POLITECNICO DI TORINO

DISEG – Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Analisi traiettografica 3D di un fenomeno di caduta massi nel Comune di Perrero (TO) e proposta di un intervento di difesa

Relatore: Candidato:

Prof. Claudio Scavia Victoria Y. Scappatura

Prof.ssa Marta Castelli

Prof.ssa Monica Barbero

Anno Accademico 2017/2018

A mio nonno, che i suoi sacrifici non siano stati vani.

«Dal profondo della notte che mi avvolge, Buia come un pozzo che va da un polo all'altro, Ringrazio qualunque dio esista Per l'indomabile anima mia.

Nella feroce stretta delle circostanze Non mi sono tirato indietro né ho gridato. Sotto i colpi d'ascia della sorte Il mio capo è sanguinante, ma indomito.

Oltre questo luogo d'ira e di lacrime Si profila il solo orrore delle ombre, E ancora la minaccia degli anni Mi trova e mi troverà senza paura.

Non importa quanto stretto sia il passaggio, Quanto piena di castighi la vita, Io sono il padrone del mio destino: Io sono il capitano della mia anima.»

N. Mandela

Sommario

La caduta massi franosa naturale è un fenomeno che consiste nel distacco da pareti rocciose di blocchi isolati ed il successivo moto verso valle. Esso si manifesta senza preavviso in versanti particolarmente acclivi, con grande variabilità di comportamento durante la discesa, a seconda delle caratteristiche topografiche e vegetative del pendio e delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei blocchi stessi. La necessità di proteggere vite umane, beni ed infrastrutture viarie è la motivazione principale dello studio di questi fenomeni, che possono avere impatto molto grave sulla viabilità, gli edific e le persone.

In questo documento di tesi si vuole ricostruire un evento di crollo in roccia, avvenuto nel 2011, attraverso back-analysis e con l'utilizzo di un approccio numerico avanzato di tipo *rigid body*, tridimensionale, probabilistico e stocastico: il codice di calcolo Rockyfor3D (Dorren, 2014).

Lo scopo è quello di individuare con buona approssimazione le traiettorie più probabili seguite dai massi, la massima distanza percorsa e l'energia cinetica massima sviluppata durante il fenomeno e che dovrà essere dissipata attraverso opere di difesa.

In particolare, viene simulata la fase successiva al distacco, cioè la fase di propagazione del fenomeno. Il codice usato viene validato eseguendo simulazioni con numero di traiettorie per cella via via crescenti fino ad individuare il numero di lanci che rende minimo l'errore e con l'opportuna calibrazione di numerosi parametri di input, al fine di ottenere risultati quanto più simili all'evento realmente accaduto.

Si realizzano più scenari in cui viene variato il volume dei blocchi di partenza per verificare l'influenza della volumetria sulle simulazioni.

Si effettua inoltre un confronto con studi precedenti realizzati con RotomapGIS, codice di calcolo ad approccio *lumped mass* e deterministico, anch'esso di tipo tridimensionale. La ragione è definire quale dei due codici sia più adatto a riprodurre l'evento e in che modo, forma e dimensioni dei blocchi ma anche copertura del pendio, influenzino la simulazione.

Per ogni scenario analizzato, vengono riprodotte le stesse simulazioni numeriche inserendo dei collettori, al fine di conoscere il numero di massi che attraversano le barriere virtuali ed i relativi parametri cinetici.

Infine si propongono due interventi di difesa, uno per ogni collettore simulato, in base al frattile del 95% delle frequenze cumulate dei risultati ottenuti, se ne progetta la fondazione e si effettua un confronto, considerandone la fattibilità, sulla base di considerazioni anche di carattere economico.

I risultati delle simulazioni vengono visualizzati come raster e letti tramite uno strumento GIS open source.

