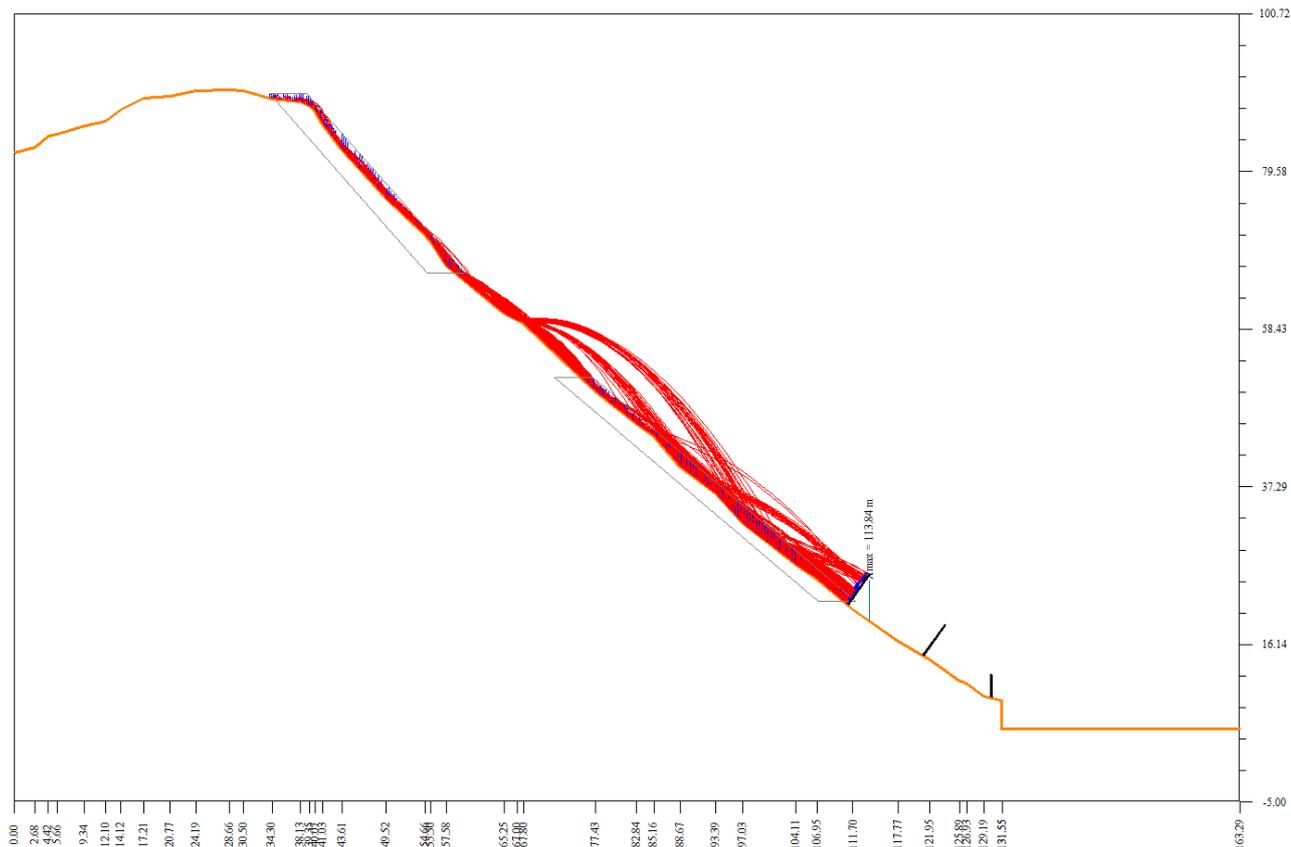


Figura n.7.7 – Sezione tipo 3 – Risultati – Traiettorie di caduta massi

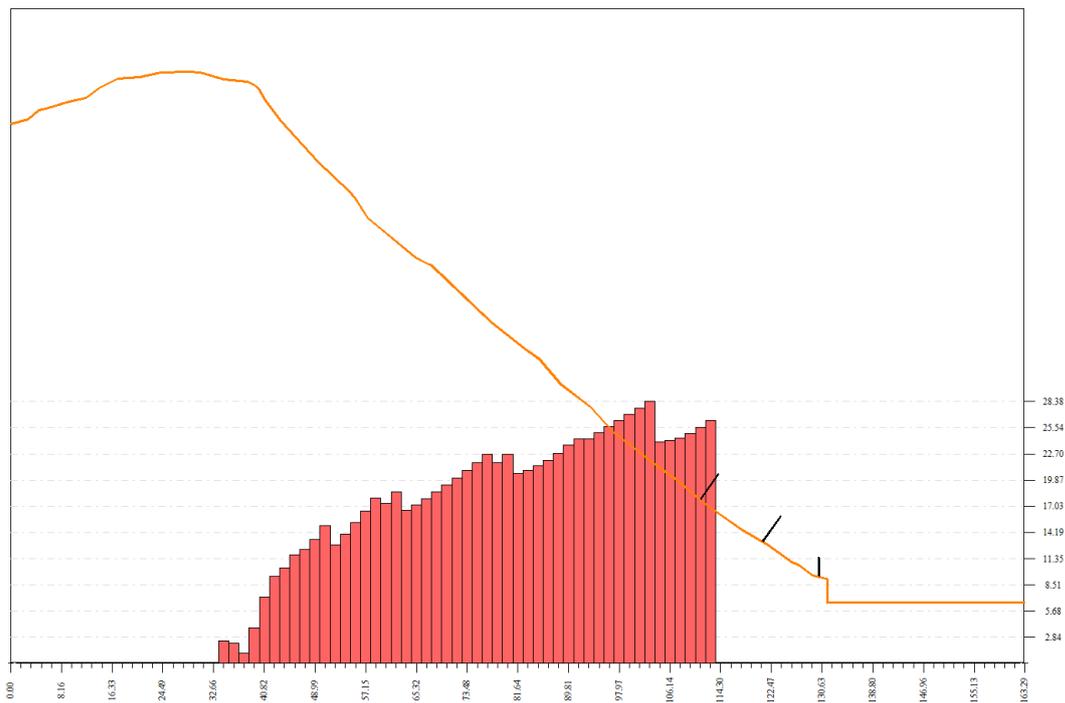


Figura n.7.8 – Sezione tipo 3 – Risultati – Distribuzione velocità di impatto

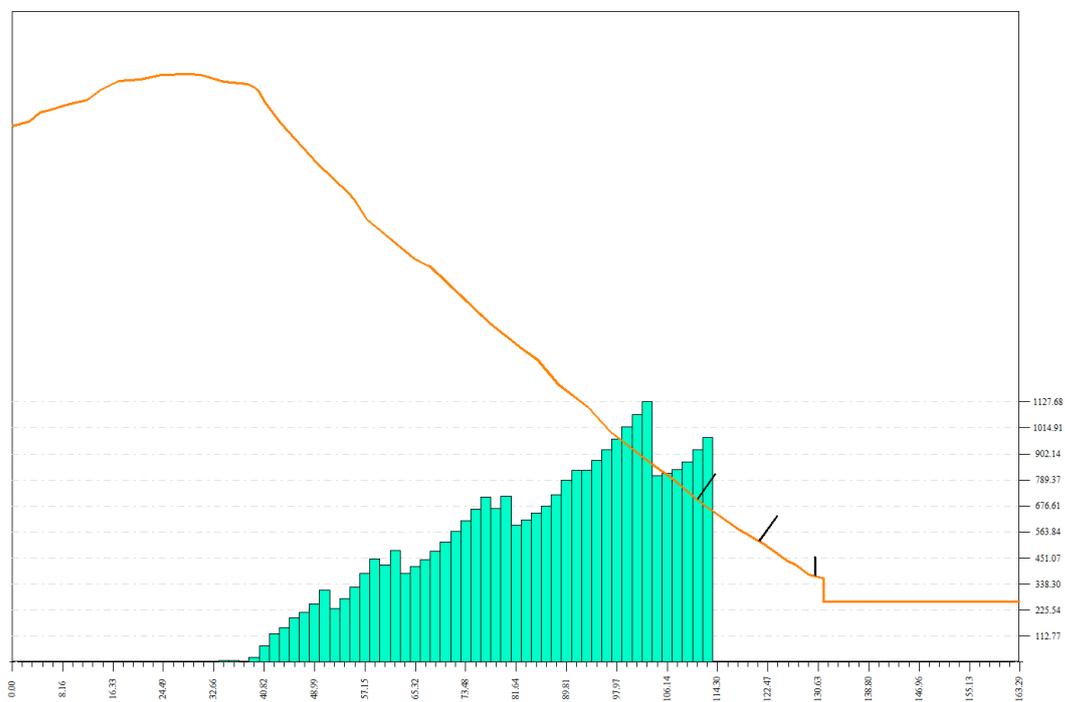


Figura n.7.9 – Sezione tipo 3 – Risultati – Distribuzione energia di impatto

8. RETI PARAMASSI – CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA

8.1. DEFINIZIONE DELL'ENERGIA DI PROGETTO DELLA RETE PARAMASSI

Con riferimento alla Norma UNI 11211-4 (Gennaio 2012) l'energia di assorbimento di progetto della rete paramassi viene definita verificando che sia rispettata la seguente relazione:

$$E_{\text{barriera}} / E_{\text{sd}} \geq \gamma_E$$

dove:

