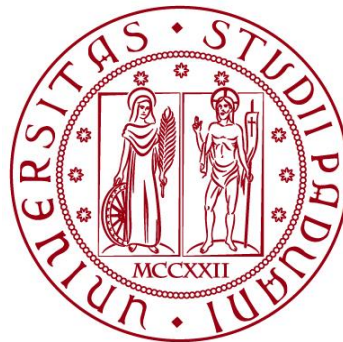


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio



TESI DI LAUREA

OPERE DI DIFESA DA CADUTA MASSI

PROTECTION STRUCTURES FROM ROCKFALL HAZARD

Relatore: Prof. PAOLO CARRUBBA

Correlatore: Prof. PAOLO CARRUBA

Laureanda: Andrea Cailotto

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Premesse e scopo della tesi

La caduta massi si origina dal distacco di blocchi rocciosi da formazioni geologiche sottoposte ai processi di deterioramento in conseguenza dell'alternarsi delle stagioni e dell'azione dell'acqua e del vento. Insediamenti e infrastrutture vulnerabili alla caduta massi, costituiscono un importante argomento di studio e di applicazioni tecnologiche, soprattutto nelle fasce alpine e appenniniche del territorio nazionale. Scopo della tesi è quello di definire i principali aspetti cinematici della caduta massi e di presentare un intervento di mitigazione del rischio realizzato nel comprensorio di Bolzano.

INDICE

Premesse e scopo della tesi	3
1. INTRODUZIONE	7
2. SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE.....	8
3. ANALISI DEL MOVIMENTO DI CADUTA MASSI.....	14
3.1. MOTO DEL BLOCCO IN ARIA.....	14
3.2. ITERAZIONE BLOCCO-PENDIO.....	17
4. METODI PER LA MODELLAZIONE PREVISIONALE DEI FENOMENI DI CADUTA MASSI	28
4.1. METODO LUMPED MASS.....	30
5. OPERE DI DIFESA	33
<i>5.1.1. Barriere paramassi flessibili</i>	<i>36</i>
<i>5.1.2. Barriere paramassi rigide</i>	<i>39</i>
<i>5.1.3. Certificazioni barriere paramassi.....</i>	<i>40</i>
5.2. VALLI E RILEVATI PARAMASSI.....	44
5.3 GALLERIE ARTIFICIALI.....	46
5.4 RETI PARAMASSI.....	47
6. CASO DI STUDIO: REALIZZAZIONE DI UN RILEVATO PARAMASSI A PROTEZIONE DEL RIFUGIO ALPE DI TIRES	48
6.1. METODO DI CALCOLO UTILIZZATO	49
6.2. DEFINIZIONE DELLA TRAIETTORIA DI CALCOLO, BLOCCO DI PROGETTO, PARAMETRI DELLA SIMULAZIONE	50
6.3. PROGETTAZIONE RILEVATO PARAMASSI.....	60
<i>6.3.1. Generalità</i>	<i>60</i>
<i>6.3.2. Risultati delle simulazioni di caduta massi.....</i>	<i>61</i>
<i>6.3.3. Definizione energia di progetto</i>	<i>62</i>

<i>6.3.4. Definizione dell'altezza di intercettazione di progetto</i>	63
<i>6.3.5. Verifica di stabilità esterna del rilevato paramassi.....</i>	64
7. CONCLUSIONI	68
Ringraziamenti.....	69
Bibliografia	71
Sitografia.....	72

1. INTRODUZIONE

La caduta massi è uno dei rischi geologici più frequenti nel territorio nazionale, soprattutto negli ambienti montani. Questo fenomeno è dovuto in prima linea alla topografia del territorio, ma è anche innescato da eventi climatici o biologici che provocano un cambiamento nelle forze che agiscono sulla roccia circostante, e quindi ne viene meno il suo supporto. Questi eventi possono includere fattori climatici dovuti dall'acqua, processo di gelo-disgelo, crescita delle radici e urbanizzazione del paesaggio. Nasce quindi la necessità di proteggere vite umane, beni e infrastrutture varie.

I blocchi possono avere una cinematica di corpo singolo o interagire mutuamente come ad esempio nel caso delle valanghe. Nel presente lavoro, dopo una breve rassegna sulle modalità di attivazione dei collassi e sulle tipologie geologiche, si presenta una sintesi dei moti del blocco singolo al fine di valutarne la forza d'impatto, necessaria al dimensionamento delle opere di contenimento.

Tali opere possono essere attive o passive e nel seguente elaborato verranno approfondite quest'ultime che sono: barriere, rilevati o valli, coperture di gallerie artificiali e reti. Infine, si riporta lo studio della realizzazione di un rilevato paramassi a protezione di un rifugio situato nel comune di Tires, in provincia di Bolzano.

2. SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE

Ci sono vari modi per classificare le frane ed il più utilizzato è quello proposto da Varnes (1978).

Varnes definisce i movimenti franosi come: " *fenomeni di massa coinvolgenti rocce, detriti o terre, attraverso i quali si manifesta tendenza, da parte di un corpo, al raggiungimento di un minimo di energia potenziale*" (Varnes D.J., 1978). Suddetta è basata su due caratteristiche fondamentali:

- il tipo di materiale, che comprende roccia e terreni. I terreni sono divisi in due sottocategorie: terra, costituita da almeno l'80% di materiale a grana fine; detriti, costituiti da una percentuale di materiale a granulometria grossolana compresa tra 20 e 80%.
- tipo di movimento, diviso in 6 tipologie di cinematismi: crolli, ribaltamenti, scorrimenti, espansioni laterali, flussi e movimenti complessi.

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	ROCCIA	SUOLO	
		Grossolano	Fine
CROLLI (falls)	crolli di roccia	crolli di detrito	crolli di terra
RIBALTAMENTI (topples)	ribaltamento di roccia	ribaltamento di detrito	ribaltamento di terra
SCIVOLAMENTI (SLIDES)	ROTAZIONALI	scorrimento di detrito	scorrimento di terra
	TRASLAZIONALI		
ESPANDIMENTI LATERALI (spreads)	espandimento di roccia	espandimento di detrito	espandimento di terra
COLATE (flows)	flusso di roccia (creep profondo)	colata di detrito (creep superficiale)	colata di terra
FRANE COMPLESSE (complex)	combinazione di due o più tipo di movimento nello spazio e/o nel tempo		

Fig.1 – Tipologia di frane. Versione abbreviata della classificazione di Varnes (1987) dei movimenti di versante

2.1. CROLLI

Avvengono su pareti molto inclinate, da cui si staccano uno o più massi.

Il distacco avviene prevalentemente lungo le superfici di discontinuità esistenti nell'ammasso e successivamente i blocchi continuano il loro moto lungo il versante per caduta libera e successivi rimbalzi e rotolamenti fino all'arresto.

Il materiale in crollo a causa dello scarso attrito durante il movimento, può raggiungere velocità molto elevate. Gli agenti atmosferici, la gravità e la presenza di acqua fra le discontinuità sono fattori che influenzano molto l'avvenire di tale fenomeno.

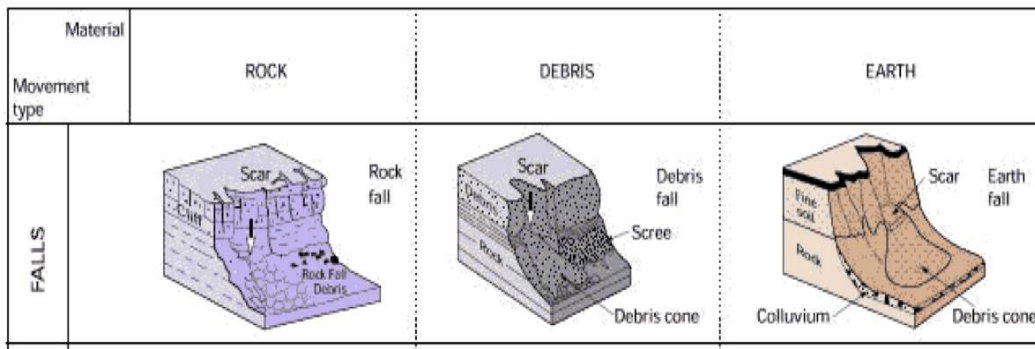


Fig.2 – Fenomeno di crollo Varnes (1987)

2.2. RIBALTAMENTI

La combinazione di forza di gravità e pressione dell'acqua generano una spinta nella roccia che crea la rotazione di una massa isolata del versante attorno ad un punto inferiore rispetto al centro di gravità della massa stessa; questi fenomeni vengono definiti ribaltamenti. Sono molto simili ai crolli, ma in questi non si verifica la completa separazione del materiale alla base del distacco. Anche essi

avvengono lungo le discontinuità esistenti nell'ammasso roccioso.
 Il deposito generato è molto simile a quello dei crolli.

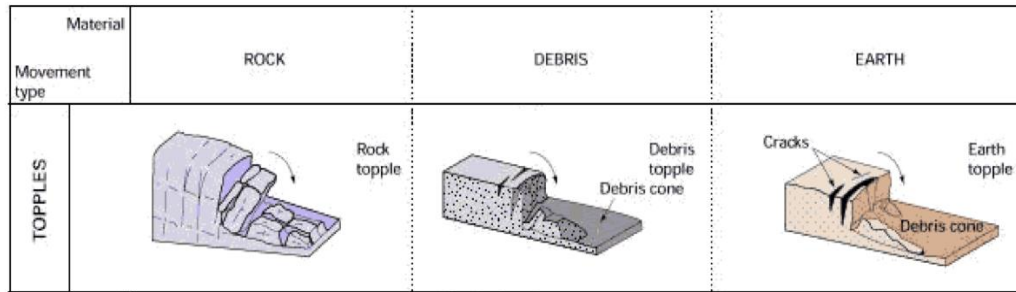


Fig.3 – Fenomeno di ribaltamento Varnes (1987)

2.3. SCORRIMENTI (SCIVOLAMENTI)

Uno scorrimento è caratterizzato dal movimento di una massa coerente lungo una superficie di taglio ben definita. Si identificano due tipi di scorrimento in base alla superficie: scorrimenti rotazionali e scorrimenti traslazionali.

I primi si verificano lungo superfici concave e curve verso l'alto ed il materiale ruota attorno ad un punto posto al di sopra della massa. Sono movimenti di materiale verso il basso, dove la massa superiore scivola rispetto al materiale sottostante che risulta stabile, dopo il superamento della resistenza al taglio del materiale stesso.

Gli scorrimenti traslazionali avvengono su superfici pressoché piane in cui le discontinuità hanno orientazione uguale al versante; gli strati non si riescono a sostenere l'un l'altro tramite l'attrito tra le due superfici.

In questi scivolamenti la condizione di instabilità può propagarsi a lungo nello spazio e nel tempo.

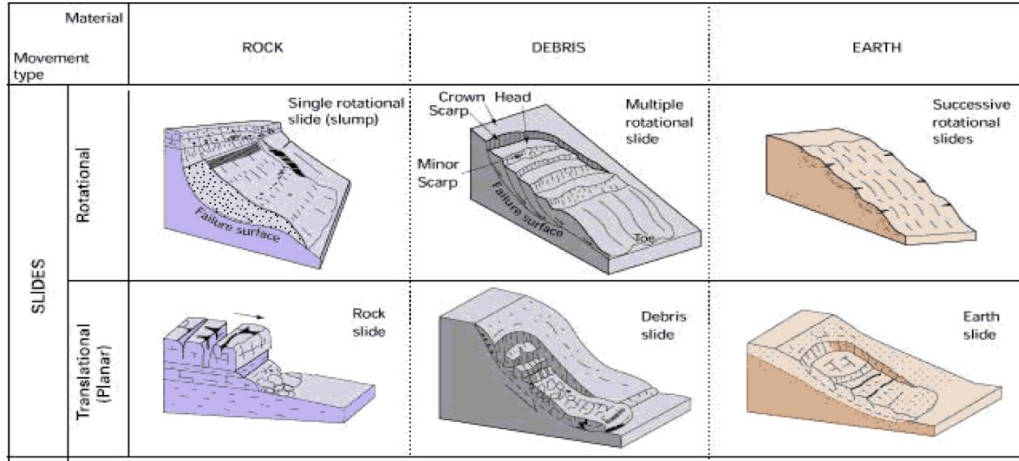


Fig.4 – Fenomeno di scivolamento rotazionale e traslazionale Varnes (1987).

2.4. ESPANSIONI LATERALI

Gli espandimenti laterali avvengono solitamente in zone in cui i materiali, caratterizzati da un comportamento rigido, sono sovrapposti a materiali dal comportamento plastico (sabbie o limi saturi suscettibili di liquefazione o terreni coesivi). La rottura è causata dalla liquefazione dove i terreni privi di coesione passano da uno stato solido a uno liquido. Avviene principalmente su terreni pianeggianti o poco inclinati perché è un movimento a prevalente componente orizzontale.

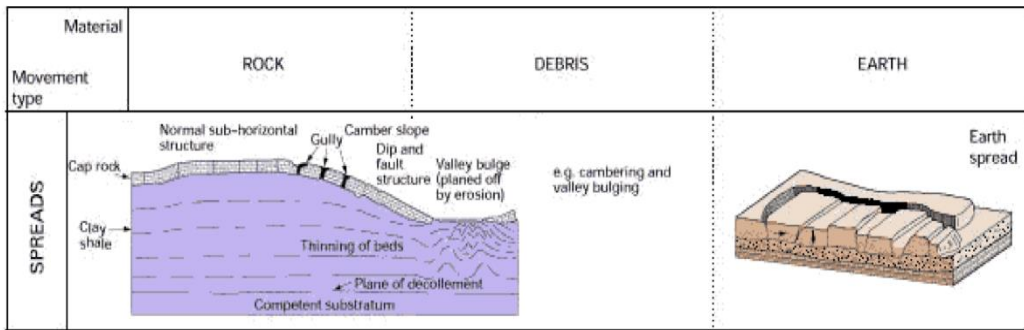


Fig.5 – Fenomeno di espansione laterale Varnes (1987).

2.5. COLATE O FLUSSO

Definisce quelle frane in cui la deformazione del materiale è continua all'interno della massa spostata in movimento. Una colata è continua nello spazio, ma le varie parti che costituiscono il flusso si muovono in maniera indipendente.

Si distinguono 5 tipologie di flusso:

- *debris flow o flusso di detriti*: miscuglio di acqua e sedimenti che si muove per effetto della forza di gravità. Sono fenomeni molto pericolosi a causa della velocità di movimento della massa e dell'assenza di segnali di preavviso.