Indice

Introduzione	1
1. Il fenomeno della "caduta massi"	3
1.1 Cenni su classificazione e descrizione dei fenomeni franosi	4
1.2 Cause della caduta massi	6
1.3 Fase di evoluzione del crollo	9
1.3.1 Traiettoria aerea	9
1.3.2 Interazione blocco-pendio	11
1.3.3 Arresto	15
1.3.4 Coefficiente di restituzione	15
1.3.4 Effetti della forma del blocco	18
1.3.4 Effetti della dimensione del blocco	20
1.3.5 Effetto della vegetazione	21
2. Metodi di analisi della caduta massi	24
2.1 Modelli empirici	27
2.2 Modelli cinematici	28
2.2.1 Metodi numerici	29
2.2.2 Modelli analitici	29
2.2.2.1 Metodo "lumped mass"	31
2.2.2.2 Metodo "rigid body"	35
2.2.2.3 Metodo "ibrido"	37
2.3 Risultato delle analisi di caduta massi	37
3. Il software Rockyfor3D	39

3.1 Dati raster di input	40
3.2 Simulazione con foresta	45
3.3 Simulazione con reti paramassi	47
3.4 Impostazioni iniziali per l'utilizzo del software	48
3.5 Aspetti principali del modello	49
3.6 Impatto contro un albero	54
3.7 Calcolo della direzione di caduta	57
3.8 Files di output del modello	59
4. Caso di studio	63
4.1 Inquadramento geografico	63
4.2 Inquadramento climatico	65
4.3 Inquadramento geomorfologico	66
4.4 Inquadramento litologico	67
4.4.1 Substrato	67
4.4.2 Copertura quaternaria	68
4.5 Descrizione e storia del sito	69
4.6 Descrizione degli eventi franosi del Marzo 2011	71
4.6.1 Evento franoso 1	74
4.6.2 Evento franoso 2	78
4.6.3 Cause dei movimenti franosi	79
5. Analisi del caso studio	81
5.1 Procedura per la definizione del pendio in ambiente GIS	82
5.1.1 Creazione degli attributi di caratterizzazione	83
5.1.2 Modalità di inserimento dati	84

5.1.2.3 Definizione delle celle sorgenti	
6. Simulazione del crollo con il codice Rockyfor3D	105
6.1 Back-analysis	105
6.2 Risultati dell'analisi	108
6.2.1 Area d'invasione	108
6.2.2 Energia cinetica	109
6.2.3 Velocità	112
6.2.4 Altezze di rimbalzo	112
6.2.5 Distribuzione dei depositi	113
6.3 Statistiche dei risultati in prossimità dei collettori	114
6.3.1 Analisi con collettore in posizione 1	116
6.3.2 Analisi con collettore in posizione 2	120
6.4 Confronto con codice di calcolo RotomapGIS	124
6.5 Considerazioni sul confrono dei risultati dati dai co	dici di calcolo 129
7. Scenari a differente volumetria	131
7.1 Scenario 1 – blocco da 0,25 m ³	131
7.1.1 Risultati delle analisi con collettore	134
7.2 Scenario 2 – blocco da 1 m ³	137
7.2.1 Risultati delle analisi con collettore	140
7.3 Scenario 3 – blocco da 10 m ³	143
7.3.1 Risultati delle analisi con collettore	147
7.4 Confronto dei risultati ottenuti per i vari scenari	150
8. Proposta di intervento	155
8.1 Cenni sulle barriere paramassi a rete	155

8.2 Linee guida progettuali	159
8.3 Scelta della barriera paramassi	163
8.4 Dimensionamento e verifica delle fondazioni	163
8.5 Barriera in posizione 1	170
8.5.1 Scelta della barriera	170
8.5.2 Dimensionamento dei tiranti con il metodo di Bustamante e Doix	172
8.5.3 Analisi prezzi	175
8.6 Barriera in posizione 2	177
8.6.1 Scelta della barriera	177
8.6.2 Dimensionamento dei tiranti con il metodo di Bustamante e Doix	180
8.6.3 Analisi prezzi	182
9. Osservazioni e conclusioni	186
Ringraziamenti	191
Ringraziamenti	
	191
Bibliografia	191 197
Bibliografia	191 197 198
Bibliografia Sitografia Allegati	191 197 198 198
Bibliografia Sitografia Allegati Allegato A1	191 197 198 198 208
Bibliografia Sitografia Allegati Allegato A1 Allegato A2	191 197 198 198 208 213
Bibliografia Sitografia Allegati Allegato A1 Allegato A2 Allegato A3	191 197 198 198 208 213 222
Bibliografia Sitografia Allegati Allegato A1 Allegato A2 Allegato A3 Allegato A4	191 197 198 198 208 213 222 229
Bibliografia Sitografia Allegati Allegato A1 Allegato A2 Allegato A3 Allegato A4 Allegato A5	191 197 198 198 208 213 222 229 231