E_{sd} = energia sollecitante di progetto

E_{barriera} = energia dissipabile dalla barriera

γ_E = fattore di sicurezza legato all'approccio di progetto = 1.00 (approccio SEL – Service Energy Level)
 = 1.20 (approccio MEL – Maximum Energy Level)

L'energia sollecitante di progetto è definita con la formulazione classica dell'energia cinetica:

$$E_{\text{sd}} = (1/2 m_d v_d^2) \gamma_R$$

dove:

m_d = massa del blocco di progetto = $(v_b \gamma) \gamma_\gamma \gamma_{\text{VolF1}}$

v_b = volume del blocco di progetto

γ = peso di volume del blocco di progetto

γ_γ = fattore di sicurezza legato alla massa per unità di volume = 1.00

γ_{VolF1} = fattore di sicurezza legato al rilievo del blocco = 1.02 (fotogrammetria e rilievi geomeccanici)
 = 1.10 (assenza di rilievi)

v_d = velocità di progetto dei blocchi = $v_{95} \gamma_{\text{Tr}} \gamma_{\text{Dp}}$

v_{95} = velocità di impatto corrispondente al frattile del 95% delle velocità calcolate

γ_{Tr} = coefficiente di sicurezza sulle simulazioni = 1.02 (coefficienti di restituzione da back analysis)
 = 1.10 (coefficienti di restituzione da bibliografia)

γ_{Dp} = coefficiente di sicurezza sulla precisione del rilievo = 1.02 (rilievo di elevata qualità)
 = 1.10 (rilievo di qualità medio-bassa)

γ_R = fattore di sicurezza legato al rischio = 1.00 (conseguenze economiche modeste e danni facilmente riparabili)
 = 1.05 (conseguenze economiche rilevanti e danni facilmente riparabili)
 = 1.10 (conseguenze economiche rilevanti e danni difficilmente riparabili)
 = 1.20 (conseguenze economiche rilevanti e danni estesi non riparabili)

Nel caso specifico in studio si ipotizza l'impiego di reti paramassi con energi di assorbimento pari a 1'500kJ.

Nel prospetto di seguito illustrato è riportato il dettaglio del dimensionamento con i valori considerati dei coefficienti di sicurezza adottati.

MASSO DI PROGETTO		
$V_b =$	1.00	mc
$\gamma =$	2.80	t/mc
$\gamma_\gamma =$	1.00	--
$\gamma_{VolF1} =$	1.02	--
$m_d =$	2.86	t
VELOCITA' DI PROGETTO		
$V_{95} =$	25.00	m/s
$\gamma_{Tr} =$	1.10	--
$\gamma_{Dp} =$	1.02	--
$v_d =$	28.05	m/s
ENERGIA DI PROGETTO		
$m_d =$	2.86	t
$v_d =$	28.05	m/s
$\gamma_R =$	1.10	--
$E_{sd} =$	1236	kJ
VERIFICA RETE PARAMASSI		
$E_{sd} =$	1236	kJ
$E_{barriera} =$	1500	kJ
$\gamma_E =$	1.21	--

Si verifica che l'energia sollecitante di progetto (E_{sd}) è compatibile con l'energia dissipabile dalla barriera adottata ($E_{barriera}$):

$$E_{barriera} / E_{sd} = 1'500 / 1'236 = 1.21 > \gamma_E = 1.20$$

8.2. VERIFICA DEGLI ANCORAGGI

In figura n.8.1 è riportato l'estratto della scheda tecnica fornita dal Produttore relativa alla rete paramassi di progetto, con indicato il valore dell'azione assiale di trazione in corrispondenza dell'ancoraggio di monte, pari a $T_d = 195\text{kN}$.

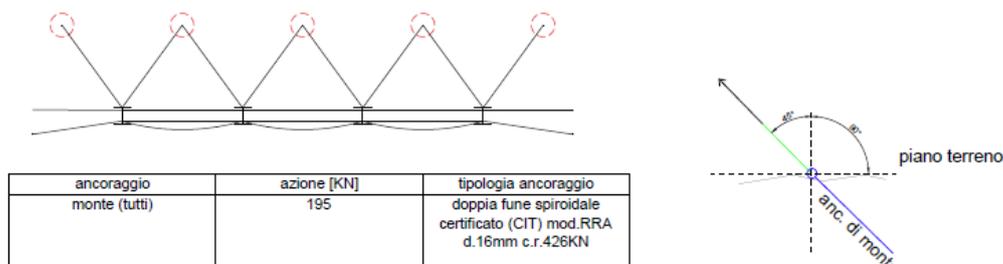


Figura n.8.1 – Rete paramassi tipo INCOFIL NFL_4 – Carico di progetto su ancoraggi di monte

Per quanto concerne la verifica a sfilamento all'interfaccia fune-malta si considera quanto segue:

D = diametro fune = 16mm

τ_{lim} = attrito laterale limite = $1.5\tau_{c0} = 0.9\text{N/mm}^2$

L = lunghezza di ancoraggio = 5.0m

Si verifica che vale quanto segue:

$$R_d = \pi D \tau_{lim} L \cong 226\text{kN} > 195\text{kN} = T_d$$

Per quanto concerne la verifica a sfilamento all'interfaccia malta-terreno si considera quanto segue:

D = diametro perforazione = 90mm

τ_{lim} = attrito laterale limite $\approx 0.6\text{N/mm}^2$ (valore cautelativo)

γ_R = coefficiente globale sulla resistenza di calcolo = 1.20 (NTC-2018 – tabella n.6.6.I)

ξ_a = coefficiente di correlazione = 1.80 (NTC-2018 – tabella n.6.6.III)

L = lunghezza di ancoraggio = 5.0m

L_u = lunghezza di ancoraggio utile = 3.5m (si assume che i primi 1.5m di perforazione avvengano in detrito/materiale sciolto)

Si verifica che vale quanto segue:

$$R_d = \pi D \tau_{lim} L_u / \gamma_R \xi_a \cong 275\text{kN} > 195\text{kN} = T_d$$

8.3. VERIFICA DI EQUILIBRIO DEL PLINTO DI FONDAZIONE A BASE MONTANTE

In figura n.8.2 è riportato l'estratto della scheda tecnica fornita dal Produttore relativa alla rete paramassi di progetto, con indicato il valore dei carichi agenti in corrispondenza della piastra di base del montante, pari a $N_d = 161\text{kN}$ (compressione) e $H_d = 79\text{kN}$ (taglio).

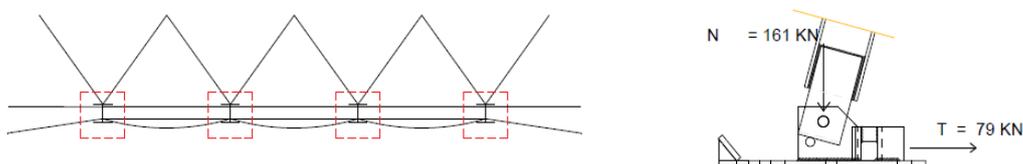


Figura n.8.1 – Rete paramassi tipo INCOFIL NFL_4 – Carico di progetto su ancoraggi di monte

In accordo a quanto previsto dalle NTC-2018 (paragrafo n.6.4.2.1) si verifica che valga:

$$H_d \leq (R_d / \gamma_R)$$

dove:

H_d = azione orizzontale di calcolo all'imposta della fondazione da calcolo del muro

R_d = resistenza di calcolo allo scorrimento

γ_R = coefficiente globale sulla resistenza = 1.10 (NTC-2018 – tab. 6.5.I)

La resistenza di calcolo allo scorrimento viene definita sulla base della seguente espressione:

$$R_d = \mu N_d$$

dove:

N_d = azione assiale da calcolo del muro

μ = coefficiente di attrito all'interfaccia plinto-roccia = 0.70 (valore cautelativo)

Nel caso specifico in studio si ottiene quanto segue:

$$H_d = 79\text{kN} < R_d / \gamma_R = 102\text{kN}$$

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC Foglio 24 di 43

9. ALLEGATO 1 – SEZIONE TIPO 1 – TABULATO

Richiami teorici

Analisi bidimensionale

Il pendio viene discretizzato con una serie di segmenti, e il masso è considerato come punto materiale, considerando quindi il moto del suo baricentro.

La modellazione del masso avviene tramite il suo peso, posizione e velocità iniziali al momento del distacco da pendio.

Modello di calcolo

I parametri necessari per il calcolo dell'interazione masso-versante sono rappresentati dai coeff. di restituzione (K_t e K_n) che rappresentano il rapporto fra la velocità prima e dopo l'impatto del masso con il terreno (movimento in volo) e dall'angolo di attrito massoversante (ϕ) attraverso il quale si porta in conto la dissipazione dell'energia cinetica (movimento di rotazione e traslazione). Per i parametri K_t , K_n e ϕ è possibile definire dei valori minimi e massimi per potere effettuare un'analisi di sensitività.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali l'utente ha la possibilità di inserire un intervallo di valori sia per la posizione che per la velocità.