In genere sono causate da forti precipitazioni o dal rapido scioglimento della neve che erode i pendii ed i terreni trasportando con sé il materiale. È un movimento di materiale molto rapido che si mobilita su versanti ripidi e tende ad incanalarsi durante la discesa.

- *debris avalanche o valanga di detriti*: miscuglio d'acqua e sedimenti che si muove per effetto della forza di gravità. Sono fenomeni molto pericolosi a causa della velocità di movimento della massa e dell'assenza di segnali di preavviso. In genere sono causate da forti precipitazioni o dal rapido scioglimento della neve che erode i pendii e i terreni trasportando con sé il materiale. È un movimento di materiale molto rapido che si mobilita su versanti ripidi e tende ad incanalarsi durante la discesa.

- *earth flow o flusso di terra*: sono movimenti di massa di terreni a grana fine che spaziano da flussi di terra rapidi formati da depositi di argilla a flussi di terra relativamente più lenti e più asciutti comuni nei terreni plastici e a grana fine. In genere presenta una forma allungata. Il movimento è spesso episodico ed intermittente.

- *mud flow o colate di fango*: almeno il 50% della massa in movimento deve essere costituito da sabbia, limo e argilla e deve essere altamente plastico e liquido (Hungry et al., 2001). Il flusso d'acqua e terreno misto si muove con velocità molto elevate e tende ad incanalarsi seguendo le incisioni fluviali.

- *creep*: è un movimento lento, impercettibile (misurabile solo con l'ausilio di strumentazione apposita) e costante della parte più superficiale del versante. Il movimento è causato da sforzi di taglio sufficienti a produrre una

deformazione permanente ma troppo ridotti per causare la rottura di taglio del materiale. Indice di creep su un versante sono piccole deformazioni sul terreno o deformazioni ad alberi.

Il movimento può essere stagionale o continuo, legato quindi a fattori climatici.


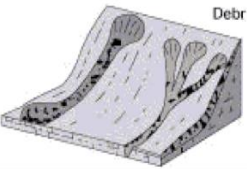
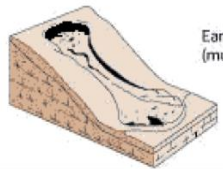
Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FLOWS				
		Solifluction flows (Periglacial debris flows)	Debris flow	Earth flow (mud flow)

Fig.6 – Fenomeno di colata Varnes (1987).

2.6. MOVIMENTI COMPLESSI

È la combinazione dei meccanismi visti in precedenza e può avvenire sia nello spazio che nel tempo.

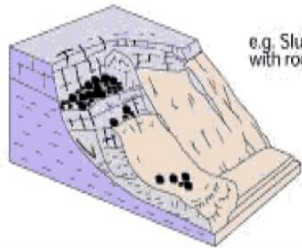
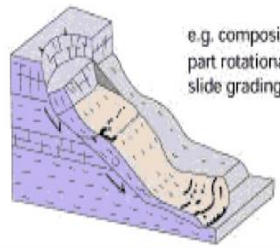
Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
COMPLEX				
		e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe

Fig.7 – Fenomeno di movimenti complessi Varnes (1987).

3. ANALISI DEL MOVIMENTO DI CADUTA MASSI

Il fenomeno della caduta massi è un fenomeno molto complesso da analizzare e per questo quasi tutti i modelli di calcolo tridimensionali sono ricondotti, con le dovute semplificazioni, al caso bidimensionale.

Innanzitutto, per lo studio del fenomeno occorre definire due eventi che sono:

- innesco del fenomeno in cui si definiscono il distacco del blocco dal versante, le dimensioni, la forma e la velocità iniziale del blocco che si distacca;
- la propagazione dell'evento dove si definiscono la traiettoria aerea del blocco e la sua velocità, gli impatti del blocco sul versante in termini di posizione, dissipazione di energia e velocità dopo l'impatto, il moto del masso lungo il versante e l'arresto.

Questa distinzione è dovuta anche al fatto che attualmente non esiste alcun software/modello in grado di studiare il fenomeno nella sua totalità; si può studiare o la zona di distacco e le condizioni iniziali, o il moto a distacco avvenuto fino all'arresto. In questo elaborato verranno analizzate tutte le fasi di evoluzione dell'evento.

3.1. MOTO DEL BLOCCO IN ARIA

Il moto del blocco in aria, tipico dei fenomeni di caduta massi, è quella fase in cui l'energia potenziale dell'elemento lapideo si trasforma in energia cinetica con movimento lungo traiettorie paraboliche.

Quando il masso impatta con il versante dissipa gran parte della sua energia cinetica, se non la totalità, attraverso la sua frantumazione e/o tramite le deformazioni della superficie impattante.

Se l'energia cinetica venisse totalmente dissipata, il masso si arresterebbe nel punto di impatto.

Avvenuto il distacco del blocco di roccia, nella fase aerea della traiettoria, possiamo avere due tipologie di cinematismo:

- caduta a gittata: quando sono presenti sollecitazioni esterne (sisma, ghiaccio, spinta idraulica, etc.) che imprimono al blocco una velocità iniziale non nulla;
- caduta libera: la componente orizzontale della velocità è nulla e quindi interviene solo la forza di gravità.

In tutti e due i casi viene trascurata la resistenza dell'aria e il moto segue una traiettoria parabolica. Nella caduta a gittata le due componenti, orizzontale e verticale, della velocità iniziale sono diverse da zero e si hanno condizioni iniziali in termine di posizione $P_0 = (P_{0,x}, P_{0,y})$ e velocità iniziale $v_0 = (v_{0,x}, v_{0,y})$. Nel caso bidimensionale, il calcolo della posizione all'istante di tempo t avviene attraverso il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} x = v_{0,x} \cdot t + x_0 \\ y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_{0,y} \cdot t + y_0 \end{cases}$$

Il termine g rappresenta l'accelerazione di gravità terrestre.

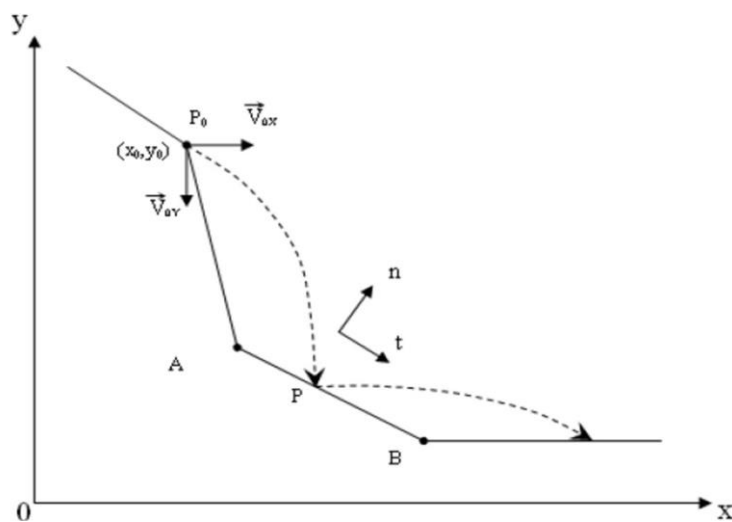


Fig.8 – Traiettoria della caduta a gittata (Giani, 1992).

Il punto di impatto del blocco sulla superficie del pendio è stimato calcolando l'intersezione tra la parabola della traiettoria e la retta passante per i punti

$A(x_1, y_1)$ e $B(x_2, y_2)$ appartenenti al profilo del versante.

Le coordinate del punto di impatto $P(x_p, y_p)$ possono essere ricavate risolvendo il seguente sistema:

$$\begin{cases} y_p = -\frac{1}{2}g \frac{(x - x_0)^2}{v_0^2} + v_{0y} \frac{x - x_0}{v_{0x}} \\ \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x_p - x_1}{x_2 - x_1} \end{cases}$$

Nel caso di caduta libera, il blocco è soggetto alla sola forza di gravità.

Si usano le stesse equazioni viste in precedenza, ricordandosi di eguagliare a zero la componente orizzontale della velocità. La velocità sarà così calcolata:

$$v = g \cdot t = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot t[s]$$

3.2. ITERAZIONE BLOCCO-PENDIO

L'iterazione del blocco con il pendio è un fenomeno molto complesso che può essere esplicito secondo i moti gravitativi di rimbalzo, scivolamento, rotolamento, rototraslazione, frantumazione e arresto.

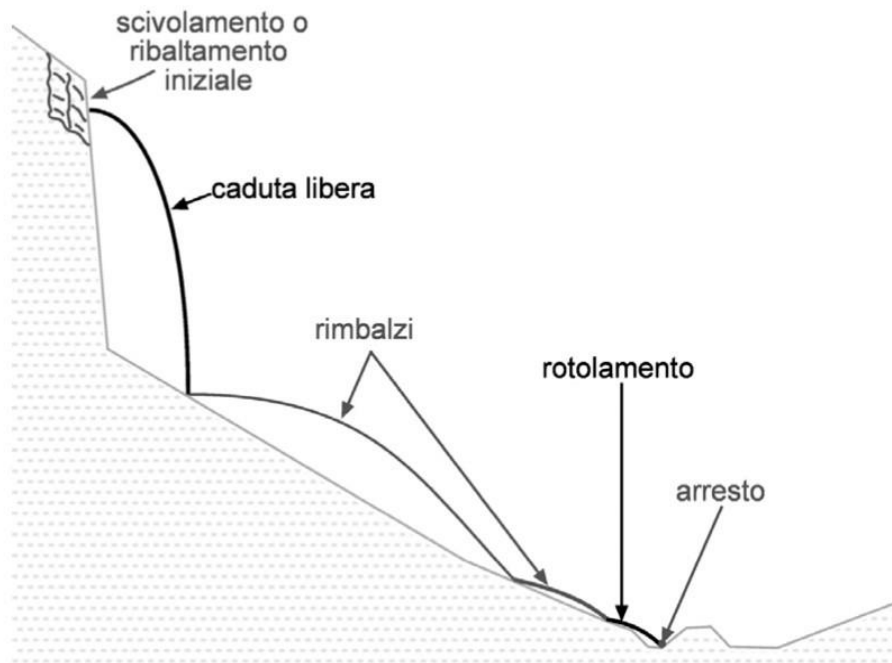


Fig.9 – possibili moti di propagazione di un blocco soggetto a crollo.

Le caratteristiche del moto dipendono dalla forma e dalle dimensioni del blocco, dalla sua litologia e dalla topografia del pendio.

3.2.1. Rimbalzo

Il rimbalzo è un movimento transitorio che si presenta dopo l'impatto del blocco con la superficie del versante. Per studiare tale fenomeno occorre conoscere, oltre che le forze esterne (gravità ed attrito), anche quelle impulsive (interne che non alterano la quantità di moto totale del sistema durante l'urto) che si scambiano i corpi in collisione. Solitamente queste ultime sono molto maggiori rispetto a

quelle esterne che possono essere quindi trascurate. Si può allora ricavare il moto del corpo, al momento dell'urto, ricordando che devono essere validi il principio di conservazione della quantità di moto e dell'energia totale.

Se si ha conservazione di energia cinetica del sistema l'urto è definito elastico, altrimenti è definito anelastico. Se i due corpi dopo l'impatto rimangono attaccati invece si parla di urto completamente anelastico.

Per descrivere tale fenomeno di interazione tra i due corpi e quindi, la dissipazione di energia cinetica nell'urto, sono stati introdotti i coefficienti di restituzione definiti come:

$$R = \frac{v_{post}}{v_{pre}}$$

dove al numeratore è presente la velocità dopo il rimbalzo e al denominatore la velocità prima dell'impatto.

Nel caso di caduta libera avremo:

$$R = \sqrt{\frac{h^f}{h^i}}$$

dove h^f e h^i sono rispettivamente l'altezza di caduta e l'altezza di rimbalzo.

Il coefficiente di restituzione R definisce in pratica la perdita di energia cinetica che avviene durante l'impatto con il versante.

È possibile scomporlo in due componenti: R_n che agisce in direzione normale e R_t che agisce in direzione tangenziale. Possiamo allora definire:

$$R_n = \frac{v_{post,n}}{v_{pre,n}}$$

$$R_t = \frac{v_{post,t}}{v_{pre,t}}$$

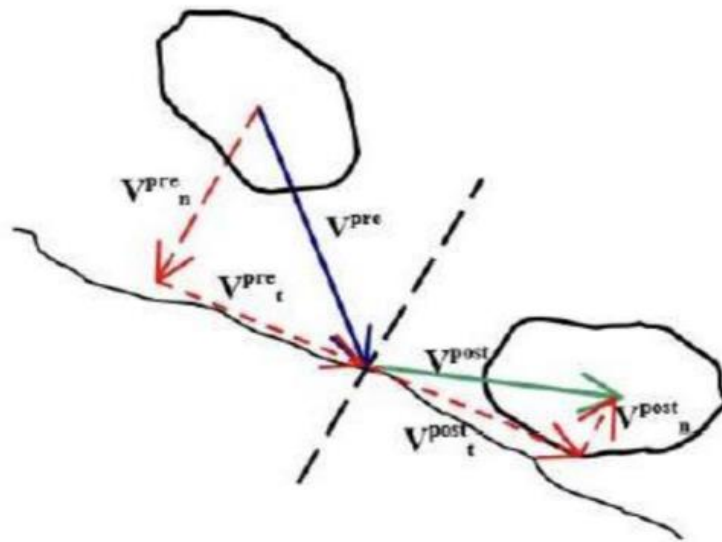


Fig.10 – rappresentazione della velocità pre e post impatto (Migliazza et al. 2002).

Il processo più corretto per stimare il coefficiente di restituzione R è eseguire un'analisi a ritroso (back analysis).

Qualora questa analisi non fosse possibile, si possono utilizzare i valori riportati in letteratura che variano in base al tipo di materiale. Nelle sottostanti tabelle sono riportati alcuni esempi.

Materiali	R_n	R_t
Roccia compatta	0,9-0,8	0,75-0,65
Materiale detritico misto a grandi blocchi di roccia	0,8-0,5	0,65-0,45
Materiale detritico compatto a piccoli blocchi di roccia	0,5-0,4	0,45-0,35
Pendio ricoperto d'erba	0,4-0,2	0,3-0,2
Bedrock duro	0,53	0,99
Strada sfaltata	0,4	0,9
Affioramenti di bedrock con grandi blocchi e superfici dure	0,35	0,85
Ricoprimento pendio	0,32	0,82
Pendio ricoperto da vegetazione	0,32	0,8
Terreno soffice con poca vegetazione	0,3	0,8

Fig.11 – Coefficienti di restituzione (Richards, 1988).