La traiettoria di un masso in caduta è costituita da tratti parabolici (rimbalzi), eventuali tratti rettilinei in aria (caduta libera) e da tratti rettilinei sul pendio (moto di rotolamento o scivolamento).

Quando si muove nell'aria, il masso percorre traiettorie paraboliche, funzione della velocità iniziale, e cioè immediatamente successiva all'impatto i , e dell'accelerazione gravitazionale, si considerino trascurabili gli attriti tra aria e corpo.

La dissipazione dell'energia è messa in conto (in modo semplificato) mediante i cosiddetti coefficienti di restituzione normale (K_n) e tangenziale K_t .

I suddetti coefficienti vengono definiti come il rapporto fra la velocità al momento dell'impatto (V_i) e la velocità immediatamente dopo l'impatto (V_o).

$$K_t = v_{t0} / v_{ti}$$

$$K_n = v_{n0} / v_{ni}$$

I valori di tali coefficienti sono compresi fra 0 (urto completamente anelastico) ed 1 (urto completamente elastico).

Equazioni

Con riferimento al sistema di assi cartesiani (o,x,y) le componenti dell'accelerazione secondo gli assi x e y sono:

$$a_x = 0.0$$

$$a_y = -g$$

Integrando rispetto al tempo t misurato dall'istante dell'impatto i , si ha:

$$v_x = v_{1x}$$

$$v_y = v_{1y} - g t$$

integrando ancora:

$$x = v_{1x} t + x_p$$

$$y = v_{1y} t - 0.5 g t^2 + y_p$$

Dalla prima equazione si ricava:

$$t = (x - x_p) / v_{1x}$$

che sostituita nella seconda equazione fornisce:

$$t = -0.5 g (x - x_p)^2 / v_{1x}^2 + v_{1y} / v_{1x} (x - x_p) + y_p$$

Le due componenti della velocità v_{1x} e v_{1y} sono ricavabili a partire dalla velocità pre-impatto secondo il seguente procedimento:

$$v_{0n} = -v_{0x} \sin \alpha + v_{0y} \cos \alpha$$

$$v_{0t} = v_{0x} \cos \alpha + v_{0y} \sin \alpha$$

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC	Foglio 25 di 43

essendo v_0 la velocità pre-impatto, pertanto v_{0x} e v_{0y} sono le componenti di v_0 nel riferimento (o,x,y) mentre v_{0n} e v_{0t} sono le componenti nel riferimento (o,t,n) ; α è l'inclinazione del tratto di pendio.

Le componenti della velocità dopo l'impatto possono essere determinate dalle relazioni:

$$\begin{aligned}v_{1n} &= -k_n v_{0n} \\ v_{1t} &= k_t v_{0t}\end{aligned}$$

con: k_n = coeff. di restituzione normale; k_t = coeff. di restituzione tangenziale.

Adesso le componenti della velocità post-impatto nel riferimento (o,x,y) possono essere espresse come somma delle componenti di v_{1n} e v_{1t} secondo gli assi x ed y :

$$\begin{aligned}v_{1x} &= k_n v_{0n} \sin\alpha + k_t v_{0t} \cos\alpha \\ v_{1y} &= -k_t v_{0t} \cos\alpha + k_n v_{0n} \sin\alpha\end{aligned}$$

Note le velocità, è possibile determinare le coordinate del punto di impatto successivo date dall'intersezione della parabola che descrive il moto di caduta con il segmento che discretizza il profilo trasversale del versante nella sezione contenente il movimento di caduta.

$$\begin{aligned}t &= -0.5 g (x-x_p)^2 / v_{1x}^2 + v_{1y}/v_{1x} (x-x_p) + y_p \\ y &= mx - mx_1 + y_i\end{aligned}$$

essendo:

m = coeff. angolare del generico segmento che discretizza il pendio;

x_i, y_i = coordinate dell'estremo del segmento.

Il programma consente di affrontare il problema della caduta massi sia in modo **deterministico** che **probabilistico**. L'approccio probabilistico si rende necessario a causa dell'incertezza insita nella scelta delle grandezze da introdurre nella simulazione del modello quali il coefficiente di restituzione, l'angolo di attrito masso-versante. Viene utilizzato il metodo probabilistico di Monte Carlo basato sulla generazione dei numeri casuali.

Il procedimento di calcolo consente di individuare ed analizzare un serie di traiettorie. Per ogni traiettoria vengono determinati il punto di arresto, le altezze di rimbalzo e le velocità dei massi in ogni punto. Inoltre vengono determinate le quantità di energia cinetica e totale possedute dal corpo rigido in moto.

$$\begin{aligned}E_c &= 0.5 m v^2 \\ E_t &= h + 0.5 v^2 / g\end{aligned}$$

Dall'osservazione delle traiettorie e delle energie dei massi lungo il pendio è possibile effettuare il posizionamento e il dimensionamento delle opere di difesa (**barriere paramassi rigide ed elastiche, terrapieni paramassi**).

Il programma permette la definizione della barriera paramassi in funzione della dimensione e dell'energia assorbita. I parametri richiesti sono l'altezza, lo spessore e l'eventuale inclinazione della barriera per quanto riguarda la geometria mentre viene richiesta l'energia che può assorbire (fornita nella scheda dal costruttore) per quanto riguarda il dimensionamento.

Dati

Descrizione materiali

Simbologia adottata

Descrizione	Descrizione del materiale costituente il profilo topografico
K_{nmin}	Coefficiente di restituzione minimo normale all'elemento
K_{nmax}	Coefficiente di restituzione massimo normale all'elemento
K_{tmin}	Coefficiente di restituzione minimo tangente all'elemento
K_{tmax}	Coefficiente di restituzione massimo tangente all'elemento
ϕ_{min}	Angolo di attrito minimo dell'elemento espresso in gradi
ϕ_{max}	Angolo di attrito massimo dell'elemento espresso in gradi

Descrizione	K_{nmin}	K_{nmax}	K_{tmin}	K_{tmax}	ϕ_{min} [°]	ϕ_{max} [°]
Roccia in posto	0.75	0.85	0.75	0.85	26.00	28.00
Affioramenti di roccia con detrito	0.28	0.38	0.75	0.85	30.00	35.00
Detrito grossolano non vegetato	0.25	0.35	0.70	0.85	30.00	35.00
Detrito medio fine non vegetato	0.20	0.31	0.70	0.83	30.00	35.00
Detrito vegetato ad arbusti	0.20	0.30	0.50	0.70	30.00	35.00
Detrito vegetato a bosco	0.18	0.28	0.40	0.60	30.00	35.00
Terreno nudo o prato	0.15	0.25	0.35	0.55	30.00	35.00
Superfici pavimentate	0.30	0.40	0.80	0.90	30.00	35.00
Roccia	0.40	0.40	0.85	0.85	35.00	35.00
Roccia	0.30	0.40	0.70	0.87	28.00	30.00
Roccia	0.40	0.40	0.85	0.85	35.00	35.00

Profilo terreno

Simbologia adottata

n°	Identificativo punto
X	Ascissa punto, espresso in [m]
Y	Ordinata punto, espresso in [m]

n°	X [m]	Y [m]									
1	0.00	111.00	2	3.51	110.24	3	7.06	109.50	4	9.89	107.61
5	11.71	106.18	6	13.28	105.06	7	14.89	104.36	8	16.33	103.40
9	18.21	101.73	10	19.88	100.49	11	20.83	99.50	12	22.50	98.50
13	24.11	95.81	14	25.33	94.43	15	28.03	92.00	16	30.61	89.68
17	32.91	87.50	18	35.46	85.21	19	40.12	81.50	20	43.86	78.40
21	46.13	75.69	22	52.08	70.69	23	56.15	67.00	24	62.88	61.84
25	71.14	55.71	26	82.33	48.48	27	88.59	45.05	28	90.50	44.18
29	96.60	40.56	30	108.06	32.19	31	117.41	26.00	32	122.87	23.58
33	127.18	20.73	34	129.08	18.85	35	136.62	14.31	36	145.53	14.38
37	148.56	12.35	38	148.56	5.00	39	163.51	5.00			