Descrizione delle caratteristiche del pendio	K_n	K_t
Superfici lisce di materiale resistente come pavimentazione stradale o superficie rocciosa	0,37-0,42	0,87-0,92
Prevalenza di substrato roccioso con blocchietritico misto a grandi blocchi isolati	0,33-0,37	0,83-0,87
Detrito costituito da grandi blocchi con scarsa vegetazione affiorante	0,30-0,33	0,82-0,85
Detrito ricoperto da abbondante vegetazione e terreno scarsamente vegetato	0,28-0,30	0,80-0,83
Pendio in terra	-	0,78-0,82

Fig.12 – Coefficienti di restituzione (Pfeiffer e Bowen,1989).

Materiale	R_n	R_t
Materiale duro in superficie	0,37-0,42	0,87-0,92
Bedrock o blocchi con poco terreno o vegetazione	0,33-0,37	0,83-0,87
Pendio con poca vegetazione	0,30-0,33	0,83-0,87
Pendio con vegetazione	0,30-0,33	0,80-0,83
Terreno soffice con poca vegetazione	0,28-0,32	0,80-0,83
Pendio ricoperto da terreno e vegetazione	0,28-0,32	0,78-0,82
Parete di calcare	0,315	0,712
Breccia di calcare coperta parzialmente da vegetazione	0,303	0,615
Blocchi di calcare dolomitico su superfici rocciose o depositi ghiaiosi	0,20	0,530
Pendio ricoperto da vegetazione	0,32	0,8
Terreno soffice con poca vegetazione	0,3	0,8

Fig.13 – Coefficienti di restituzione (Rockscience, 2000).

3.2.2. Effetto di forma del blocco

L'osservazione di caduta massi in sito ha evidenziato che la forma del blocco è un parametro molto importante nell'analisi traiettografica; si è visto come la diversa forma e la diversa resistenza dei blocchi influenza la tipologia di impatto, la possibilità che avvenga frantumazione o si arresti e la tipologia di moto dopo l'impatto.

Non è facile definire l'effettiva forma del blocco, infatti dal momento del distacco dal versante il blocco subirà delle variazioni imprevedibili in base alla distanza percorsa.

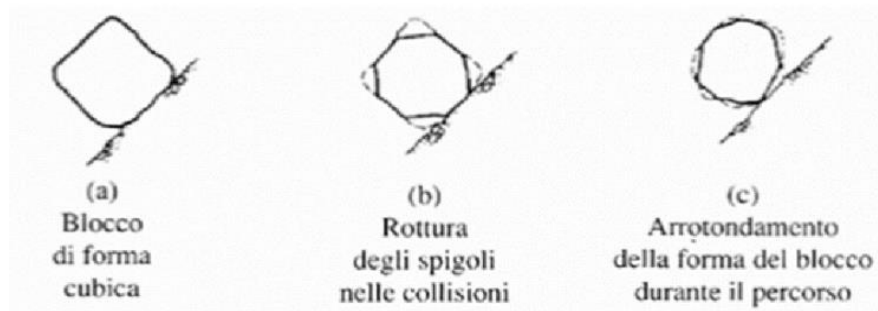


Fig.14 - Variazione della forma del blocco in funzione della distanza percorsa (Giani, 1992).

L'esperienza sperimentale su blocchi prevalentemente prismatici (Giani, 1992) mostra come forma e dimensione del blocco determinino diverse condizioni di moto post-impatto.

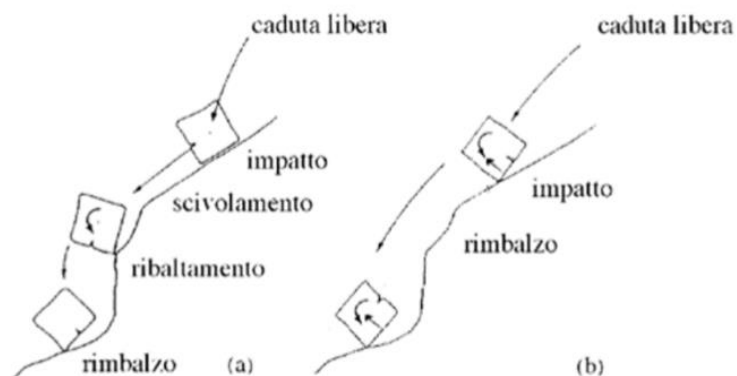


Fig. 15 – Tipologia di movimento in funzione del tipo di impatto (Giani, 1992).

Osservando l'immagine possiamo vedere che quando il blocco impatta con il pendio su una delle sue facce, il moto conseguente più probabile è quello di scivolamento, che permane fino a quando non si ha un cambiamento di pendenza che provoca un ribaltamento; se invece il contatto con il pendio avviene attraverso lo spigolo, è più probabile che si generi un rimbalzo e un successivo rotolamento.

3.2.3. Effetti di dimensione del blocco

Se il versante è ricoperto da materiali detritici, il rapporto tra la dimensione del detrito e quella del blocco, influenza la quantità di energia dissipata e la tipologia di moto:

- se i detriti hanno volume molto minore del blocco, si avrà una maggiore dissipazione di energia nell'urto e il blocco tenderà a rotolare;
- se i detriti hanno volume maggiore o uguale a quello del blocco è più probabile che il moto post-impatto sia una serie di rimbalzi.



Fig. 16 – Perdita di energia in funzione del rapporto tra i volumi in un pendio di detrito (Giani, 1992).

3.2.4. Effetto della vegetazione

La presenza di vegetazione sul versante può avere un effetto positivo sul distacco dei blocchi se la presenza di radici mantiene il blocco attaccato al versante; negativo se le radici di grandi dimensioni penetrano lungo le discontinuità del versante agendo come cuneo.

Per quanto riguarda invece la fase di moto lungo il pendio, la vegetazione svolge un ruolo di protezione naturale contro la caduta massi.

Può svolgere una protezione attiva impedendo il distacco dei blocchi e diminuendo il potere erosivo dell'acqua o può risultare una protezione passiva che ostacola la propagazione deviando, frenando e arrestando i blocchi.

Il tipo di protezione più importante è quella passiva ma, evidentemente, se le dimensioni del masso sono grandi la capacità di protezione della foresta è praticamente nulla.

3.2.5. Scivolamento

Il fenomeno è meno frequente di quello di rotolamento e si osserva nella fase iniziale della caduta o in fase finale prima dell'arresto. È un cinematismo in cui il blocco ha la velocità di traslazione che dipende dall'inclinazione del pendio e dal coefficiente di attrito dinamico, mentre la velocità angolare è nulla. È un moto in cui il blocco mantiene il contatto con la superficie del pendio lungo una faccia, solitamente quella più estesa arealmente. Si verifica nel caso in cui il pendio ha pendenze ridotte. Anche se le velocità sono maggiori rispetto al moto di rotolamento, nello scivolamento il blocco percorre lunghezze brevi a causa della maggiore perdita di energia.

Uno dei modelli matematici più utilizzati è quello di Pariseau e Voigt (1979) illustrato in immagine.

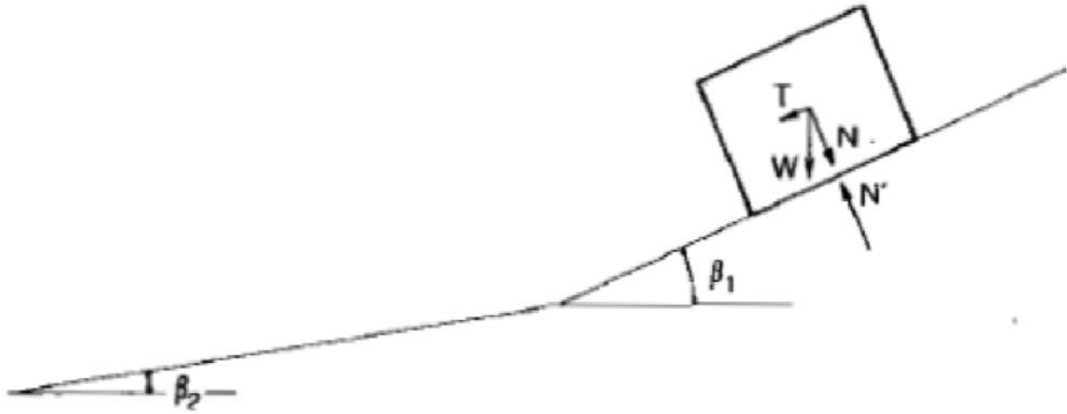


Fig. 17 – modello di scivolamento del blocco (Pariseau e Voigt, 1979).

Secondo questo modello l'accelerazione del blocco che scivola sul piano inclinato è pari a:

$$a = g(\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{sl})$$

dove:

- a = accelerazione tangenziale del blocco,
- g = accelerazione di gravità,
- δ_{sl} = angolo di attrito dinamico allo scivolamento,
- β = inclinazione del piano.

La velocità tangenziale e quella lineare sul segmento saranno rispettivamente:

$$v = v_0 + g \cdot t \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{sl})$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g \cdot s \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{st})}$$

con:

- v = velocità lineare al tempo t e alla distanza percorsa s
- v_0 = velocità iniziale.

3.2.6. *Rotolamento*

Il fenomeno di rotolamento puro insieme a quello di solo scivolamento sono moti teorici. Il fenomeno di puro rotolamento si può verificare in casi rari quando il diametro del blocco è molto maggiore della rugosità del pendio, e questa in termini assoluti, risulta limitata. È un cinematismo regolato dall'inclinazione del pendio e dall'angolo di attrito dinamico del blocco. Il masso assume una velocità angolare non nulla e contemporaneamente si riduce la velocità di traslazione. Insieme al rimbalzo, il rotolamento è il tipo di movimento più frequente nel fenomeno di caduta massi, nel caso di pendenze inferiori a 30° (Broili, 1974). Questo tipo di movimento è quello che permette al masso di mantenere nello spazio l'energia cinetica e di conseguenza di raggiungere i massimi valori di distanza possibili prima dell'arresto, soprattutto se il litoide è di forma sferica. Esistono molte formulazioni matematiche per descrivere questo moto, una di queste è quella sotto formulata, nell'ipotesi di geometria sferica:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 10/7 \cdot g \cdot s \cdot (\tan \beta - \tan \delta_{rot}) \cdot \cos \beta}$$

con:

- v_0 = velocità iniziale lungo il tratto di pendio preso in esame,
- s = lunghezza del tratto,
- β = inclinazione del piano che fa a designare il profilo del pendio,
- δ_{rot} = angolo di attrito dinamico di rotolamento,

- g = accelerazione gravitazionale.

3.2.7. *Rototraslazione*

È la combinazione dei due moti precedentemente descritti.

In questo caso risulta importante conoscere la velocità del blocco che percorre un tratto rettilineo di pendio.

Tra le varie formule si ritiene particolarmente significativa la formula di Hoek (1987):

$$v = \sqrt{(v_0^2 + 2 \cdot g \cdot s \cdot K)}$$

dove:

- v_0 = velocità iniziale di discesa,
- s = distanza percorsa,
- g = accelerazione gravitazionale,
- K = costante definita a partire da due parametri che sono, la pendenza del versante e l'angolo di attrito del materiale a contatto.

La formula di Hoek presume che la forma e la dimensione del blocco non influenzino il moto di rotolamento e scivolamento e quindi, durante il moto, questi parametri possono variare a causa dei numerosi urti. Questa semplificazione risulta valida perché nel fenomeno di caduta massi è di difficile definizione la forma del blocco.

3.2.8. *Rottura del blocco*

I blocchi durante il moto lungo il versante possono subire delle rotture, soprattutto se il blocco presenta delle discontinuità.

I frammenti così generati compiono percorsi più brevi rispetto al blocco originario e questo avviene perché durante la frantumazione si ha una notevole dispersione di energia.

3.2.9. Arresto

L'arresto può avvenire a seguito di una progressiva diminuzione della velocità del blocco, oppure bruscamente tramite dissipazione di energia cinetica nell'impatto con il pendio. I parametri che influenzano questa fase sono: la velocità, la forma e i volumi del masso e le caratteristiche del pendio, ovvero pendenza, materiale, vegetazione presente e scabrezza.

Quando il blocco si ferma si ha la completa dissipazione dell'energia cinetica. A parità di velocità, i blocchi aventi volumi maggiori percorreranno distanze maggiori rispetto ai blocchi più piccoli.

4. METODI PER LA MODELLAZIONE PREVISIONALE DEI FENOMENI DI CADUTA MASSI

Nel seguente capitolo vengono descritti, in maniera generale, i modelli matematici utilizzabili per la modellazione della caduta massi che si raggruppano in diverse categorie a seconda di come viene rappresentato il blocco e delle dimensioni spaziali che consentono di analizzare. Ci focalizzeremo in dettaglio sul metodo lumped mass.

La validità di un modello dipende sia dal modo in cui i diversi cinematismi si verificano (caduta libera, impatto, frantumazione, rimbalzo, rotolamento e scivolamento), vengono individuati e descritti in termini matematici, sia dall'affidabilità dei parametri scelti per determinare l'occorrenza e l'entità dei cinematismi sopra indicati. I modelli previsionali vanno scelti in base alle condizioni fisiche che devono essere modellate o in base alla capacità di restituire un risultato più o meno adeguato.

La convalida di un modello si effettua attraverso il confronto tra i risultati di prove in sito e quelli ottenuti dalle simulazioni numeriche svolte con il modello stesso. Questi hanno principalmente lo scopo di determinare le seguenti grandezze:

- possibili percorsi di caduta lungo il pendio;
- altezze delle traiettorie di caduta rispetto alla superficie del versante, velocità e energie dei blocchi lungo i percorsi di caduta;
- massime distanze raggiunte dai blocchi lapidei e zone di espansione a valle.

I problemi più rilevanti nelle modellazioni riguardano la scelta delle condizioni che determinano il passaggio da un movimento ad un altro e la descrizione del comportamento del masso durante l'impatto con la superficie del pendio. Tali ipotesi e scelte dipendono dalla scelta della forma del blocco.

Nel caso della caduta massi, a seconda della rappresentazione, si può adottare un modello lumped mass o a blocco rigido. La scelta dipende da dimensioni e forma

del blocco e dal comportamento che può avere durante il cinematismo. Se si considera il blocco come un punto, il suo movimento è schematizzato come una serie di rimbalzi (lumped mass). Se invece al blocco viene assegnata una forma, le dimensioni e una massa, la traiettoria aerea del masso ed il suo comportamento al momento dell'urto con il versante sono definiti in funzione della scabrezza del versante, dell'angolo che forma il pendio con l'orizzontale nel punto d'impatto e dal volume del masso (metodo del blocco rigido).