Caratteristiche tratti

Simbologia adottata

n°	Identificativo tratto
X_i	Ascissa iniziale tratto espressa in [m]
Y_i	Ordinata iniziale tratto espressa in [m]
X_f	Ascissa finale tratto espressa in [m]
Y_f	Ordinata finale tratto espressa in [m]
Materiale	Descrizione materiale del tratto

n°	X_i [m]	Y_i [m]	X_f [m]	Y_f [m]	Materiale
1	0.00	111.00	3.51	110.24	Roccia in posto
2	3.51	110.24	7.06	109.50	Roccia in posto
3	7.06	109.50	9.89	107.61	Roccia in posto
4	9.89	107.61	11.71	106.18	Roccia in posto
5	11.71	106.18	13.28	105.06	Roccia in posto
6	13.28	105.06	14.89	104.36	Roccia in posto
7	14.89	104.36	16.33	103.40	Roccia in posto

n°	Xi	Yi	Xf	Yf	Materiale
	[m]	[m]	[m]	[m]	
8	16.33	103.40	18.21	101.73	Roccia in posto
9	18.21	101.73	19.88	100.49	Roccia in posto
10	19.88	100.49	20.83	99.50	Roccia in posto
11	20.83	99.50	22.50	98.50	Roccia in posto
12	22.50	98.50	24.11	95.81	Roccia in posto
13	24.11	95.81	25.33	94.43	Roccia in posto
14	25.33	94.43	28.03	92.00	Roccia in posto
15	28.03	92.00	30.61	89.68	Roccia in posto
16	30.61	89.68	32.91	87.50	Roccia in posto
17	32.91	87.50	35.46	85.21	Roccia in posto
18	35.46	85.21	40.12	81.50	Roccia in posto
19	40.12	81.50	43.86	78.40	Roccia in posto
20	43.86	78.40	46.13	75.69	Roccia in posto
21	46.13	75.69	52.08	70.69	Roccia in posto
22	52.08	70.69	56.15	67.00	Roccia in posto
23	56.15	67.00	62.88	61.84	Roccia in posto
24	62.88	61.84	71.14	55.71	Roccia in posto
25	71.14	55.71	82.33	48.48	Roccia in posto
26	82.33	48.48	88.59	45.05	Roccia in posto
27	88.59	45.05	90.50	44.18	Roccia in posto
28	90.50	44.18	96.60	40.56	Roccia in posto
29	96.60	40.56	108.06	32.19	Roccia in posto
30	108.06	32.19	117.41	26.00	Roccia in posto
31	117.41	26.00	122.87	23.58	Roccia in posto
32	122.87	23.58	127.18	20.73	Roccia in posto
33	127.18	20.73	129.08	18.85	Roccia in posto
34	129.08	18.85	136.62	14.31	Roccia in posto
35	136.62	14.31	145.53	14.38	Roccia in posto
36	145.53	14.38	148.56	12.35	Roccia in posto
37	148.56	12.35	148.56	5.00	Roccia in posto
38	148.56	5.00	163.51	5.00	Roccia in posto

Barriere

Simbologia adottata

n°	Identificativo barriera
X	Ascissa posizione barriera, espressa in [m]
H	Altezza espressa in [m]
R	Resistenza espressa in [kJ]
a	Inclinazione barriera espressa in [°]
Kr	Coefficiente di restituzione

n°	X	H	R	α	Kr
	[m]	[m]	[kJ]	[°]	
1	135.51	5.00	1500.00	34.00	0.10
2	126.52	5.00	1500.00	34.00	0.10
3	145.00	3.00	500.00	0.00	0.10

Posizioni iniziali di distacco

Simbologia adottata

n°	Indice posizione massi
Tipo	Tipo area di distacco (Griglia o Poligono)
Pi, Pf	Range di variabilità della posizione, espresso in [m]
Vi, Vf	Range di variabilità della velocità, espressa in [m/s]
M	Peso massa, espressa in [kg]
nd	Numero di massi che si distaccano dall'area

n°	Tipo	Pi	Pf	Vi	Vf	M	nd
		[m]	[m]	[m/s]	[m/s]	[kg]	
1	Poligono	2.50; 90.00; 0.00	33.00; 111.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	2800	1000
2	Poligono	46.00; 51.00; 0.00	80.00; 72.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	2800	1000
3	Poligono	94.00; 25.00; 0.00	122.00; 40.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	2800	1000



Opzioni di calcolo

Tipo analisi:

probabilistica

Parametri variabili:

posizione iniziale
velocità iniziale
coeff. restituzione tangente (Kt)
coeff. restituzione normale (Kn)
angolo di attrito

Coeff. di sicurezza barriera

1.00

Risultati

Sezioni

Simbologia adottata

N°	Indice sezione
X	Ascissa sezione espressa in [m]
N_{massi}	Numero massi nella sezione
V_{max}	Velocità massima nella sezione espressa in [m/s]
H_{max}	Altezza massima di rimbalzo nella sezione espressa in [m]
EC_{max}	Energia cinetica massima nella sezione espressa in [kJ]
Et_{max}	Energia totale massima nella sezione espressa in [kJ]

n°	X [m]	N_{massi}	V_{max} [m/s]	H_{max} [m]	EC_{max} [kJ]	Et_{max} [kJ]
1	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.64	0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	3.27	33	2.37	0.32	7.87	13.68
4	4.91	47	3.00	0.52	12.62	20.43
5	6.54	47	3.42	0.66	16.39	22.31
6	8.18	86	5.17	0.62	37.47	38.99
7	9.81	144	6.50	1.04	59.17	68.05
8	11.45	199	8.07	0.89	91.18	93.66
9	13.08	254	8.63	0.79	104.29	108.33
10	14.72	255	8.38	0.55	98.29	105.18
11	16.35	313	9.56	1.04	127.97	134.17
12	17.99	361	9.69	1.42	131.36	159.25
13	19.62	420	11.16	1.17	174.34	193.18
14	21.26	464	12.43	0.96	216.38	226.28
15	22.89	505	11.49	1.32	184.76	203.49
16	24.53	565	13.04	3.30	237.95	272.38
17	26.16	616	14.80	4.13	306.57	318.07
18	27.80	668	15.49	4.59	336.09	352.43
19	29.43	728	16.62	4.86	386.62	392.78
20	31.07	779	16.37	4.95	375.39	425.43
21	32.70	828	16.49	4.92	380.50	467.99
22	34.34	837	17.05	4.58	407.04	508.59
23	35.97	837	18.42	3.94	475.16	547.48
24	37.61	837	19.90	2.96	554.44	583.21
25	39.24	837	20.96	1.74	615.31	618.93
26	40.88	837	21.39	1.46	640.65	649.41
27	42.51	837	19.02	2.13	506.57	509.98
28	44.15	837	18.80	2.78	494.86	542.67
29	45.78	837	19.66	3.82	541.29	596.13
30	47.42	885	20.64	4.29	596.57	637.30
31	49.05	931	21.49	4.53	646.37	675.11
32	50.69	976	20.88	4.81	610.09	712.92
33	52.32	1024	21.84	5.03	667.90	751.15
34	53.96	1078	22.38	5.23	700.91	791.82
35	55.59	1126	23.23	5.32	755.65	832.48
36	57.23	1170	23.71	5.16	787.16	869.03
37	58.86	1210	23.60	4.81	779.53	903.45
38	60.50	1260	24.28	4.36	825.22	937.87
39	62.13	1304	24.98	3.81	873.47	972.29
40	63.77	1366	25.69	3.13	924.28	1006.09
41	65.40	1411	26.47	2.32	980.91	1039.38
42	67.04	1450	27.17	2.07	1033.57	1072.67
43	68.67	1513	27.93	2.15	1092.05	1105.96
44	70.31	1567	23.68	2.16	784.85	837.98
45	71.94	1620	24.23	2.02	821.93	869.20
46	73.58	1665	24.80	2.23	861.13	898.25
47	75.21	1702	25.39	2.38	902.44	927.31
48	76.85	1747	25.99	2.45	945.86	956.36
49	78.48	1794	26.14	2.46	956.69	967.20
50	80.12	1837	25.06	2.48	878.92	943.96
51	81.75	1837	25.42	2.51	904.65	973.02
52	83.39	1837	25.80	2.45	931.88	999.16
53	85.02	1837	26.19	2.30	960.62	1023.73
54	86.66	1837	26.60	2.09	990.85	1048.30
55	88.29	1837	27.03	1.83	1022.59	1072.87

n°	X	Nmassi	Vmax	Hmax	ECmax	Etmax
	[m]		[m/s]	[m]	[kJ]	[kJ]
56	89.93	1837	27.46	1.39	1055.83	1094.06
57	91.57	1837	27.91	1.02	1090.57	1118.53
58	93.20	1837	28.37	1.49	1126.81	1145.15
59	94.84	1863	28.84	2.10	1164.56	1171.78
60	96.47	1913	24.24	2.64	822.93	827.03
61	98.11	1969	24.50	3.35	840.63	859.33
62	99.74	2039	24.78	4.02	859.72	892.13
63	101.38	2084	25.07	4.63	880.22	924.93
64	103.01	2149	25.38	5.19	902.12	957.73
65	104.65	2206	25.71	5.70	925.41	990.53
66	106.28	2249	26.05	6.15	950.11	1023.32
67	107.92	2316	26.41	6.56	976.21	1056.12
68	109.55	2384	26.78	6.80	1003.71	1086.13
69	111.19	2438	27.16	6.99	1032.60	1115.86
70	112.82	2499	27.55	7.12	1062.90	1145.60
71	114.46	2559	27.96	7.19	1094.60	1175.33
72	116.09	2612	28.38	7.22	1127.70	1205.06
73	117.73	2657	28.81	7.12	1162.20	1232.89
74	119.36	2681	29.25	6.68	1198.09	1252.80
75	121.00	2721	29.71	6.19	1235.39	1272.72
76	122.63	2736	30.17	5.64	1274.09	1292.63
77	124.27	2727	30.64	5.34	1314.19	1320.88
78	125.90	2727	29.27	5.05	1199.15	1337.70
79	127.54	13	29.74	2.52	1238.45	1307.69
80	129.17	0	0.00	0.00	0.00	0.00
81	130.81	0	0.00	0.00	0.00	0.00
82	132.44	0	0.00	0.00	0.00	0.00
83	134.08	0	0.00	0.00	0.00	0.00
84	135.71	0	0.00	0.00	0.00	0.00
85	137.35	0	0.00	0.00	0.00	0.00
86	138.98	0	0.00	0.00	0.00	0.00
87	140.62	0	0.00	0.00	0.00	0.00
88	142.25	0	0.00	0.00	0.00	0.00
89	143.89	0	0.00	0.00	0.00	0.00
90	145.52	0	0.00	0.00	0.00	0.00
91	147.16	0	0.00	0.00	0.00	0.00
92	148.79	0	0.00	0.00	0.00	0.00
93	150.43	0	0.00	0.00	0.00	0.00
94	152.06	0	0.00	0.00	0.00	0.00
95	153.70	0	0.00	0.00	0.00	0.00
96	155.33	0	0.00	0.00	0.00	0.00
97	156.97	0	0.00	0.00	0.00	0.00
98	158.60	0	0.00	0.00	0.00	0.00
99	160.24	0	0.00	0.00	0.00	0.00
100	161.87	0	0.00	0.00	0.00	0.00
101	163.51	0	0.00	0.00	0.00	0.00