Questi due approcci si collegano a due macrocategorie, cioè i metodi bidimensionali o tridimensionali, che si basano sulle dimensioni spaziali analizzabili attraverso i software di analisi numerica.

Nei metodi bidimensionali le traiettorie del blocco sono simulate in un dominio 2D e sono definite secondo due assi rappresentativi: una distanza progressiva e una quota. Lungo questo piano viene definito il profilo di versante, il quale è individuato dall'operatore solitamente seguendo la linea di massima pendenza.

Nei modelli 3D invece le traiettorie sono valutate in un dominio tridimensionale. Esiste un'interdipendenza tra la traiettoria del blocco nel piano e la sua cinematica, la posizione del punto di impatto, le altezze di rimbalzo e gli impatti con la vegetazione. Solitamente la modellazione 3D viene svolta quando il fenomeno è avvenuto ed i blocchi che si sono staccati o che si possono ancora staccare hanno compiuto o compieranno dei percorsi preferenziali seguendo una pista progressivamente aperta dal loro passaggio.

Ogni metodo fin qui descritto parte dalla definizione di un profilo.

Nel caso bidimensionale, esso è una sequenza di segmenti che deve rappresentare il percorso più probabile che il masso farà lungo il versante. Tale può essere ricavato tramite dati storici, prove in sito o l'osservazione di una mappa topografica. In caso di previsione del percorso, si dovranno valutare anche la morfologia e la superficie del versante, le caratteristiche meccaniche del suolo e del blocco e il cinematismo del blocco in ogni tratto del versante. Un punto fondamentale da inserire in un modello 2D è la nicchia di distacco, ovvero il punto in cui si ha il distacco dell'ammasso roccioso dalla parete o le possibili aree in cui questo potrà accadere. Occorre poi procedere alla definizione delle caratteristiche del blocco, considerando il suo volume e la sua forma, che

influenzano la perdita di energia del blocco al momento dell'impatto, e il suo moto. I metodi numerici permettono lo studio attraverso la discretizzazione del problema in un numero finito di punti. Alcuni esempi sono il caso degli elementi distinti (DEM) e il metodo di analisi delle deformazioni dei mezzi continui (DDA) che possono essere usati per studiare il comportamento meccanico di un sistema di blocchi, calcolandone gli spostamenti e le deformazioni. Il metodo DEM si usa maggiormente per studiare gli spostamenti reciproci fra i blocchi, piuttosto che il movimento del singolo, determinando quindi l'incipienza del fenomeno piuttosto che il percorso di caduta di un blocco. Con esso è possibile la formazione di nuovi contatti e il distacco di due blocchi inizialmente a contatto; questa caratteristica lo rende un metodo molto appropriato per l'evoluzione del fenomeno permettendo così di determinare anche le successive configurazioni che portano a quella finale. Il metodo DDA può essere utilizzato per analizzare sia la fase di distacco della massa rocciosa, sia la fase di moto del blocco. Può essere usato per svolgere analisi a ritroso e previsionali di masse rocciose.

4.1. METODO LUMPED MASS

I metodi lumped mass sono quelli che assumono il blocco come puntiforme di massa m (priva di dimensione) e velocità v . Il punto si muove nell'aria secondo una traiettoria balistica. Trascurando inoltre la resistenza dell'aria, si può dedurre come il cinematismo dipenda solo dall'impatto con il terreno, rappresentato dai coefficienti di restituzione: R_n e R_t , rispettivamente i coefficienti di restituzione normale e tangenziale. Adottando questo metodo si possono fare delle assunzioni quali:

- traiettorie indipendenti dal volume del blocco;
- non vengono considerati i momenti rotazionali;
- il volume del blocco viene considerato tenendo conto della variazione del coefficiente di restituzione normale, secondo relazioni empiriche;
- il calcolo della massa, noto il volume, viene dato dal rapporto tra esso e il peso unitario del materiale.

Il metodo lumped mass è di tipo energetico: inizialmente il blocco possiede solo energia potenziale, poi durante il moto si trasformerà in energia cinetica e energia dissipata. Il punto di arresto del blocco è il punto in cui la sua energia cinetica è pari a zero. Le fasi del moto di caduta libera sono descritte utilizzando le formule nel paragrafo 3.1. Hungr e Evans (1988) hanno proposto il seguente procedimento per determinare la condizione di transizione tra moto con rimbalzi e rotolamento. Nella traiettoria di volo il blocco ha un'altezza di energia costante (fig.18) ed uguale a:

$$E = z + \frac{v^2}{2g}$$

dove z è l'elevazione e v è il modulo della velocità del blocco.

Dall'impatto si ha una perdita di energia cinetica che, espressa in termini di "altezza di energia", può essere ottenuta come:

$$\Delta E = \frac{v^2}{2g} \cdot \left(\frac{R_t^2 + R_n^2 \cdot \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta} - 1 \right)$$

Con β uguale all'angolo formato tra la tangente alla traiettoria del blocco nel punto di impatto e il profilo del pendio. Con le precedenti equazioni, è possibile costruire un diagramma che descriva la variazione dell'altezza di energia con il cammino percorso per ogni fase di rimbalzo. Il diagramma avrà andamento costante nelle fasi aeree, mentre varierà linearmente nei percorsi di rotolamento e "a gradino" a seguito di ogni impatto (fig.18).

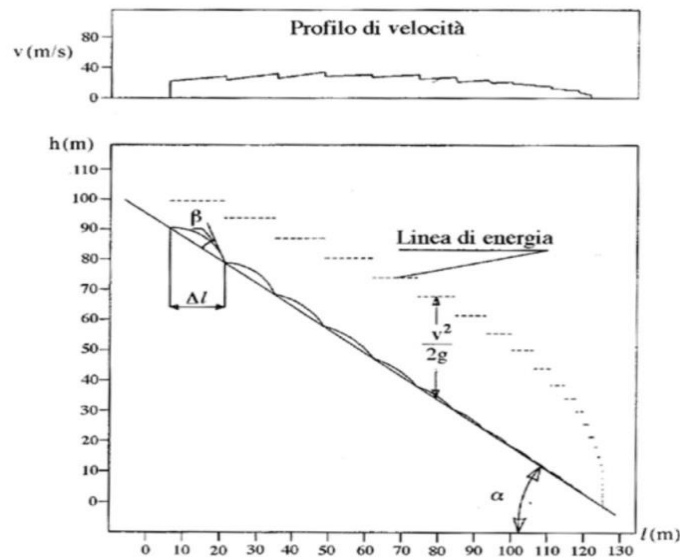


Fig.18 – diagramma del percorso del blocco e corrispondente linee di energia nel modello proposto da Hungr ed Evans (1988).

Detta Δl l'ampiezza del tratto orizzontale che definisce la proiezione della traiettoria compresa tra due rimbalzi e la perdita di energia ΔE che si ha nell'urto, la perdita di altezza di energia cinetica $\Delta E/\Delta l$ determina un'accelerazione del blocco quando è minore della tangente dell'angolo di inclinazione del pendio α , e una decelerazione quando è maggiore. Il passaggio tra la fase di rimbalzo a quella di rotolamento avviene quando il rapporto tra la variazione di energia e l'ampiezza del tratto orizzontale tra due rimbalzi è maggiore del coefficiente di attrito di rotolamento. Questa relazione è spiegata dal fatto che l'energia cinetica è minore di quella dissipata dai rimbalzi. Alcune assunzioni semplificative sono state proposte da Piteau e Clayton (1988) per definire la condizione di passaggio tra i rimbalzi e il rotolamento e l'arresto del blocco. Esse sono:

- quando la velocità di post-impatto ha valori “quasi nulli” l'arresto del blocco si ha nel punto di impatto;
- quando l'angolo compreso tra la traiettoria che si determina a seguito dell'impatto ed il profilo del pendio è sufficientemente basso o prossimo a zero l'urto determina la condizione di passaggio tra il moto con rimbalzi successivi e rotolamento.

5. OPERE DI DIFESA

Il fenomeno di caduta massi è molto diffuso nel territorio italiano, soprattutto in quello montano. Al fine di ridurre il rischio vengono impiegate opportune opere di difesa con lo scopo di intercettare ed arrestare i blocchi rocciosi in caduta lungo il versante. Devono quindi essere posizionate in modo da trovarsi lungo il percorso dei blocchi o in prossimità dei punti di maggior criticità del pendio e devono avere caratteristiche meccaniche e geometriche tali da assorbire l'energia cinetica e di impatto dei blocchi stessi. Inoltre vengono svolti studi sulla traiettoria dei potenziali corpi in caduta e indagini sulle caratteristiche tecniche dei terreni e delle rocce del versante. Le opere di difesa si dividono in opere di difesa attiva o di prevenzione e opere di difesa passiva o di protezione.

Le opere di difesa attive hanno la funzione di prevenire, impedire e ridurre il distacco degli elementi lapidei intervenendo all'origine del problema. Questi interventi si dividono nelle seguenti tipologie:

- interventi che hanno lo scopo di modificare la resistenza meccanica dell'ammasso roccioso e/o applicazione di forze stabilizzanti (con applicazione di elementi capaci di resistere a trazione es. chiodi, tiranti etc.). La progettazione di tali interventi è relativamente semplice, sebbene ci siano delle difficoltà legate ai lavori che comportano l'edilizia acrobatica.
- interventi che modificano le condizioni piezometriche. Qui distinguiamo i drenaggi superficiali (canalette di raccolta delle acque meteoriche, trincee drenanti) e i drenaggi profondi (pozzi drenanti, gallerie drenanti, paratoie drenanti).
- interventi volti a protezione della degradazione fisica dell'ammasso roccioso. Questi consistono in controlli dell'infiltrazione e del ruscellamento superficiale (es. rivegetazione, impermeabilizzazioni superficiali); riduzione o impedimento degli agenti esterni, quali vento, gelo, etc., (es. protezione con materiali geosintetici,

impermeabilizzazioni); impedimento di innesco di fenomeni di rottura progressiva (es. reti in aderenza, geosintetici).

Le opere di difesa passiva hanno il compito di intercettare, rallentare o deviare gli elementi lapidei dopo che essi si sono mobilizzati, intervenendo soprattutto alla base dei pendii o delle pareti rocciose. Alcuni esempi di questi interventi sono:

- barriera paramassi (rigida o elastica), sono opere in grado di assorbire l'energia cinetica di un blocco ed arrestarlo;
- reti paramassi;
- valli e rilevati paramassi (naturale o in terra rinforzata), sono usati per massi aventi alta energia cinetica. I rilevati sono per lo più in terra rinforzata e hanno lo svantaggio di richiedere uno spazio notevole per la realizzazione;
- gallerie artificiali (a mensola o a sbalzo), hanno materiale inerte in sommità in grado di dissipare l'energia cinetica di un blocco.

In questo elaborato tratteremo in maniera più approfondita le opere di difesa passive.

5.1. BARRIERE PARAMASSI

Le barriere paramassi stanno diventando l'intervento di difesa passiva più frequentemente utilizzato grazie all'evoluzione tecnologica dovuta a una maggiore attenzione ai problemi di carattere progettuale e costruttivo. Ne esistono in grado di contenere energie fino a 10.000 kJ.

Sono opere di difesa passiva realizzate in genere lungo la base di versanti in roccia instabili e/o in canaloni, dimensionate ed ubicate in modo tale da arrestare blocchi e massi anche di grosse dimensioni e materiale detritico mobilizzato.

In funzione del loro comportamento fisico, dei materiali e delle modalità

costruttive, si possono distinguere due classi: barriere paramassi flessibili/elastiche e barriere paramassi rigide.



Fig.19 – sopra esempio di barriera paramassi elastica, sotto esempio di barriera paramassi rigida



5.1.1. Barriere paramassi flessibili

Sono strutture deformabili, leggere con elementi altamente resistenti, formati da materiali di alta qualità e durata. La leggerezza della struttura, la semplicità, la rapidità di installazione e di manutenzione, consentono di eseguire l'intervento anche in zone montuose di difficile accessibilità. Le barriere vengono generalmente classificate sulla base dell'energia massima che può essere assorbita durante l'impatto. Una barriera paramassi elastica è generalmente formata dai seguenti quattro elementi:

- una struttura di intercettazione: reti di funi d'acciaio con maglie di varie forme (quadrata, romboidale, esagonale, circolare). È costituita solitamente da una rete principale e da una rete secondaria. La prima ha la funzione di resistere a gran parte della forza impulsiva del masso; la seconda ha il compito di evitare il passaggio di massi di dimensioni ridotte. La funzione della struttura di intercettazione è quella di sostenere l'urto diretto del masso, di deformarsi elasticamente e di trasmettere in modo uniforme le tensioni alle strutture di collegamento, di supporto e di fondazione. La struttura di intercettazione è collegata al supporto in maniera da consentirne uno scorrimento controllato dello stesso ordine di grandezza della sua altezza.



Fig.20 – rete a maglia quadrata.

- una struttura di supporto: costituita da montanti (pali o tubi di acciaio a profilo aperto o chiuso) che hanno lo scopo di mantenere la struttura di intercettazione in posizione corretta. I montanti generalmente sono di due tipi: il primo in cui è fondamentale la funzione statica per il funzionamento della barriera che oltre a mantenere la rete dispiegata trasmettono alle opere di fondazione una parte degli sforzi post-impatto; la seconda tipologia ha anch'essa lo scopo di mantenere la rete dispiegata ed il cui collasso non implica che la barriera non svolga la funzione di intercettazione una volta che il blocco sia stato incassato nella rete. Devono essere in grado di mantenere la barriera in posizione anche per impatti di energia minore rispetto quella limite.



Fig.21 – struttura di supporto: montante a profilo aperto.

- una struttura di connessione: solitamente sono cavi metallici disposti sia perpendicolarmente che longitudinalmente alla struttura di intercettazione (fune superiore e inferiore della struttura di intercettazione). Hanno la funzione di trasmettere le sollecitazioni alla struttura di fondazione. Spesso sono accompagnate da freni o dissipatori di energia che ne consentono un allungamento controllato. Questi sono realizzati per equilibrare le forze agenti sulla struttura e per

trasformare al momento dell'impatto parte dell'energia cinetica del blocco in lavoro plastico con conseguente deformazione permanente.



Fig.22 – dissipatore di energia.

- una struttura di fondazione: ha la funzione di trasferire al terreno le forze derivanti dall'impatto del blocco e devono essere realizzate dopo opportune valutazioni delle caratteristiche geotecniche del terreno. Costituita da plinti in calcestruzzo o tiranti in barra e devono resistere alle sollecitazioni sia in campo dinamico che plastico e devono essere adatti alle caratteristiche del terreno sia in dimensione che in direzione.



Fig.23 – fondazioni con plinto in calcestruzzo.

Le barriere elastiche sono impiegate nelle zone interessate dal fenomeno di caduta massi, di non grosse dimensioni, per frenare ed intercettare la quantità di detrito

mobilitata in modo che le eventuali altre opere difensive poste più a valle, possano resistere meglio all'impatto dei massi che riescono a superare la barriera.

Grazie alle tecniche di installazione che non necessitano di grandi scavi e di utilizzo di mezzi pesanti, le barriere paramassi elastiche hanno un impatto ambientale molto contenuto, inoltre la verniciatura della struttura con colori simili a quelli del sito di applicazione di tali strutture, permette di ottenere un ottimo inserimento ambientale, soprattutto in quelle zone dove è molto importante mantenere la naturalezza paesaggistica.

5.1.2. Barriere paramassi rigide

Le barriere paramassi rigide sono strutture che presentano una deformabilità quasi nulla sotto l'impatto di un blocco, pesanti e di grandi dimensioni in grado di opporsi con forze resistenti agli impatti.

Nella fase di progettazione, per il dimensionamento di tali, bisogna tener conto della sollecitazione dinamica data dall'impatto di un "masso di progetto". Sono capaci di assorbire minor energia rispetto alle barriere paramassi elastiche e possono essere descritte attraverso i seguenti elementi costituenti:

- struttura di intercettazione: costituita da un fascio di funi orizzontali metalliche continue, senza sistema di frenaggio, aventi diametro variabile tra i 12 mm e i 20 mm, in genere distanziate verticalmente con un passo di 20 cm e libere di scorrere all'interno di anelli passacavo. In alcuni casi alle funi viene agganciata una rete secondaria, composta da rete metallica a maglia esagonale, con lo scopo di evitare il passaggio di elementi lapidei di dimensioni ridotte. La struttura di intercettazione ha lo stesso ruolo di quella delle barriere elastiche.
- struttura di sostegno: costituite da montanti metallici incastrati alla base in plinti di calcestruzzo, posti ad interassi che variano tra 3 e 6,5 m. La funzione dei montanti è quella di mantenere tesa la struttura di intercettazione.
- struttura di raccordo: costituita da cavi metallici a monte, a valle e laterali la struttura di intercettazione; hanno la funzione di mantenere nella

corretta posizione i montanti di sostegno e trasmettere le sollecitazioni agli elementi di fondazione.

- struttura di fondazione: plinti e basamenti in calcestruzzo tramite cui la struttura scarica le tensioni derivanti dall'urto al terreno.

Le barriere rigide, congiuntamente con altri sistemi difensivi, si usano in zone dove il rischio di caduta massi coinvolge movimenti detritici e/o di masse rocciose di grosse dimensioni e dove è richiesta maggiore resistenza.

Queste, rispetto alle precedenti, hanno un impatto ambientale maggiore dovuto ai materiali impiegati e alle caratteristiche della tipologia costruttiva. Il forte impatto estetico può essere ridotto con il rivestimento delle strutture con vegetazione.

5.1.3. Certificazioni barriere paramassi

Queste strutture, per essere utilizzate, devono essere corredate di una marcatura "CE", tramite procedura di valutazione tecnica europea o, in alternativa di un certificato di idoneità tecnica emesso dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP.

La marchiatura "CE" permette la libera circolazione di quei prodotti che sono conformi ad una norma armonizzata europea che nel caso delle barriere paramassi è la ETAG 027: "Guideline for European technical approval falling rock protection kits". Le procedure di test, di controllo materiale e prestazione indicate in tale norma permettono ai produttori di poter commercializzare barriere marcate "CE". Le linee guida considerano come kit base quello costituito da non meno di tre moduli funzionali. (3FM). Per 3FM si intendono tre campate di barriera in rete con 4 montanti. L'interasse tra i montanti non è fisso e sarà scelto dal produttore.

Un kit paramassi è costituito da:

- una struttura d'intercettazione con la funzione di sopportare l'impatto diretto della massa, deformandosi elasticamente e/o e trasmettendo le tensioni alle parti di collegamento. Alla struttura portante e alle fondazioni;

- una struttura di sostegno con il compito di mantenere dispiegata la struttura d' intercettazione, che per natura non è rigida, e può essere collegata a quest'ultima direttamente o tramite struttura di raccordo;
- elementi di collegamento/raccordo che hanno la funzione di trasmettere lo sforzo alle fondazioni. Per consentire la deformazione possono essere installati sulla struttura elementi che ne permettono un allungamento controllato.

Di seguito è illustrato, con vista laterale e posteriore, uno schema di kit paramassi con la diversa terminologia generale dei vari componenti.

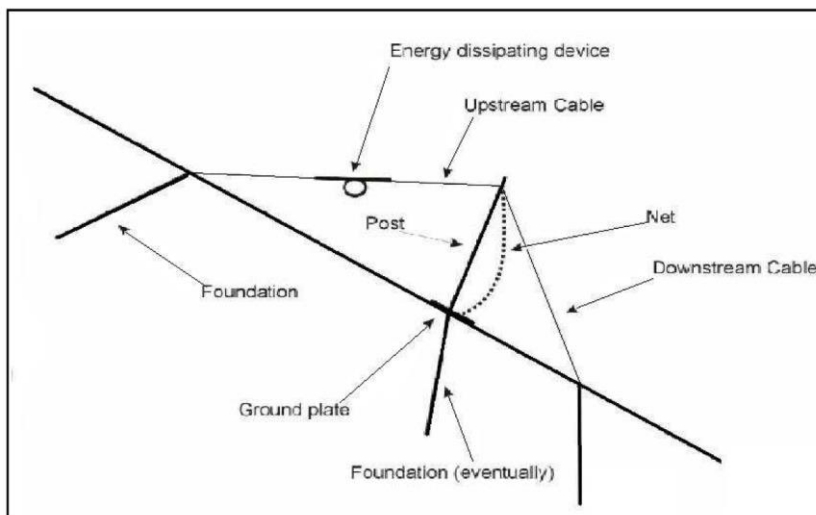


Fig.24 – sezione laterale di un kit paramassi.

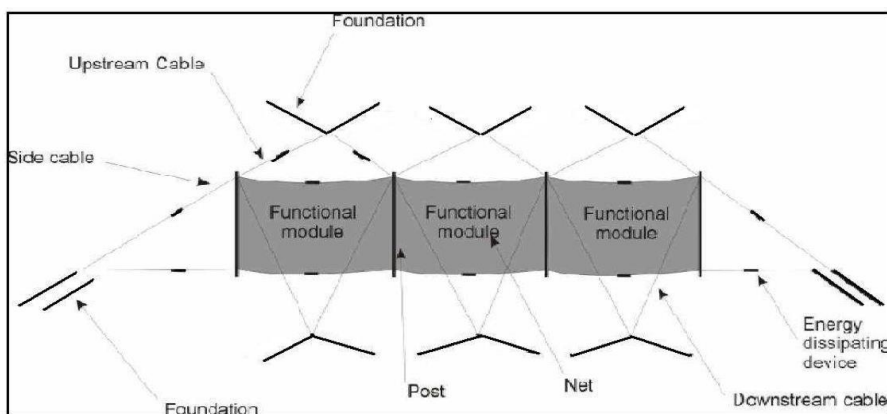


Fig.25 – vista posteriore di un kit paramassi.

L'elemento che consente di certificare che la barriera sia adatta all'uso è l'energia che essa è in grado di assorbire quando è sottoposta ad un impatto normalizzato di blocco in movimento, arrestandolo e rispettando alcune specifiche geometriche durante e dopo l'impatto. Si definiscono due livelli di energia differenti:

- SEL: "Service Energy Level"; due lanci successivi, senza alcuna manutenzione sulla barriera, eccetto la rimozione del blocco involuppato nella rete, ad una energia maggiore o uguale dell'energia di servizio della barriera.
- MEL: "Maximum Energy Level"; un lancio ad energia maggiore o uguale alla massima energia nominale di intercettazione della barriera e deve essere pari a 3 volte l'energia del SEL.

Per essere certificata la barriera deve essere sottoposta a tutte e due le prove.

La tabella sottostante classifica le barriere sulla base dei livelli energetici.

Classificazione energia di servizio	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL [kJ]	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL [kJ] ≥	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

Prova SEL:

Consente di verificare che il sistema di intercettazione abbia la capacità di intervenire efficacemente anche per controllare eventi di entità minore a quelli indotti dal blocco di progetto, ma con maggior frequenza di accadimento, senza che tra un evento e l'altro sia necessario effettuare eventi di manutenzione o ripristino.

Consiste in due lanci consecutivi e la barriera supera la prova se sono rispettate le

seguenti condizioni.

Il primo lancio è valido se:

- il blocco viene arrestato dalla barriera;
- la struttura di connessione rimane collegata alle fondamenta, cioè non si registrano rotture dei montani e delle funi. Per rottura si intende la completa divisione della struttura in due parti distinte, mentre l'apertura delle maglie della rete non può raddoppiare dimensionalmente quella iniziale.
- l'altezza residua della barriera dopo la prova, prima della rimozione del masso, è maggiore o uguale al 70% dell'altezza nominale;
- il blocco non tocca terra finché non è raggiunto il massimo allungamento della barriera durante la prova.

Il secondo lancio è valido se:

- il blocco viene fermato dalla barriera;
- il blocco non tocca terra finché non è raggiunto il massimo allungamento della barriera durante la prova.

Prova MEL:

Consiste in un unico lancio ad una energia maggiore o uguale a quella nominale della barriera e viene superata quando il blocco viene fermato dalla barriera senza toccare anche in questo caso il piano di riferimento a valle della barriera nel campo di prove. Durante la prova MEL deve essere misurato anche il massimo allungamento verso valle della barriera che costituisce un importante parametro progettuale; esso è un riferimento fondamentale per il corretto posizionamento della barriera in relazione alla distanza dall'infrastruttura da proteggere. È inoltre prevista una classificazione della barriera in base all'altezza residua dopo la prova MEL, che però non è valida ai fini di ottenere la certificazione.

Si introducono così tre classi all'interno di ogni livello energetico:

- classe A se l'altezza residua dopo la prova è maggiore al 50% dell'altezza nominale della barriera;
- classe B se l'altezza residua dopo la prova è compresa tra il 30 % e il 50% dell'altezza nominale della barriera;
- classe C se l'altezza residua dopo la prova è inferiore al 30% dell'altezza nominale della barriera.

Da quanto descritto, possiamo dedurre che la procedura di certificazione e le prove nell'ETAG 27 previste, consentono un'ottima caratterizzazione del prodotto carriera paramassi e normalizzano in modo molto efficace le procedure di prova che devono essere effettuate per certificare la capacità di assorbimento energetico di questi prodotti. L'applicazione di questa linea guida per la marcatura CE non può che portare ad una facile comparabilità dei vari prodotti sottoposti impatti normalizzati definendo con chiarezza i livelli energetici ai quali possono essere utilizzati i vari prodotti e fornendo informazioni indispensabili per i progettisti.

5.2. VALLI E RILEVATI PARAMASSI

I valli e i rilevati paramassi sono realizzati in genere alla base di versanti rocciosi instabili soggetti a fenomeni di crollo e/o ribaltamento, distacco di massi, blocchi e colate di detrito di grosse proporzioni. A seconda delle necessità e delle caratteristiche morfologiche del sito, l'intervento può essere costituito da un solo "vallo" o da un sistema composto da un vallo e un rilevato paramassi.

Il rilevato è costituito da un terrapieno a sezione trapezia realizzato con materiale grossolano, incoerente, proveniente dallo scavo del vallo o reperibile in zona.

Il sistema può essere completato da uno scavo sagomato (vallo o fossato di raccolta) posto immediatamente a monte dello stesso. Il fondo del fossato è ricoperto da uno strato di materiale sciolto assorbente ed ha due funzioni: la prima è quella di diminuire l'energia cinetica del masso prima che questo raggiunga il rilevato; la seconda è quella di raccogliere il materiale detritico intercettato.

Molto spesso viene posizionata una barriera paramassi elastica sulla sommità del rilevato la cui funzione è quella di impedire ai frammenti rocciosi o ai blocchi di piccole dimensioni di proseguire oltre la struttura difensiva. La tipologia di questi sistemi di difesa varia in base alla geometria, alle tecniche costruttive e al materiale con cui sono realizzate. Si possono avere rilevati costituiti da materiale grossolano incoerente sostenuti sul lato di valle da un muro o rilevati realizzati da terra rinforzata. Questi ultimi possono avere uno sviluppo longitudinale superiore al centinaio di metri. Per questo motivo è necessario realizzare un sistema di drenaggio adeguato ad allontanare le acque superficiali proveniente da monte del versante. I valli paramassi sono posti al piede del versante roccioso e sono tra i sistemi di protezione più economici e sicuri. L'intervento è realizzato mediante lo scavo in funzione della morfologia e della pendenza del pendio a monte di esso. Sul fondo dello scavo è presente uno strato di materiale granulare sciolto (sabbia e/o ghiaia) o materiale detritico proveniente dallo scavo che ha lo scopo di limitare la movimentazione dei massi in caduta distaccati dalla parete rocciosa e rotolati lungo il versante. Il dimensionamento, la geometria, il tipo e il luogo di posizionamento sono scelti e progettati sulla base di approfondite analisi geologiche-strutturali preliminari e simulazioni al computer su modelli in grado di definire i volumi, le traiettorie, le velocità e le inclinazioni al momento dell'impatto e i cinatismi dei blocchi rocciosi (caduta libera, rimbalzo, scivolamento, rotolamento, etc.). Da un punto di vista estetico-paesaggistico, questa tipologia di interventi ha un buon inserimento nel contesto naturale e sono ampiamente utilizzati soprattutto in ambiente montano. I tipi di materiali utilizzati poi permettono di ottenere un rapido inerbimento delle strutture.



Fig.26 – esempio di rilevato paramassi a sinistra e vallo paramassi con parete sostenuta da muro cellulare a destra.