Risultati barriere

Simbologia adottata

n°	Identificativo barriera
X	Ascissa posizione barriera, espressa in [m]
Nmi	Numero massi bloccati
Nmp	Numero massi che oltrepassano
V_{max}	Velocità massima d'impatto, espressa in m/s
V_{med}	Velocità media d'impatto, espressa in m/s
E_c	Energia cinetica d'impatto, espressa in KJ
R	Resistenza della barriera, espressa in KJ
FS	Fattore di sicurezza (rapporto tra resistenza e energia cinetica di impatto R/E_c)

n°	Nmi	Nmp	Vmax	Vmed	Ec	R	FS
			[m/s]	[m/s]	[kJ]	[kJ]	
1	0	0	0.00	0.00	0.00	1500.00	100.000
2	24594	0	30.06	0.66	1264.71	1500.00	1.186
3	0	0	0.00	0.00	0.00	500.00	100.000

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC	Foglio 31 di 43

10. ALLEGATO 2 – SEZIONE TIPO 2 – TABULATO

Richiami teorici

Analisi bidimensionale

Il pendio viene discretizzato con una serie di segmenti, e il masso è considerato come punto materiale, considerando quindi il moto del suo baricentro.

La modellazione del masso avviene tramite il suo peso, posizione e velocità iniziali al momento del distacco da pendio.

Modello di calcolo

I parametri necessari per il calcolo dell'interazione masso-versante sono rappresentati dai coeff. di restituzione (K_t e K_n) che rappresentano il rapporto fra la velocità prima e dopo l'impatto del masso con il terreno (movimento in volo) e dall'angolo di attrito massoversante (ϕ) attraverso il quale si porta in conto la dissipazione dell'energia cinetica (movimento di rotazione e traslazione). Per i parametri K_t , K_n e ϕ è possibile definire dei valori minimi e massimi per potere effettuare un'analisi di sensitività.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali l'utente ha la possibilità di inserire un intervallo di valori sia per la posizione che per la velocità.

La traiettoria di un masso in caduta è costituita da tratti parabolici (rimbalzi), eventuali tratti rettilinei in aria (caduta libera) e da tratti rettilinei sul pendio (moto di rotolamento o scivolamento).

Quando si muove nell'aria, il masso percorre traiettorie paraboliche, funzione della velocità iniziale, e cioè immediatamente successiva all'impatto i , e dell'accelerazione gravitazionale, si considerino trascurabili gli attriti tra aria e corpo.

La dissipazione dell'energia è messa in conto (in modo semplificato) mediante i cosiddetti coefficienti di restituzione normale (K_n) e tangenziale K_t .

I suddetti coefficienti vengono definiti come il rapporto fra la velocità al momento dell'impatto (V_i) e la velocità immediatamente dopo l'impatto (V_o).

$$K_t = v_{t0} / v_{ti}$$

$$K_n = v_{n0} / v_{ni}$$

I valori di tali coefficienti sono compresi fra 0 (urto completamente anelastico) ed 1 (urto completamente elastico).

Equazioni

Con riferimento al sistema di assi cartesiani (o,x,y) le componenti dell'accelerazione secondo gli assi x e y sono:

$$a_x = 0.0$$

$$a_y = -g$$

Integrando rispetto al tempo t misurato dall'istante dell'impatto i , si ha:

$$v_x = v_{1x}$$

$$v_y = v_{1y} - g t$$

integrando ancora:

$$x = v_{1x} t + x_p$$

$$y = v_{1y} t - 0.5 g t^2 + y_p$$

Dalla prima equazione si ricava:

$$t = (x - x_p) / v_{1x}$$

che sostituita nella seconda equazione fornisce:

$$t = -0.5 g (x - x_p)^2 / v_{1x}^2 + v_{1y} / v_{1x} (x - x_p) + y_p$$

Le due componenti della velocità v_{1x} e v_{1y} sono ricavabili a partire dalla velocità pre-impatto secondo il seguente procedimento:

$$v_{0n} = -v_{0x} \sin \alpha + v_{0y} \cos \alpha$$

$$v_{0t} = v_{0x} \cos \alpha + v_{0y} \sin \alpha$$

essendo v_o la velocità pre-impatto, pertanto v_{ox} e v_{oy} sono le componenti di v_o nel riferimento (o,x,y) mentre v_{on} e v_{ot} sono le componenti nel riferimento (o,t,n); α è l'inclinazione del tratto di pendio.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC	Foglio 32 di 43

Le componenti della velocità dopo l'impatto possono essere determinate dalle relazioni:

$$v_{1n} = -k_n v_{0n}$$

$$v_{1t} = k_t v_{0t}$$

con: k_n = coeff. di restituzione normale; k_t = coeff. di restituzione tangenziale.

Adesso le componenti della velocità post-impatto nel riferimento (o,x,y) possono essere espresse come somma delle componenti di v_{1n} e v_{1t} secondo gli assi x ed y :

$$v_{1x} = k_n v_{0n} \sin\alpha + k_t v_{0t} \cos\alpha$$

$$v_{1y} = -k_t v_{0t} \cos\alpha + k_t v_{0t} \sin\alpha$$

Note le velocità, è possibile determinare le coordinate del punto di impatto successivo date dall'intersezione della parabola che descrive il moto di caduta con il segmento che discretizza il profilo trasversale del versante nella sezione contenente il movimento di caduta.

$$t = -0.5 g (x-x_p)^2 / v_{1x}^2 + v_{1y}/v_{1x} (x-x_p) + y_p$$

$$y = mx - mx_1 + y_i$$

essendo:

m = coeff. angolare del generico segmento che discretizza il pendio;

x_i, y_i = coordinate dell'estremo del segmento.

Il programma consente di affrontare il problema della caduta massi sia in modo **deterministico** che **probabilistico**. L'approccio probabilistico si rende necessario a causa dell'incertezza insita nella scelta delle grandezze da introdurre nella simulazione del modello quali il coefficiente di restituzione, l'angolo di attrito masso-versante. Viene utilizzato il metodo probabilistico di Monte Carlo basato sulla generazione dei numeri casuali.

Il procedimento di calcolo consente di individuare ed analizzare un serie di traiettorie. Per ogni traiettoria vengono determinati il punto di arresto, le altezze di rimbalzo e le velocità dei massi in ogni punto. Inoltre vengono determinate le quantità di energia cinetica e totale possedute dal corpo rigido in moto.

$$E_c = 0.5 m v^2$$

$$E_t = h + 0.5 v^2 / g$$

Dall'osservazione delle traiettorie e delle energie dei massi lungo il pendio è possibile effettuare il posizionamento e il dimensionamento delle opere di difesa (**barriere paramassi rigide ed elastiche, terrapieni paramassi**).

Il programma permette la definizione della barriera paramassi in funzione della dimensione e dell'energia assorbita. I parametri richiesti sono l'altezza, lo spessore e l'eventuale inclinazione della barriera per quanto riguarda la geometria mentre viene richiesta l'energia che può assorbire (fornita nella scheda dal costruttore) per quanto riguarda il dimensionamento.