5.3 GALLERIE ARTIFICIALI

Le gallerie artificiali o gallerie paramassi sono opere utilizzate nelle zone dove non sono realizzabili altre forme di protezione più economiche, soprattutto dove è necessario proteggere infrastrutture viarie o ferroviarie di particolare importanza. Generalmente sono costruite in calcestruzzo armato gettato in opera o in elementi prefabbricati in calcestruzzo ad alta resistenza. Solitamente sulla copertura della galleria è posto uno strato di materiale detritico che favorisce lo sviluppo della vegetazione spontanea ed ha il compito di assorbire gli impatti di grandi massi, caduti o rotolati giù dal versante acclive, che potrebbero causare gravi danni alla struttura della volta. Nelle zone più a rischio, sul versante a monte, vengono installate barriere elastiche paramassi.

Le gallerie artificiali risultano una garanzia estrema al problema di caduta massi nelle sedi e negli imbocchi delle gallerie stradali o ferroviarie e non necessitano di grandi interventi di manutenzione. Pur essendo molto funzionali da un punto di vista tecnico-funzionale, le gallerie paramassi hanno un fortissimo impatto paesaggistico sull'ambiente naturale circostante.

Per mitigare queste negatività, negli ultimi tempi, si cerca di migliorare il design con strutture più armoniche, favorendo lo sviluppo della copertura vegetale, in modo da mascherare il più possibile la vista.



Fig.27– esempio di galleria artificiale.

5.4 RETI PARAMASSI

Le reti paramassi sono strutture di tipo elastico utilizzate per il rivestimento di pareti rocciose coinvolte in fenomeni di crollo, caduta massi e detrito con grandezze degli elementi di circa 60-100 cm. Sono formate da fili di acciaio rivestito con zinco tessuti in modo da formare una doppia torsione con maglie esagonali; possono inoltre essere armate o rinforzate mediante funi d'armatura verticali e/o oblique in acciaio. La struttura è appoggiata direttamente sul versante da stabilizzare e fissata ad esso tramite un sistema di ancoraggi meccanici realizzati in vari modi a seconda delle situazioni richieste (bulloni, tasselli ad espansione, barre cementate). Prima della posa in opera vengono fatti interventi di pulizia e sistemazione del versante con eventuale rimodellamento della parete rocciosa. La crescita della vegetazione, naturale o artificiale, contribuisce al consolidamento della pedice. Bisogna porre particolare attenzione agli ancoraggi al piede che dovranno consentire lo svuotamento per eventuali manutenzioni della rete. Per quanto riguarda l'aspetto estetico-paesaggistico, le reti paramassi hanno un impatto apprezzabile che viene compensato dal miglioramento delle condizioni ambientali locali che l'utilizzo di queste strutture consente di ottenere. Le reti hanno la capacità di rallentare il ruscellamento delle acque senza alterarne i normali processi di infiltrazione e creano condizioni favorevoli alla rapida crescita della vegetazione consentendo di ottenere un ripristino naturale della zona di intervento.



Fig.28 – applicazione di rete paramassi.

6. CASO DI STUDIO: REALIZZAZIONE DI UN RILEVATO PARAMASSI A PROTEZIONE DEL RIFUGIO ALPE DI TIRES



Fig.29- vista da valle del rifugio da proteggere. In arancio la posizione prevista del rilevato paramassi in progetto. In evidenza si notano i due conoidi detritici a monte dell'edificio.

L'area oggetto dell'intervento si trova in alta montagna a 2.445 m di altitudine a monte del "Rifugio Alpe Tires" nel comune di Tires (BZ). Durante i vari sopralluoghi si è potuto constatare come l'area retrostante il rifugio sia a pericolo elevato, essendo un'area di arresto dei massi che cadono dalla parete "Großer Rosszahn" e proseguono il loro moto sui conoidi detritici sottostanti che hanno un'inclinazione pari a 20°. I grossi massi presenti dietro al rifugio sono tutti parzialmente scavati nel terreno e questo ci suggerisce che la loro caduta risalga a molto tempo fa. I blocchi caduti negli ultimi decenni non superano le seguenti

dimensioni: $1,0m \times 0,4m \times 0,5m = 0,2m^3$. Essendo però il fenomeno di caduta massi imprevedibile, non si può escludere che in futuro eventuali crolli raggiungano lo stabile, anche in relazione ai cambiamenti climatici che rendono sempre più instabili gli ammassi rocciosi alle alte quote, perché soggetti allo scioglimento del permafrost (terreno gelato formato da terre, ghiaccio, roccia) o per comune crioclastismo (processo di disgregazione meccanica di una roccia causato dalla pressione provocata dall'aumento di volume dell'acqua contenuta entro le fessure rocciose quando ghiaccia).

Dai sopralluoghi effettuati e dalla cartografia disponibile non si rileva l'esistenza di opere che possano interferire con il rilevato in progetto. Il sentiero tracciato che porta alla "Via Ferrata Maximilian" è confinante ma esterno all'area occupata di difesa in progetto.

6.1. METODO DI CALCOLO UTILIZZATO

Per la simulazione di caduta massi è stato utilizzato il metodo Lumped Mass in cui il blocco è modellato come una particella sferica molto piccola e solo la sua massa determina i risultati.

L'approccio Lumped Mass utilizza un'analisi delle particelle formata da tre algoritmi: quello delle particelle, quello del proiettile e quello di scorrimento.

Il primo si assicura che i parametri di simulazione siano validi, imposta le condizioni iniziali e avvia l'algoritmo del proiettile che è utilizzato per calcolare il movimento del corpo mentre è in aria. L'algoritmo di scorrimento invece, viene utilizzato per calcolare il movimento del blocco mentre è in contatto con la superficie topografica.

Per le elaborazioni statistiche sono stati considerati 1000 lanci dalla zona di distacco. Per il campionamento delle variabili statistiche è stato utilizzato il metodo di Montecarlo. Questa tecnica utilizza numeri casuali per campionare le distribuzioni di probabilità dei dati in ingresso ed è utilizzata molto nei problemi che coinvolgono il comportamento casuale nell'ingegneria geotecnica.

Il profilo usato nella simulazione è stato estrapolato sulla base del modello di

elevazione del terreno messo a disposizione dalla Provincia di Bolzano. Per il calcolo è stato impiegato il programma di calcolo RockFall della Roscienze ver.8012 64-bit (15. Oct.2020).

6.2. DEFINIZIONE DELLA TRAIETTORIA DI CALCOLO, BLOCCO DI PROGETTO, PARAMETRI DELLA SIMULAZIONE

La traiettoria di calcolo utilizzata è stata definita attraverso un'accurata osservazione della morfologia del versante, delle probabili zone di distacco e transito dei blocchi in caduta e della posizione dei depositi di crollo in relazione alla zona da tutelare. Per valutare le condizioni più critiche è stata scelta una zona di distacco nella zona più alta e più acclive del versante ed è stata tracciata una traiettoria che, rispettando la morfologia, raggiunge nel modo più diretto la zona di progetto.



Fig.30 - traiettoria di caduta massi considerata per la simulazione in rosso

Per definire la massa del blocco di progetto sono stati misurati i blocchi di dimensioni maggiori che hanno raggiunto la prossimità dello stabile. È stato ritenuto rappresentativo un blocco di $1,0m \times 0,4m \times 0,5m = 0,2m^3$. Attribuendo alla roccia un peso di volume di $2700 \text{ kg}/m^3$, il peso del blocco risulta di 540 kg .



Fig. 31,32 – Depositi di blocchi crollati in prossimità del Rifugio.



Nel modello utilizzato per il calcolo del blocco in progetto è stato assimilato ad una sfera di diametro pari a 0,578 m con un peso di 520 kg_f al quale è stata imposta una deviazione standard variazione casuale $\pm 210 \text{ kg}_f$.

Per definire i parametri della simulazione ed in particolare quelli di restituzione elastica dei diversi tipi di terreno è stata definita un'analisi a ritroso. Inizialmente sono stati utilizzati i parametri proposti in letteratura che sono stati gradualmente modificati fino ad ottenere una posizione di arresto dei blocchi coerente con la posizione dei depositi di crollo osservati in sito.

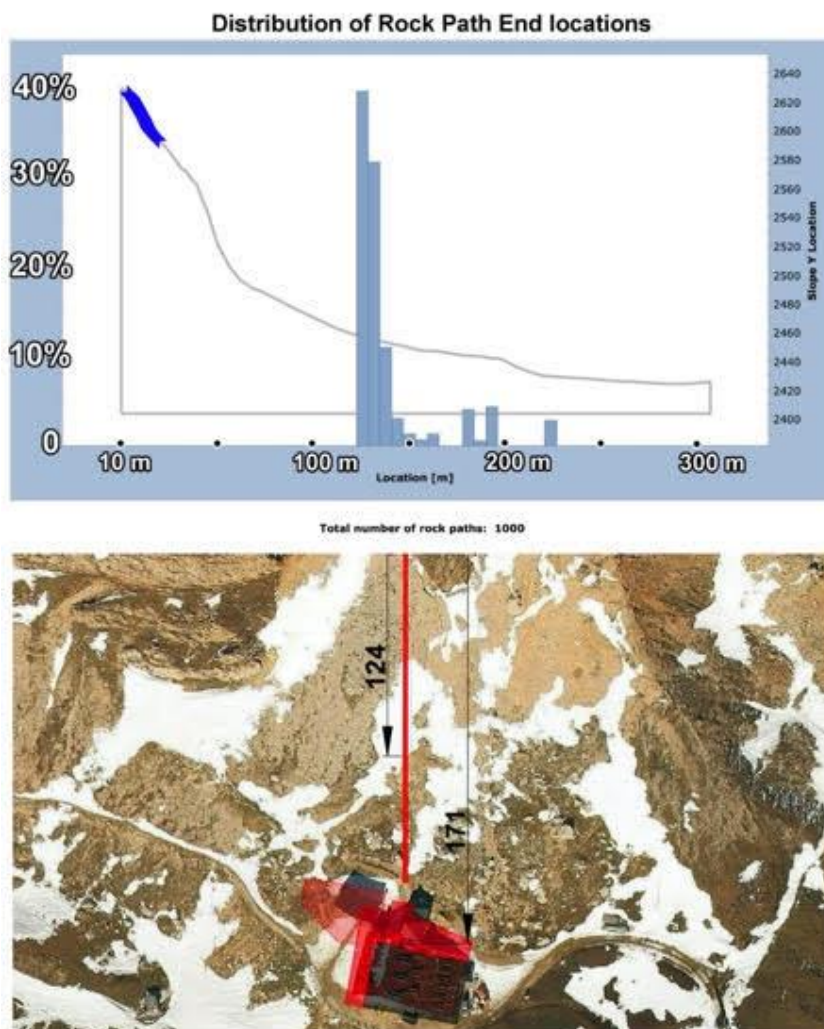


Fig.33- Confronto tra le zone di arresto dei blocchi ottenute dalla simulazione (sopra) e la posizione dei depositi di blocchi più abbondanti ai piedi del versante (sotto).

Nelle tabelle sottostanti sono presenti i parametri generali e quelli dei terreni attraversati utilizzati nella simulazione.

PARAMETRI GENERALI

General Settings

Engine	Lump Mass
Units	Metric (m, kg, kJ)
Rock throw mode	Number of rocks controlled by seeder

Engine Conditions

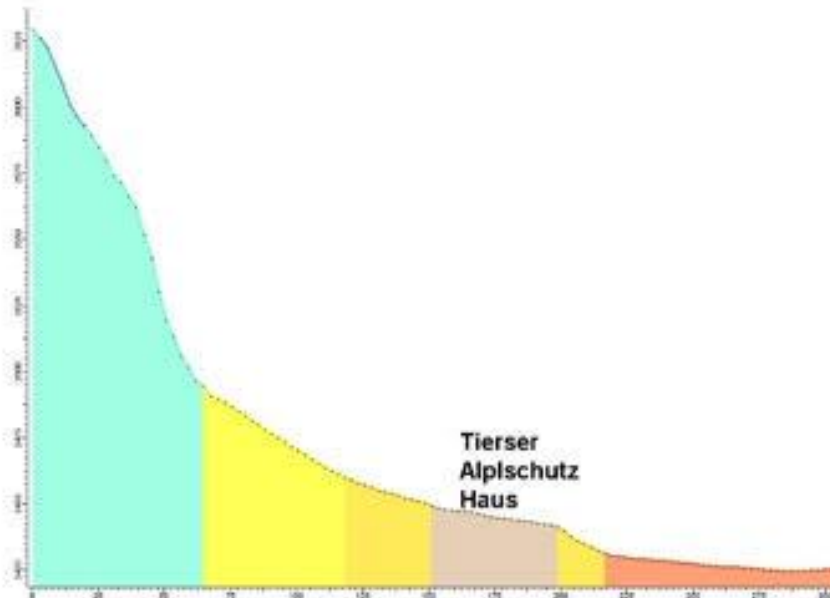
Friction angle	Use friction angle from material editor
Consider angular velocity	Yes
Maximum time per rock (s)	5
Maximum steps per rock	20000
Normal velocity cutoff (m/s)	0.1
Stopped velocity cutoff (m/s)	0.1
Maximum timestep (s)	0.01
Switch velocity (m/s)	-1e-09

Random Number Generation

Sampling method	Monte-Carlo
Random seed	Pseudo-random seed: 12345234

Slope Material Assignment


Material	From Vertex	To Vertex
Bedrock Clean	1	24
Limestone Scree Bare	24	45
Talus Bare	45	58
Gravel Road	58	77
Talus Bare	77	84
Soil little vegetation	84	120



PARAMETRI DEI TERRENI ATTRAVERSATI


Bedrock Clean

"Bedrock Clean" Properties AMASSO ROCCIOSO CALACREO - DOLOMITICO

Color			
	Mean	Distribution	Std.Dev.
Normal Restitution	0.46	Normal	0.04
Tangential Restitution	0.86	Normal	0.04
Friction Angle (°)	25	None	
Slope Roughness (°)		None	


Limestone Scree Bare

"Limestone Scree Bare" Properties CONOIDE DETRITICO - "GHIAIONE"

Color			
	Mean	Distribution	Std.Dev.
Normal Restitution	0.26	Normal	0.04
Tangential Restitution	0.8	Normal	0.04
Friction Angle (°)	25	None	
Slope Roughness (°)		None	


Talus Bare

"Talus Bare" Properties DEPOSITI DI CROLLO

Color			
	Mean	Distribution	Std.Dev.
Normal Restitution	0.32	Normal	0.04
Tangential Restitution	0.82	Normal	0.04
Friction Angle (°)	25	None	
Slope Roughness (°)		None	

Soil little vegetation


"Soil little vegetation" Properties SUOLO ELUVIALE VEGETATO

Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.81	None			

Restitution		
Friction Angle (°)	12.79	None
Slope		
Roughness (°)		None

Gravel Road

"Gravel Road" Properties SUOLO GHIAIOSO SPIANATO NEI PRESSI DEL RIFUGIO

Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.35	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	10.01	None			
Slope					
Roughness (°)		None			

Seeder Properties ZONA DI DISTACCO – (vertici: progressiva, quota)


Name	Seeder 1
	(2.81943,2626.34)
	(5.63886, 2622.4)
	(8.45829,2615.59)
Location	(11.2777,2609.03)
	(14.0971,2600.96)
	(16.9166,2596.44)
	(19.736, 2592.56)

Rocks to Throw NUMERO DI LANCI EFFETTUATO

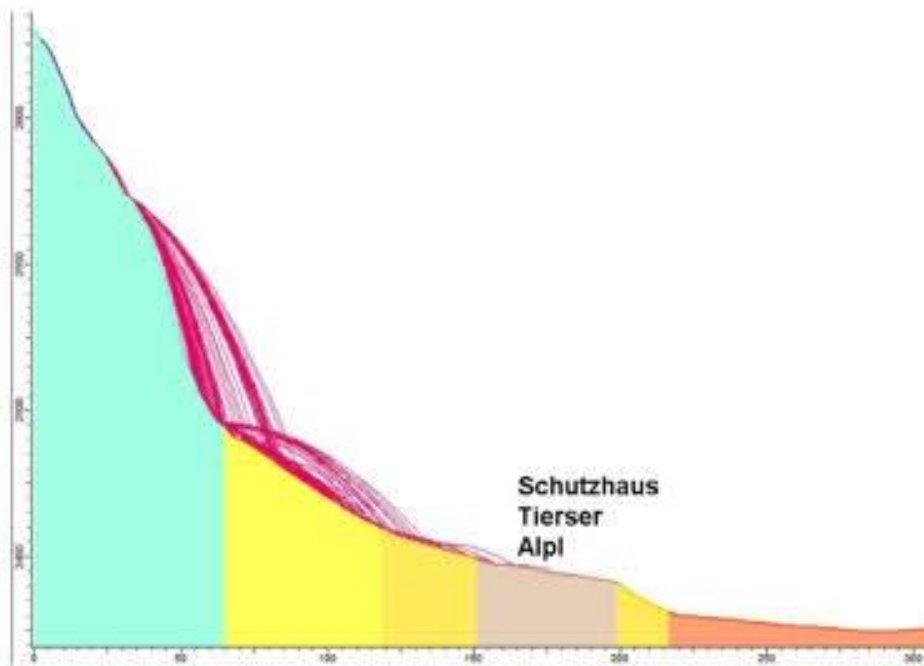
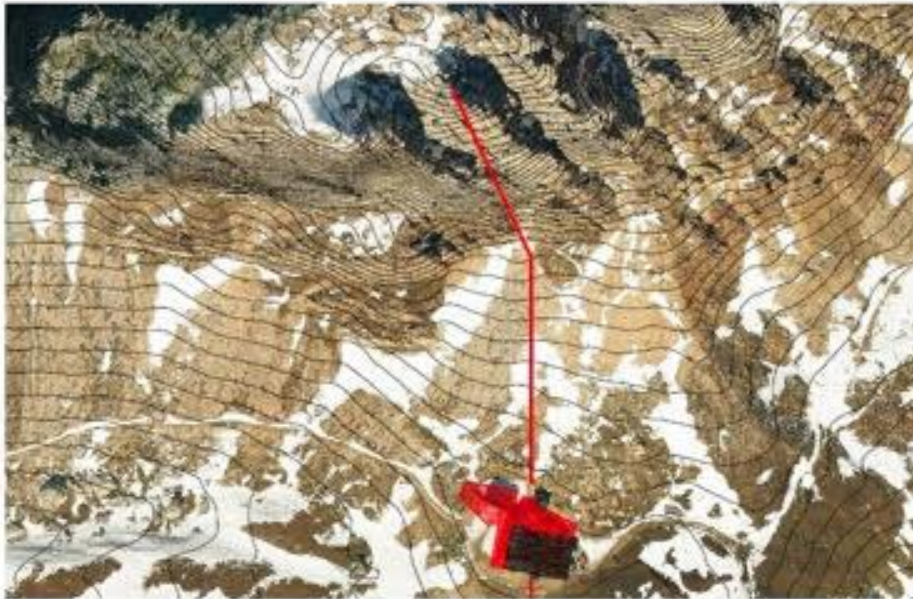
Number of Rocks	1000 Overall
Rock Types	Group 1

Initial Conditions	CONDIZIONI INIZIALI DEI LANCI				
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0.5	None			
Vertical Velocity (m/s)	0.5	None			
Rotational Velocity (deg/s)	0	None			
Initial Rotation (deg/s)	0	Uniform		0	360

Properties CARATTERISTICHE DEI BLOCCHI

Name	Group 1				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	521.4	Normal	70	210	210
Density(kg/m3)	2700	None			

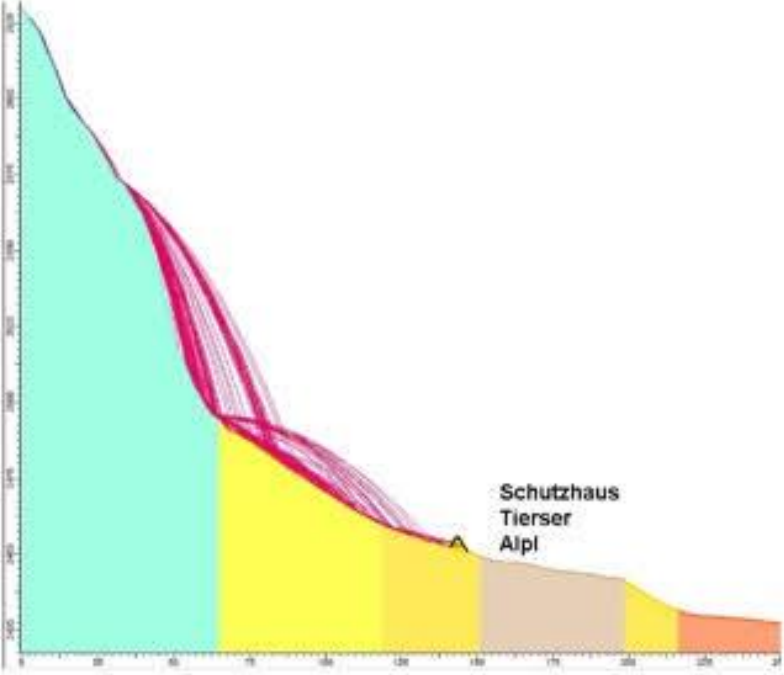
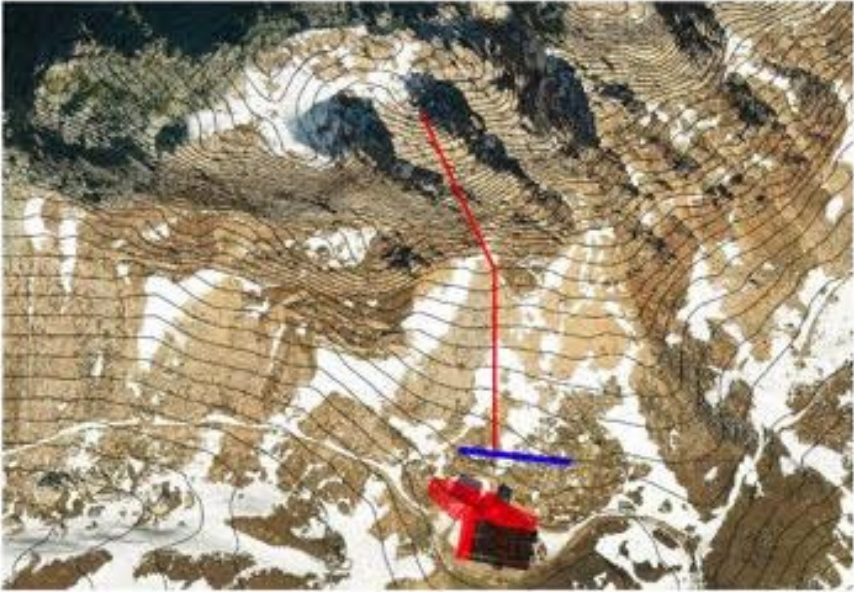
RISULTATI DELLA SIMULAZIONE – SENZA OPERE DI DIFESA E SENZA EDIFICIO



Run Properties		RISULTATI REGISTRATI DELLE CADUTE SIMULATE		
Simulation Time (s)	0.46			
Envelope data:				
	Max	Mean	95%	
Envelope Bounce Height (m)	43.67	20.1	40.31	
Envelope Total Kinetic Energy (kJ)	570.3	304.5	570.3	
Envelope				
Translational Kinetic Energy (kJ)	536.5	268.7	536.5	
Envelope Rotational Kinetic Energy (kJ)	83.98	45.46	83.98	
Envelope				
Translational Kinetic Velocity (m/s)	45.18	31.89	45.18	
Envelope Rotational Kinetic Velocity (rad/s)	77.45	56.69	77.45	

Stopping Reason	RAGIONE DELL'ARRESTO DEI BLOCCHI
CONTINUE	0
Invalid Start Location	0
Invalid Slope Geometry	0
Invalid bad crest loss definition	0
Invalid relative size between rock and slope	0
Max Compute Time	0
Max Steps	0
Edge Model	0
Stopped	1000
Stopped (wedged)	0
Stopped (chattering)	0
Hit Barrier	0
Hit Berm with infinite capacity	0
No collision found	0
Bad Collision Geometry (location before)	0
Rock is freefalling onto a spike or a trough	0
END_ERROR_UNKNOWN	0
END_ERROR_POSITIVE_GAP	0
Bad collision calculation	0
Bad Collision Geometry (0 intersection)	0
Bad Collision Geometry (location after)	0
Bad Collision Geometry (missing intersection)	0
Error during results reading	0
Total Rocks	1000

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE – CON OPERA DI DIFESA



La progettazione dell'opera sarà trattata nel prossimo paragrafo. A titolo indicativo, per permettere il calcolo dei valori degli impatti, nelle simulazioni è stato posizionato un rilevato paramassi con le seguenti caratteristiche.

Berm(s) Geometry

Berm 1

Assigned Berm Property	PROPRIETA' GEOMETRICHE DEL TOMO	
Vertex	X	Y
1	145.985	2450.97
2	148.006	2454.47
3	149.006	2454.47
4	151.027	2450.97
5	151.928	2449.41
6	151.955	2449.36
7	152.266	2448.82

Berm Properties

Default Berm

"Default Berm" Properties		PROPRIETA' FISICHE DEL TOMO			
Berm Property		Distribution	Calculate Impact		
	Mean		Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.1	None			
Tangential Restitution	0.85	None			
Friction Angle (°)	30	None			
Slope					
Roughness (°)		None			

Berm(s) Impact Results

Berm 1	NUMERO IMPATTI / NUMERO LANCI TOTALI		
Berm Name	Berm 1		
Hits	584 / 1000 rocks		
Impact Statistics	VALORI medi, minimi, massimi DEGLI IMPATTI		
Based on actual values for all impacted rocks.			
	Mean	Min	Max
Impact Along Height (m)	0.15	0.00	4.06
Translational Velocity(m/s)	4.47	0.10	21.97
Translation Energy (kJ)	18.18	0.00	150.27

ELABORAZIONE STATISTICA - 95° PERCENTILE DEI VALORI DI IMPATTO

Calcolati su 584 blocchi che raggiungono il rilevato paramassi:

ALTEZZA DEGLI IMPATTI (bounce height)	2,4 m
VELOCITA' TRASLAZIONE (Translational Velocity)	21,7 [m/s]
ENERGIA TOTALE (total kinetic energy)	175 [kJ]

Si ritiene che la simulazione utilizzata rappresenti realisticamente i fenomeni di caduta massi che potrebbero coinvolgere il rifugio. I valori utilizzati nella simulazione tramite back analysis non si scostano di molto da quelli proposti in letteratura per gli stessi tipi di terreno. Nel paragrafo seguente vedremo i calcoli utilizzati per la progettazione dell'opera di mitigazione scelta per il rifugio.

6.3. PROGETTAZIONE RILEVATO PARAMASSI

6.3.1. Generalità

Dai vari sopralluoghi nella zona a monte del rifugio si è convenuto sulla necessità di un'opera di difesa dello stabile dalla caduta massi. La tipologia dell'opera di difesa da utilizzare è ricaduta su un rilevato perché:

- si ha la possibilità di costruire l'opera di difesa con materiale disponibili nell'area di progetto del paramassi;
- costituisce il miglior inserimento paesaggistico al confronto con una tradizionale barriera paramassi metallica;
- è una soluzione economica.

L'esecuzione delle opere di progetto prevede lavori di movimento terra su un sedime di circa $735 m^3$, di cui un volume di circa $275 m^3$ dovrà essere scavato per arrivare al piano di posa previsto in progetto, ma anche tale materiale verrà utilizzato successivamente nella realizzazione della terra armata che costituirà il rilevato. Il materiale di scavo è formato da ghiaia sabbiosa con pietre e blocchi singoli e presenta ottime caratteristiche geologiche, soprattutto la ghiaia sabbiosa

per la costruzione del rilevato paramassi. I blocchi e massi residui di crolli storici possono invece essere riutilizzati per realizzare i muri in massi ciclopici. Il rilevato in progetto avrà un'altezza pari a 3 m e un coronamento largo circa 1 m. Di seguito descriveremo i passaggi che hanno portato a questo risultato del dimensionamento. Il paramento di monte del rilevato sarà realizzato in massi ciclopici con inclinazione sulla verticale di circa 70°. Il paramento di valle invece avrà un'inclinazione di circa 60° per integrarsi meglio con il pendio naturale. Per garantire stabilità dell'opera nel tratto in cui il paramento sarà più inclinato è prevista la realizzazione di una scogliera anche lato valle; nella zona meno pendente invece è prevista la realizzazione di una terra rinforzata con geogriglie e una geostuoia antierosiva mascherata da uno strato di terreno naturale. Per inserire il tutto nella maniera più armoniosa nel contesto paesaggistico, oltre a una particolare modellazione geometrica dell'opera, si prevede di far emergere qualche masso sparso dal paramento di valle. La posizione del rilevato in lieve pendenza, garantisce il deflusso delle acque meteoriche verso ovest. Per maggiore sicurezza, soprattutto alla fine della primavera quando la neve a monte dell'opera si scioglie, si prevedono dei canali drenanti in ghiaia a distanza di circa 10 m per garantire il deflusso delle acque meteoriche e da scioglimento della neve.