Dati

Descrizione materiali

Simbologia adottata

<i>Descrizione</i>	Descrizione del materiale costituente il profilo topografico
K_{nmin}	Coefficiente di restituzione minimo normale all'elemento
K_{nmax}	Coefficiente di restituzione massimo normale all'elemento
K_{tmin}	Coefficiente di restituzione minimo tangente all'elemento
K_{tmax}	Coefficiente di restituzione massimo tangente all'elemento
ϕ_{min}	Angolo di attrito minimo dell'elemento espresso in gradi
ϕ_{max}	Angolo di attrito massimo dell'elemento espresso in gradi

Descrizione	K_{nmin}	K_{nmax}	K_{tmin}	K_{tmax}	ϕ_{min}	ϕ_{max}
					[°]	[°]
Roccia in posto	0.75	0.85	0.75	0.85	26.00	28.00
Affioramenti di roccia con detrito	0.28	0.38	0.75	0.85	30.00	35.00
Detrito grossolano non vegetato	0.25	0.35	0.70	0.85	30.00	35.00
Detrito medio fine non vegetato	0.20	0.31	0.70	0.83	30.00	35.00
Detrito vegetato ad arbusti	0.20	0.30	0.50	0.70	30.00	35.00
Detrito vegetato a bosco	0.18	0.28	0.40	0.60	30.00	35.00
Terreno nudo o prato	0.15	0.25	0.35	0.55	30.00	35.00
Superfici pavimentate	0.30	0.40	0.80	0.90	30.00	35.00

Profilo terreno

Simbologia adottata

n°	Identificativo punto
X	Ascissa punto, espresso in [m]
Y	Ordinata punto, espresso in [m]

n°	X	Y									
	[m]	[m]									
1	0,00	126,77	2	2,64	125,30	3	9,45	116,50	4	16,46	110,68
5	19,57	107,49	6	25,26	102,40	7	29,68	99,11	8	34,41	95,50
9	38,10	92,50	10	41,88	89,50	11	47,75	85,25	12	55,54	79,32
13	62,22	74,53	14	69,42	69,27	15	73,48	66,47	16	77,21	64,64
17	79,87	63,04	18	84,08	61,54	19	86,72	60,00	20	92,25	57,99
21	96,40	55,50	22	97,08	54,74	23	109,35	47,89	24	112,00	46,93
25	119,61	43,71	26	125,22	40,60	27	127,00	40,00	28	130,28	37,25
29	133,91	35,42	30	137,70	32,93	31	140,38	32,00	32	142,16	30,00
33	147,29	25,26	34	153,23	20,50	35	154,72	18,22	36	157,74	16,30
37	161,69	14,71	38	162,79	14,49	39	162,92	14,48	40	162,92	9,00
41	177,71	9,00									

Caratteristiche tratti

Simbologia adottata

n°	Identificativo tratto
X_i	Ascissa iniziale tratto espressa in [m]
Y_i	Ordinata iniziale tratto espressa in [m]
X_f	Ascissa finale tratto espressa in [m]
Y_f	Ordinata finale tratto espressa in [m]
<i>Materiale</i>	Descrizione materiale del tratto

n°	X_i	Y_i	X_f	Y_f	Materiale
	[m]	[m]	[m]	[m]	
1	0,00	126,77	2,64	125,30	Roccia in posto
2	2,64	125,30	9,45	116,50	Roccia in posto
3	9,45	116,50	16,46	110,68	Roccia in posto
4	16,46	110,68	19,57	107,49	Roccia in posto
5	19,57	107,49	25,26	102,40	Roccia in posto

n°	Xi [m]	Yi [m]	Xf [m]	Yf [m]	Materiale
6	25,26	102,40	29,68	99,11	Roccia in posto
7	29,68	99,11	34,41	95,50	Roccia in posto
8	34,41	95,50	38,10	92,50	Roccia in posto
9	38,10	92,50	41,88	89,50	Roccia in posto
10	41,88	89,50	47,75	85,25	Roccia in posto
11	47,75	85,25	55,54	79,32	Roccia in posto
12	55,54	79,32	62,22	74,53	Roccia in posto
13	62,22	74,53	69,42	69,27	Roccia in posto
14	69,42	69,27	73,48	66,47	Roccia in posto
15	73,48	66,47	77,21	64,64	Roccia in posto
16	77,21	64,64	79,87	63,04	Roccia in posto
17	79,87	63,04	84,08	61,54	Roccia in posto
18	84,08	61,54	86,72	60,00	Roccia in posto
19	86,72	60,00	92,25	57,99	Roccia in posto
20	92,25	57,99	96,40	55,50	Roccia in posto
21	96,40	55,50	97,08	54,74	Roccia in posto
22	97,08	54,74	109,35	47,89	Roccia in posto
23	109,35	47,89	112,00	46,93	Roccia in posto
24	112,00	46,93	119,61	43,71	Roccia in posto
25	119,61	43,71	125,22	40,60	Roccia in posto
26	125,22	40,60	127,00	40,00	Roccia in posto
27	127,00	40,00	130,28	37,25	Roccia in posto
28	130,28	37,25	133,91	35,42	Roccia in posto
29	133,91	35,42	137,70	32,93	Roccia in posto
30	137,70	32,93	140,38	32,00	Roccia in posto
31	140,38	32,00	142,16	30,00	Roccia in posto
32	142,16	30,00	147,29	25,26	Roccia in posto
33	147,29	25,26	153,23	20,50	Roccia in posto
34	153,23	20,50	154,72	18,22	Roccia in posto
35	154,72	18,22	157,74	16,30	Roccia in posto
36	157,74	16,30	161,69	14,71	Roccia in posto
37	161,69	14,71	162,79	14,49	Roccia in posto
38	162,79	14,49	162,92	14,48	Roccia in posto
39	162,92	14,48	162,92	9,00	Roccia in posto
40	162,92	9,00	177,71	9,00	Roccia in posto

Barriere

Simbologia adottata

n°	Identificativo barriera
X	Ascissa posizione barriera, espressa in [m]
H	Altezza espressa in [m]
R	Resistenza espressa in [kJ]
α	Inclinazione barriera espressa in [°]
K_r	Coefficiente di restituzione

n°	X [m]	H [m]	R [kJ]	α [°]	K_r
1	133,00	5,00	1500,00	35,00	0.10
2	162,00	3,00	500,00	0,00	0.10
3	15,00	5,00	1500,00	35,00	0.10
4	91,00	5,00	1500,00	34,00	0.10

Posizioni iniziali di distacco

Simbologia adottata

n°	Indice posizione massi
Tipo	Tipo area di distacco (Griglia o Poligono)
P_i, P_f	Range di variabilità della posizione, espresso in [m]
V_i, V_f	Range di variabilità della velocità, espressa in [m/s]
M	Peso massa, espressa in [kg]
nd	Numero di massi che si distaccano dall'area



n°	Tipo	Pi [m]	Pf [m]	Vi [m/s]	Vf [m/s]	M [kg]	nd
1	Poligono	0,00; 115,00; 0,00	15,00; 126,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	2800	1000
2	Poligono	15,00; 68,00; 0,00	75,00; 111,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	2800	1000
3	Poligono	91,00; 38,00; 0,00	135,00; 58,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	0,00; 0,00; 0,00	2800	1000

Opzioni di calcolo

Tipo analisi:

probabilistica

Parametri variabili:

posizione iniziale
velocità iniziale
coeff. restituzione tangente (Kt)
coeff. restituzione normale (Kn)
angolo di attrito

Coeff. di sicurezza barriera

1.00

Risultati

Sezioni

Simbologia adottata

N°	Indice sezione
X	Ascissa sezione espressa in [m]
N_{massi}	Numero massi nella sezione
V_{max}	Velocità massima nella sezione espressa in [m/s]
H_{max}	Altezza massima di rimbalzo nella sezione espressa in [m]
EC_{max}	Energia cinetica massima nella sezione espressa in [kJ]
Et_{max}	Energia totale massima nella sezione espressa in [kJ]

n°	X [m]	N_{massi}	V_{max} [m/s]	H_{max} [m]	EC_{max} [kJ]	Et_{max} [kJ]
1	0,00	7	0.00	0,00	0.00	0.00
2	1,78	108	1.54	0,00	3.33	3.33
3	3,55	227	4.59	0,51	29.53	42.05
4	5,33	348	8.11	0,87	92.10	100.59
5	7,11	472	9.37	1,34	122.81	134.35
6	8,89	596	11.44	1,55	183.15	187.02
7	10,66	715	11.90	1,38	198.36	200.16
8	12,44	832	11.69	1,94	191.40	199.59
9	14,22	938	12.38	2,23	214.54	240.11
10	15,99	1	8.37	0,04	98.07	99.14
11	17,77	0	0.00	0,00	0.00	0.00
12	19,55	31	6.27	0,96	54.98	69.61
13	21,33	60	8.85	1,35	109.77	113.34
14	23,10	86	9.91	2,08	137.37	156.47
15	24,88	114	11.07	2,38	171.46	195.09
16	26,66	154	11.84	2,26	196.27	224.05
17	28,43	180	13.02	2,14	237.30	250.22
18	30,21	210	13.43	2,70	252.49	254.74
19	31,99	250	13.29	3,02	247.19	260.23
20	33,76	283	13.81	2,96	266.94	297.47
21	35,54	311	15.15	2,83	321.47	336.27
22	37,32	342	15.47	3,14	334.94	362.89
23	39,10	367	16.63	3,16	387.24	402.03
24	40,87	395	17.58	2,77	432.51	438.27
25	42,65	419	16.71	2,78	390.95	407.95
26	44,43	454	16.78	2,83	394.38	408.91
27	46,20	488	16.75	2,75	392.57	415.50
28	47,98	503	17.73	2,85	440.30	451.07
29	49,76	532	18.57	2,93	482.96	488.22
30	51,54	569	19.19	2,87	515.42	524.07
31	53,31	595	18.30	2,64	469.00	497.91
32	55,09	632	19.24	2,72	518.43	535.06
33	56,87	671	20.04	2,67	562.38	570.59
34	58,64	701	20.78	2,28	604.26	605.58
35	60,42	726	19.72	2,34	544.60	547.69
36	62,20	756	19.29	2,46	520.89	528.23
37	63,98	778	19.70	2,44	543.27	547.79
38	65,75	811	19.81	2,15	549.32	572.40
39	67,53	837	20.57	2,14	592.17	608.05
40	69,31	865	21.36	2,14	638.71	643.70
41	71,08	887	21.42	1,87	642.58	664.59
42	72,86	913	22.17	1,84	687.81	698.24
43	74,64	941	21.46	1,57	644.69	668.58
44	76,42	943	20.12	1,73	566.63	575.23
45	78,19	943	20.71	1,68	600.64	602.16
46	79,97	943	19.28	2,17	520.63	528.25
47	81,75	915	18.90	2,23	499.91	545.64
48	83,52	569	19.16	2,15	514.19	563.02
49	85,30	554	19.48	2,22	531.02	588.02