6.3.2. Risultati delle simulazioni di caduta massi

Dalle simulazioni di caduta massi esposte nel paragrafo 6.2. si ricavano i parametri di base per il dimensionamento del rilevato paramassi. Dalle analisi traiettografiche bidimensionali eseguite al 95° percentile degli impatti in corrispondenza del rilevato in progetto:

Altezza degli impatti	$h_t = 2,4 \text{ m}$
Velocità traslazionale	$v_t = 21,7 \text{ m/s}$

A monte del rifugio la morfologia del pendio è caratterizzata da due grandi conoidi detritici e quindi esso ha un andamento piuttosto regolare. Le simulazioni

si basano sul DTM Provincia di Bolzano con maglia 2,5 x 2,5 m che si considera quindi sufficientemente accurato per descrivere i fenomeni di caduta massi. Va evidenziato che le simulazioni sono state eseguite affinando i coefficienti di restituzioni con back analysis.

6.3.3. Definizione energia di progetto

Per il calcolo dell'energia di progetto dell'opera di protezione di tipo passivo è necessario definire i valori di massa di progetto (m_d) e velocità di progetto (v_d). La massa del blocco di progetto (m_d) è definita come il prodotto del volume di blocco di progetto (V_b) per la massa per unità di volume della roccia (γ) moltiplicato per un coefficiente di amplificazione (γ_m):

$$m_d = (V_b \cdot \gamma)\gamma_m = 594 \text{ kg}$$

$$\gamma_m = \gamma_{VolF1} \cdot \gamma_\psi = 1,1$$

dove:

- $V_b=0,2m^3$ il volume del blocco di progetto
- $\gamma = 2700 \text{ kg}/m^3$ la massa per unità di volume della roccia in sito
- $\gamma_{VolF1} = 1,1$ coefficiente legato alla precisione del rilievo
- $\gamma_\psi = 1,0$ coefficiente legato alla massa per unità di volume, solitamente posto pari a 1,0.

La velocità dei blocchi di progetto (v_d) è definita come la velocità in corrispondenza del punto di impatto con l'opera corrispondente al frattile 95% delle velocità calcolate (v_t) nelle analisi delle traiettorie moltiplicata per il coefficiente di amplificazione (γ_F):

$$v_d = v_t \cdot \gamma_F = 22,6 \frac{m}{s}$$

$$\gamma_F = \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp} = 1,0404$$

dove:

- $\gamma_{Tr} = 1,02$ coefficiente di affidabilità di calcolo delle traiettorie
- $\gamma_{Dp} = 1,02$ coefficiente legato alla precisione del rilievo

L'energia cinetica sollecitante di progetto è $E_{sd} = \frac{1}{2} m_d v_d^2 l = 175 kJ$

Dove l è un coefficiente di amplificazione legato al rischio per la vita umana, trattandosi di una struttura ricettiva e visti i modesti livelli di energia ottenuti dal calcolo, in questo caso è assunto pari a 1,15.

6.3.4. Definizione dell'altezza di intercettazione di progetto

$$h_d = h_t \cdot \gamma_F = 2,5 m$$

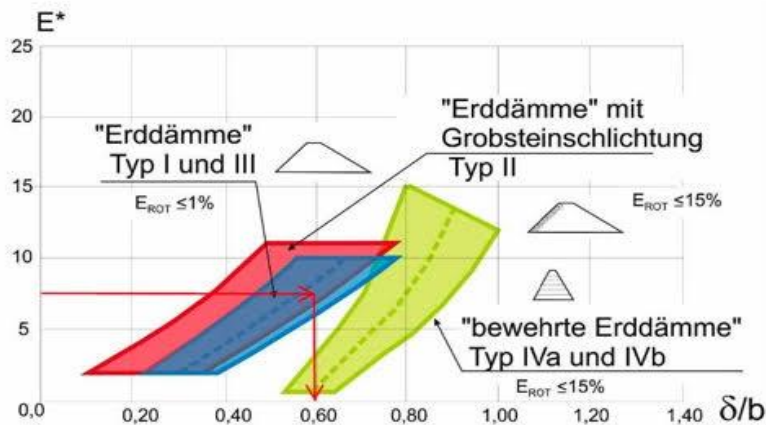
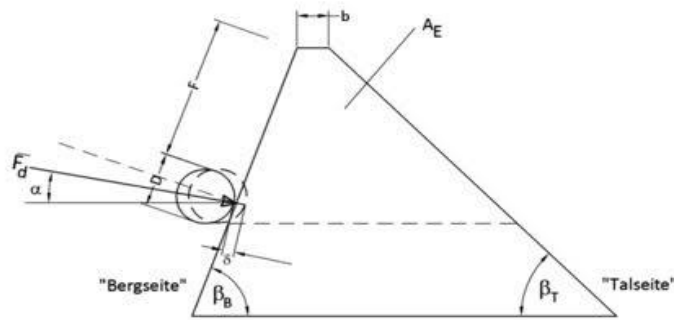
L'altezza di intercettazione del rilevato nel punto di installazione (h_{tot}) deve essere maggiore o uguale alla somma dell'altezza di progetto (h_d) e del franco libero minimo (f_{min}).

$$h_{tot} \geq h_d + f_{min} = 2,5 + 0,5 = 3,0 m$$

6.3.5. Verifica di stabilità esterna del rilevato paramassi

Il rilevato paramassi deve essere riuscire ad intercettare le traiettorie dei blocchi sul versante ed arrestarli senza essere sfondato, compiendo un lavoro di deformazione uguale all'energia cinetica posseduta dai massi. La verifica è stata svolta con riferimento ai diagrammi proposti da Hofmann & Molk (2012). Il metodo prevede la stima dell'energia adimensionale calcolata con la seguente relazione in cui si trovano le notazioni chiarite dalla figura sottostante:

$$E^* = \frac{E}{\gamma \cdot A_E \cdot D \cdot h_A}$$



Attraverso il diagramma sopra riportato si ricava in base all'energia adimensionale (E^*) la deformazione del tomo al momento dell'impatto.

Nota la deformazione δ si calcola la forza statica equivalente attraverso la seguente formula:

$$F_k = \frac{v^2 m}{\delta}$$

Si verifica dunque la stabilità allo scivolamento del volume efficace del blocco nell'ipotesi che sia interessata una larghezza dell'opera pari a 6 volte il diametro del blocco impattante. La verifica si riferisce alla sezione tipo di larghezza più ridotta, risultando automaticamente verificata per altre sezioni. I calcoli di stabilità esterna sono riportati nella seguente tabella:

diametro del blocco (D)	0,578 m
Massa del blocco (m)	594 kg
Velocità del blocco (v)	22,6 m/s
Massa per unità di volume (γ)	21000 N/m ³
Larghezza coronamento (b)	1,0 m
Base relativa dell'area attivata (c)	1,97 m
Energia cinetica del blocco impattante (E)	175000 J
Altezza relativa (h_a)	1,15 m
Area attivata A_E	1,71 m ²

Area totale del rilevato (A)	9,80 m ²
Base rilevato (b)	4,20 m
Energia adimensionale (E*)	7,35
Valore da diagramma δ/b	0,6
profondità di penetrazione del blocco δ	0,6 m
Forza equivalente statica F_k	505,65 kN
Forza di calcolo F_d	657,35 kN
Larghezza reagente I_r	3,47 m
Peso volume efficace del rilevato W	713,7 kN
Coesione rilevato c	7,0 kPa
Angolo attrito di picco φ	43,0°
Forza resistente R_d	767,5 kN
Verifica a scivolamento $CS = R_d/F_d$	1,17 > $\gamma_R = 1,1$

La verifica a scivolamento del volume efficace del rilevato è dunque soddisfatta.



Fig.34 – Vista del rilevato realizzato dalla terrazza del rifugio



Fig.35 – vista sud-ovest del rilevato paramassi realizzato a ridosso del rifugio



Fig.36 – Vista sud-est del rilevato paramassi per la protezione del rifugio

7. CONCLUSIONI

Tra i fenomeni franosi in ambiente alpino, la caduta massi rappresenta certamente uno di quelli più impattanti anche perché estremamente diffuso. Essendo un fenomeno molto complesso da monitorare in quanto impulsivo e difficilmente localizzabile a priori, il problema della caduta massi può essere approcciato in modo diverso sviluppando svariati sistemi di controllo e soluzioni da valutare al meglio a seconda dei casi che si presentano. Per questi motivi, durante l'elaborazione di questa tesi è stato svolto un lavoro soprattutto di ricerca bibliografica, con un'approfondita analisi dei cinematismi del blocco singolo e delle energie coinvolte in tali. Nel caso presentato si ritiene che la simulazione di caduta massi effettuata costituisca una rappresentazione realistica dei fenomeni che potrebbero coinvolgere il rifugio in futuro. I valori dei parametri definiti tramite l'analisi a ritroso (back analysis) non si scostano in modo significativo da quelli proposti dalla letteratura tecnico-scientifica di settore per i medesimi terreni.

Ringraziamenti.

Il primo speciale ringraziamento va al mio relatore Prof. Paolo Carrubba, per la sua immensa pazienza e per i suoi indispensabili consigli non solo durante la stesura di questa tesi, ma per tutto il mio lunghissimo percorso universitario. Il suo incoraggiamento e le sue parole mi hanno aiutato a superare momenti veramente difficili.

Un doveroso ringraziamento va a Giacobbe e all'ing. Boghetto per la loro disponibilità e prontezza nella ricerca dell'oggetto dell'elaborato di ovvia importanza fondamentale.

Ringrazio infinitamente i miei genitori che pur non condividendo ogni mia scelta, mi hanno sempre appoggiato. Di difficoltà ne abbiamo passate tantissime, ma è anche grazie a quello che è successo che oggi sono la donna che sono. Caro Papi, anche se i tuoi modi non sono dei più delicati, so l'amore che ci lega e il bene che mi vuoi anche se non me lo dici mai. Mi hai insegnato che con la perseveranza, la testardaggine e l'ambizione si può ottenere qualsiasi cosa si voglia e quindi grazie. Mamma, il nostro rapporto è sempre stato di amore e odio, sei la donna più forte che io conosca. Mi hai sempre protetto sotto la tua "ala" e so che lo farai sempre e in qualsiasi momento. Vi amo follemente.

Ringrazio le mie amiche di una vita Sara, Maria Elena e Carlotta. Amicizie come le vostre sono "uniche e rare". Devo aprire una parentesi per la mia Saretta anche se poche righe non basteranno per ringraziarti adeguatamente. Sei sempre stata il mio rifugio nei momenti più bui e la mia partner in crime in ogni marachella. Ho sempre potuto contare su di te e so che lo potrò fare per sempre.

Ringrazio il mio ragazzo che mi ha sopportato nei momenti di nervosismo che mi hanno accompagnato in tutto questo periodo standomi sempre accanto.

Ringrazio alla fine me stessa per non aver mai mollato, per averci creduto e per avere raggiunto il primo obiettivo di tanti che ho in mente per il mio futuro.

Bibliografia

- A. Carotti et al., “Mathematical modelling of geogrid reinforced embankments subject to high energy rock impacts”.
- A. Carotti et al., “Modeling of geogrid reinforced embankments for rockfall protection”.
- APAT, Manuali e Linee Guida 10/2002, “Opere di difesa massi”, pag 76-92.
- APAT, Manuali e Linee Guida 39/2006, “Fenomeni di dissesto geologico-idraulico sui versanti”, pag 30-66.
- Baleani Marco, Mazzanti Paolo, (2017) “Analisi geostrutturale 2.0: caratterizzazione di un ammasso roccioso attraverso nuvole di punti”.
- CDM DOLMEN srl, “Manuale Utente, IS GeoRocce”.
- CDM DOLMEN srl, “Validazione del codice di calcolo IS GeoMassi”
- Cruden, D.M., and Varnes, D.J., (1996) Landslide types and processes. In Turner, A.K., and Schuster, R.L. (eds.), “Landslides, Investigation and Mitigation, Washington D.C.: National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247.
- Giani Gianpaolo (1992) “Caduta di Massi, Analisi del moto ed opere di protezione”.
- Oliveto Francesco, Stocchero Fabio, (2017), “L’importanza dei metodi di analisi tridimensionali nel calcolo di caduta massi e nelle opere di difesa passiva”.
- Paolo Paronuzzi, “Modelli di calcolo per l’analisi della propagazione di blocchi rocciosi in frana.
- Peila et al., (2002), “Testing and modelling geogrid reinforced soil embankments subject to high energy rock impacts”.
- Relazione geologica del Dr. Hermann Nicolussi
- Relazione tecnica e fotografica dell’ing. Andrea Boghetto
- Weigang Shen et al., (2019) “DEM analyses of rock block shape effect on the response of rockfall impact against a soil buffering layer”.
- Zhao et al., (2021), “Experimental study on the multi-impact resistance of a composite cushion composed of a sand and geofoam”.

Sitografia

- http://archivia.unict.it/bitstream/10761/1328/2/SCDSVT84L13C351N-3_Cap_2.pdf
- <https://geoapp.geostru.eu/app/barriere-paramassi-rigide-ed-elastiche/>
- <http://lavoripubblici.regione.campania.it/joomla/jdownloads>
- https://moodle2.units.it/pluginfile.php/399306/mod_resource/content/1/13.pdf
- https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/.RAMMS_ROCK_Manual.pdf
- https://www.geologimarche.it/wp-content/uploads/2015/04/Fanti_Appignano1.pdf
- <https://www.geoprodotti.eu/categoria-campi-applicazione/protezione-caduta-massi/>
- <https://www.geostru.eu/blog/2019/07/12/opere-di-difesa-caduta-massi/>
- <https://www.iagaa.org/public/GGA.2007-06.0-04.0177.pdf>
- https://www.iat.unina.it/pdf/tesi/abstract_Serena_Dato.pdf
- <https://www.intrageo.it/geologia/geomorfologia/le-frane/>
- <https://www.programgeo.it/documenti/MascoTeoria.pdf>
- https://www.roscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock_Engineering-Full-Text.pdf
- <https://www.teknoring.com/news/ingegneria-civile/caduta-massi-opere-passive-contenimento/>
- <https://www.teknoring.com/news/rischio-idrogeologico/caduta-massi-gli-interventi-per-la-protezione/>
- <https://webthesis.biblio.polito.it/7003/1/tesi.pdf>