n°	X	N _{massi}	V _{max}	H _{max}	EC _{max}	Et _{max}
	[m]		[m/s]	[m]	[kJ]	[kJ]
50	87,08	554	19.83	2,33	550.40	614.32
51	88,86	530	20.32	2,20	577.87	632.06
52	90,63	506	20.85	2,14	608.53	649.80
53	92,41	0	5.76	0,00	46.50	46.50
54	94,19	6	3.13	0,11	13.70	16.86
55	95,96	46	5.63	0,85	44.33	46.49
56	97,74	88	6.91	1,46	66.80	79.18
57	99,52	134	8.17	1,59	93.47	97.62
58	101,29	164	8.81	1,93	108.66	110.90
59	103,07	200	9.53	1,70	127.16	133.19
60	104,85	254	10.07	1,98	142.03	146.67
61	106,63	292	10.19	1,91	145.28	155.08
62	108,40	324	10.78	2,05	162.56	170.28
63	110,18	362	11.18	1,99	175.11	184.20
64	111,96	389	11.68	2,04	190.86	194.99
65	113,73	381	10.84	1,97	164.63	170.51
66	115,51	412	10.58	1,87	156.63	185.28
67	117,29	433	11.51	1,55	185.40	205.92
68	119,07	451	12.29	1,70	211.31	226.57
69	120,84	490	13.11	1,45	240.70	251.66
70	122,62	537	14.05	1,69	276.24	278.71
71	124,40	591	12.63	1,71	223.43	229.69
72	126,17	599	13.01	1,45	236.97	243.12
73	127,95	597	13.81	1,90	266.90	272.66
74	129,73	641	14.68	2,69	301.57	309.42
75	131,51	677	14.55	3,24	296.47	309.00
76	133,28	324	13.01	2,93	237.04	279.76
77	135,06	0	0.00	0,00	0.00	0.00
78	136,84	0	0.00	0,00	0.00	0.00
79	138,61	0	0.00	0,00	0.00	0.00
80	140,39	0	0.00	0,00	0.00	0.00
81	142,17	0	0.00	0,00	0.00	0.00
82	143,95	0	0.00	0,00	0.00	0.00
83	145,72	0	0.00	0,00	0.00	0.00
84	147,50	0	0.00	0,00	0.00	0.00
85	149,28	0	0.00	0,00	0.00	0.00
86	151,05	0	0.00	0,00	0.00	0.00
87	152,83	0	0.00	0,00	0.00	0.00
88	154,61	0	0.00	0,00	0.00	0.00
89	156,38	0	0.00	0,00	0.00	0.00
90	158,16	0	0.00	0,00	0.00	0.00
91	159,94	0	0.00	0,00	0.00	0.00
92	161,72	0	0.00	0,00	0.00	0.00
93	163,49	0	0.00	0,00	0.00	0.00
94	165,27	0	0.00	0,00	0.00	0.00
95	167,05	0	0.00	0,00	0.00	0.00
96	168,82	0	0.00	0,00	0.00	0.00
97	170,60	0	0.00	0,00	0.00	0.00
98	172,38	0	0.00	0,00	0.00	0.00
99	174,16	0	0.00	0,00	0.00	0.00
100	175,93	0	0.00	0,00	0.00	0.00
101	177,71	0	0.00	0,00	0.00	0.00

Risultati barriere

Simbologia adottata

n°	Identificativo barriera
X	Ascissa posizione barriera, espressa in [m]
N _{mi}	Numero massi bloccati
N _{mp}	Numero massi che oltrepassano
V _{max}	Velocità massima d'impatto, espressa in m/s
V _{med}	Velocità media d'impatto, espressa in m/s
E _c	Energia cinetica d'impatto, espressa in KJ
R	Resistenza della barriera, espressa in KJ



FS

Fattore di sicurezza (rapporto tra resistenza e energia cinetica di impatto R/Ec)

n°	Nmi	Nmp	Vmax [m/s]	Vmed [m/s]	Ec [kJ]	R [kJ]	FS
1	27597	0	14.21	0.50	282.84	1500.00	5.303
2	0	0	0.00	0.00	0.00	500.00	100.000
3	9861	0	13.20	1.31	243.83	1500.00	6.152
4	9955	0	21.13	1.10	624.80	1500.00	2.401

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC Foglio 39 di 43

11. ALLEGATO 3 – SEZIONE TIPO 3 – TABULATO

Richiami teorici

Analisi bidimensionale

Il pendio viene discretizzato con una serie di segmenti, e il masso è considerato come punto materiale, considerando quindi il moto del suo baricentro.

La modellazione del masso avviene tramite il suo peso, posizione e velocità iniziali al momento del distacco da pendio.

Modello di calcolo

I parametri necessari per il calcolo dell'interazione masso-versante sono rappresentati dai coeff. di restituzione (K_t e K_n) che rappresentano il rapporto fra la velocità prima e dopo l'impatto del masso con il terreno (movimento in volo) e dall'angolo di attrito massoversante (ϕ) attraverso il quale si porta in conto la dissipazione dell'energia cinetica (movimento di rotazione e traslazione). Per i parametri K_t , K_n e ϕ è possibile definire dei valori minimi e massimi per potere effettuare un'analisi di sensitività.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali l'utente ha la possibilità di inserire un intervallo di valori sia per la posizione che per la velocità.

La traiettoria di un masso in caduta è costituita da tratti parabolici (rimbalzi), eventuali tratti rettilinei in aria (caduta libera) e da tratti rettilinei sul pendio (moto di rotolamento o scivolamento).

Quando si muove nell'aria, il masso percorre traiettorie paraboliche, funzione della velocità iniziale, e cioè immediatamente successiva all'impatto i , e dell'accelerazione gravitazionale, si considerino trascurabili gli attriti tra aria e corpo.

La dissipazione dell'energia è messa in conto (in modo semplificato) mediante i cosiddetti coefficienti di restituzione normale (K_n) e tangenziale K_t .

I suddetti coefficienti vengono definiti come il rapporto fra la velocità al momento dell'impatto (V_i) e la velocità immediatamente dopo l'impatto (V_o).

$$K_t = v_{t0} / v_{ti}$$

$$K_n = v_{n0} / v_{ni}$$

I valori di tali coefficienti sono compresi fra 0 (urto completamente anelastico) ed 1 (urto completamente elastico).

Equazioni

Con riferimento al sistema di assi cartesiani (o,x,y) le componenti dell'accelerazione secondo gli assi x e y sono:

$$a_x = 0.0$$

$$a_y = -g$$

Integrando rispetto al tempo t misurato dall'istante dell'impatto i , si ha:

$$v_x = v_{1x}$$

$$v_y = v_{1y} - g t$$

integrando ancora:

$$x = v_{1x} t + x_p$$

$$y = v_{1y} t - 0.5 g t^2 + y_p$$

Dalla prima equazione si ricava:

$$t = (x - x_p) / v_{1x}$$

che sostituita nella seconda equazione fornisce:

$$t = -0.5 g (x - x_p)^2 / v_{1x}^2 + v_{1y} / v_{1x} (x - x_p) + y_p$$

Le due componenti della velocità v_{1x} e v_{1y} sono ricavabili a partire dalla velocità pre-impatto secondo il seguente procedimento:

$$v_{0n} = -v_{0x} \sin \alpha + v_{0y} \cos \alpha$$

$$v_{0t} = v_{0x} \cos \alpha + v_{0y} \sin \alpha$$

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	A301-0X-D-CV-CL-IN21-0X-010-A01.DOC	Foglio 40 di 43

essendo v_0 la velocità pre-impatto, pertanto v_{0x} e v_{0y} sono le componenti di v_0 nel riferimento (o,x,y) mentre v_{0n} e v_{0t} sono le componenti nel riferimento (o,t,n) ; α è l'inclinazione del tratto di pendio.

Le componenti della velocità dopo l'impatto possono essere determinate dalle relazioni:

$$\begin{aligned} v_{1n} &= -k_n v_{0n} \\ v_{1t} &= k_t v_{0t} \end{aligned}$$

con: k_n = coeff. di restituzione normale; k_t = coeff. di restituzione tangenziale.

Adesso le componenti della velocità post-impatto nel riferimento (o,x,y) possono essere espresse come somma delle componenti di v_{1n} e v_{1t} secondo gli assi x ed y :

$$\begin{aligned} v_{1x} &= k_n v_{0n} \sin\alpha + k_t v_{0t} \cos\alpha \\ v_{1y} &= -k_t v_{0t} \cos\alpha + k_n v_{0n} \sin\alpha \end{aligned}$$

Note le velocità, è possibile determinare le coordinate del punto di impatto successivo date dall'intersezione della parabola che descrive il moto di caduta con il segmento che discretizza il profilo trasversale del versante nella sezione contenente il movimento di caduta.

$$\begin{aligned} t &= -0.5 g (x-x_p)^2 / v_{1x}^2 + v_{1y}/v_{1x} (x-x_p) + y_p \\ y &= mx - mx_1 + y_i \end{aligned}$$

essendo:

m = coeff. angolare del generico segmento che discretizza il pendio;

x_i, y_i = coordinate dell'estremo del segmento.

Il programma consente di affrontare il problema della caduta massi sia in modo **deterministico** che **probabilistico**. L'approccio probabilistico si rende necessario a causa dell'incertezza insita nella scelta delle grandezze da introdurre nella simulazione del modello quali il coefficiente di restituzione, l'angolo di attrito massa-versante. Viene utilizzato il metodo probabilistico di Monte Carlo basato sulla generazione dei numeri casuali.

Il procedimento di calcolo consente di individuare ed analizzare un serie di traiettorie. Per ogni traiettoria vengono determinati il punto di arresto, le altezze di rimbalzo e le velocità dei massi in ogni punto. Inoltre vengono determinate le quantità di energia cinetica e totale possedute dal corpo rigido in moto.

$$\begin{aligned} E_c &= 0.5 m v^2 \\ E_t &= h + 0.5 v^2 / g \end{aligned}$$

Dall'osservazione delle traiettorie e delle energie dei massi lungo il pendio è possibile effettuare il posizionamento e il dimensionamento delle opere di difesa (**barriere paramassi rigide ed elastiche, terrapieni paramassi**).

Il programma permette la definizione della barriera paramassi in funzione della dimensione e dell'energia assorbita. I parametri richiesti sono l'altezza, lo spessore e l'eventuale inclinazione della barriera per quanto riguarda la geometria mentre viene richiesta l'energia che può assorbire (fornita nella scheda dal costruttore) per quanto riguarda il dimensionamento.

Dati

Descrizione materiali

Simbologia adottata

Descrizione	Descrizione del materiale costituente il profilo topografico
K_{nmin}	Coefficiente di restituzione minimo normale all'elemento
K_{nmax}	Coefficiente di restituzione massimo normale all'elemento
K_{tmin}	Coefficiente di restituzione minimo tangente all'elemento
K_{tmax}	Coefficiente di restituzione massimo tangente all'elemento
ϕ_{min}	Angolo di attrito minimo dell'elemento espresso in gradi
ϕ_{max}	Angolo di attrito massimo dell'elemento espresso in gradi

Descrizione	K_{nmin}	K_{nmax}	K_{tmin}	K_{tmax}	ϕ_{min} [°]	ϕ_{max} [°]
Roccia in posto	0.75	0.85	0.75	0.85	26.00	28.00
Affioramenti di roccia con detrito	0.28	0.38	0.75	0.85	30.00	35.00
Detrito grossolano non vegetato	0.25	0.35	0.70	0.85	30.00	35.00
Detrito medio fine non vegetato	0.20	0.31	0.70	0.83	30.00	35.00
Detrito vegetato ad arbusti	0.20	0.30	0.50	0.70	30.00	35.00
Detrito vegetato a bosco	0.18	0.28	0.40	0.60	30.00	35.00
Terreno nudo o prato	0.15	0.25	0.35	0.55	30.00	35.00
Superfici pavimentate	0.30	0.40	0.80	0.90	30.00	35.00

Profilo terreno

Simbologia adottata

n°	Identificativo punto
X	Ascissa punto, espresso in [m]
Y	Ordinata punto, espresso in [m]

n°	X [m]	Y [m]									
1	0.00	82.26	2	2.68	83.00	3	4.42	84.41	4	5.66	84.70
5	9.34	85.82	6	12.10	86.44	7	14.12	87.97	8	17.21	89.51
9	20.77	89.80	10	24.19	90.49	11	28.66	90.72	12	30.50	90.54
13	34.30	89.49	14	38.13	89.00	15	39.35	88.50	16	40.07	87.88
17	41.03	86.13	18	43.61	82.66	19	49.52	76.10	20	54.66	71.26
21	55.50	70.27	22	57.58	66.98	23	65.25	60.68	24	66.30	59.71
25	67.80	59.40	26	77.43	50.23	27	82.84	45.87	28	85.16	44.24
29	88.67	40.18	30	93.39	36.50	31	97.03	32.50	32	104.11	27.00
33	106.95	25.06	34	111.70	21.00	35	117.77	16.76	36	121.95	14.21
37	125.89	11.39	38	126.93	11.02	39	129.19	9.35	40	131.55	8.70
41	131.55	5.00	42	163.29	5.00						

Caratteristiche tratti

Simbologia adottata

n°	Identificativo tratto
X_i	Ascissa iniziale tratto espressa in [m]
Y_i	Ordinata iniziale tratto espressa in [m]
X_f	Ascissa finale tratto espressa in [m]
Y_f	Ordinata finale tratto espressa in [m]
Materiale	Descrizione materiale del tratto

n°	X_i [m]	Y_i [m]	X_f [m]	Y_f [m]	Materiale
1	0.00	82.26	2.68	83.00	Roccia in posto
2	2.68	83.00	4.42	84.41	Roccia in posto
3	4.42	84.41	5.66	84.70	Roccia in posto
4	5.66	84.70	9.34	85.82	Roccia in posto
5	9.34	85.82	12.10	86.44	Roccia in posto
6	12.10	86.44	14.12	87.97	Roccia in posto
7	14.12	87.97	17.21	89.51	Roccia in posto
8	17.21	89.51	20.77	89.80	Roccia in posto
9	20.77	89.80	24.19	90.49	Roccia in posto

n°	Xi [m]	Yi [m]	Xf [m]	Yf [m]	Materiale
10	24.19	90.49	28.66	90.72	Roccia in posto
11	28.66	90.72	30.50	90.54	Roccia in posto
12	30.50	90.54	34.30	89.49	Roccia in posto
13	34.30	89.49	38.13	89.00	Roccia in posto
14	38.13	89.00	39.35	88.50	Roccia in posto
15	39.35	88.50	40.07	87.88	Roccia in posto
16	40.07	87.88	41.03	86.13	Roccia in posto
17	41.03	86.13	43.61	82.66	Roccia in posto
18	43.61	82.66	49.52	76.10	Roccia in posto
19	49.52	76.10	54.66	71.26	Roccia in posto
20	54.66	71.26	55.50	70.27	Roccia in posto
21	55.50	70.27	57.58	66.98	Roccia in posto
22	57.58	66.98	65.25	60.68	Roccia in posto
23	65.25	60.68	66.30	59.71	Roccia in posto
24	66.30	59.71	67.80	59.40	Roccia in posto
25	67.80	59.40	77.43	50.23	Roccia in posto
26	77.43	50.23	82.84	45.87	Roccia in posto
27	82.84	45.87	85.16	44.24	Roccia in posto
28	85.16	44.24	88.67	40.18	Roccia in posto
29	88.67	40.18	93.39	36.50	Roccia in posto
30	93.39	36.50	97.03	32.50	Roccia in posto
31	97.03	32.50	104.11	27.00	Roccia in posto
32	104.11	27.00	106.95	25.06	Roccia in posto
33	106.95	25.06	111.70	21.00	Roccia in posto
34	111.70	21.00	117.77	16.76	Roccia in posto
35	117.77	16.76	121.95	14.21	Roccia in posto
36	121.95	14.21	125.89	11.39	Roccia in posto
37	125.89	11.39	126.93	11.02	Roccia in posto
38	126.93	11.02	129.19	9.35	Roccia in posto
39	129.19	9.35	131.55	8.70	Roccia in posto
40	131.55	8.70	131.55	5.00	Roccia in posto
41	131.55	5.00	163.29	5.00	Roccia in posto

Barriere

Simbologia adottata

n°	Identificativo barriera
X	Ascissa posizione barriera, espressa in [m]
H	Altezza espressa in [m]
R	Resistenza espressa in [kJ]
α	Inclinazione barriera espressa in [°]
K_r	Coefficiente di restituzione

n°	X [m]	H [m]	R [kJ]	α [°]	K_r
1	121.00	5.00	1500.00	35.00	0.10
2	111.00	5.00	1500.00	35.00	0.10
3	130.00	3.00	500.00	0.00	0.10

Posizioni iniziali di distacco

Simbologia adottata

n°	Indice posizione massi
Tipo	Tipo area di distacco (Griglia o Poligono)
P_i, P_f	Range di variabilità della posizione, espresso in [m]
V_i, V_f	Range di variabilità della velocità, espressa in [m/s]
M	Peso massa, espressa in [kg]
nd	Numero di massi che si distaccano dall'area

n°	Tipo	P_i [m]	P_f [m]	V_i [m/s]	V_f [m/s]	M [kg]	nd
1	Poligono	34.00; 66.00; 0.00	60.00; 90.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	2800	1000
2	Poligono	72.00; 22.00; 0.00	112.00; 52.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	0.00; 0.00; 0.00	2800	1000

Opzioni di calcolo

Tipo analisi:

probabilistica

Parametri variabili:

posizione iniziale
velocità iniziale
coeff. restituzione tangente (Kt)
coeff. restituzione normale (Kn)
angolo di attrito

Coeff. di sicurezza barriera

1.00