Allegato A9	 235
Allegato A10	 236
Allegato A11	 238
Allegato A12	239
Allegato A13	240
Allegato A14	242
Allegato A15	244

Introduzione

Il presente elaborato nasce dalla consapevolezza dell'elevata pericolosità legata alle frane da crollo in roccia e di caduta massi. Questi fenomeni avvengono principalmente in zone montane e seppur caratterizzati da blocchi di volume ridotto, l'elevata velocità con cui essi si muovono fa sì che, all'impatto con il suolo del pendio, si sviluppino ingenti quantitativi di energia cinetica, tali da provocare danni, anche gravi, ad opere antropiche ma soprattutto vite umane.

E' dunque opportuno studiare il comportamento meccanico che assumono i massi durante il moto e la probabilità di occorrenza di un dato fenomeno al fine di proteggere gli elementi a rischio.

Gli obiettivi di questa trattazione sono la ricostruzione in back-analysis di un evento di caduta massi, verificatosi nel marzo 2011 lungo un versante ubicato nel Comune di Perrero, in provincia di Torino, e l'avanzamento di una proposta d'intervento atta a mitigarne il rischio.

Le informazioni riguardanti i volumi coinvolti nel caso studio sono state reperite attraverso i rapporti di evento forniti da ARPA Piemonte e CNR (<u>ARPA Piemonte</u>, <u>2011</u>, <u>CNR</u>, <u>2011</u>).

Per la ricostruzione del crollo è stato applicato un metodo numerico avanzato ad approccio *rigid body*, capace di analizzare la fase di propagazione dei volumi staccatisi dalla parete rocciosa; metodologia che ha permesso di simulare l'evento attraverso la riproduzione di meccanismi di rimbalzo dei blocchi durante la discesa verso valle.

Il software utilizzato è il codice di calcolo Rockyfor3D, prodotto da Ecorisq, associazione internazionale attiva nel campo del rischio naturale. Esso è in grado di calcolare e rappresentare le probabili traiettorie di caduta dei blocchi in moto, tenendo in considerazione il campo tridimensionale ed effettuando analisi probabilistiche di dettaglio.

L'elaborato è stato organizzato in diversi capitoli strutturati come segue:

- Capitoli 1 e 2: sono dedicati alla breve descrizione e classificazione dei fenomeni franosi soffermandosi con attenzione sulla caduta massi, il suo comportamento fisico e i metodi di analisi più usati per la sua modellazione;
- Capitolo 3: viene introdotta una descrizione in dettaglio del software utilizzato per la modellazione numerica;
- Capitoli 4 e 5: sono descritti rispettivamente il caso studio, con inquadramenti di carattere geografico, climatico, geomorfologico e storico, e le procedure per la definizione dei raster di input necessari all'avvio delle analisi;
- Capitolo 6: sono state svolte diverse simulazioni di crollo con scenari a volumetria differente ed in particolare i risultati ottenuti per il primo scenario sono stati confrontati con quelli estratti da studi precendenti (Mininno, 2013) le cui simulazioni sono state effettuate con approccio deterministico mediante il software lumped mass RotomapGIS, prodotto da Geo&Soft (Scioldo, 1991);
- Capitoli 7 e 8: sono dedicati al dimensionamento e alla verifica di un intervento di difesa per lo scenario 1, tenendo in considerazione anche il fattore economico attraverso un'analisi prezzi.

1. Il fenomeno della "caduta massi"

I crolli in roccia si identificano come fenomeni di frana o valanga, la cui instabilità è determinata essenzialmente da un processo geomorfico a carattere gravitativo che ha origine dalla mobilitazione, da pareti rocciose ad inclinazione accentuata o addirittura sub-verticali, di volumi di materiale in caduta libera, che durante le fasi del moto impattano il versante alternando rimbalzi e rotolamenti.

Quando il crollo interessa il moto di blocchi isolati a comportamento dinamico indipendente l'uno dall'altro, cioè blocchi non interagenti tra loro, aventi volumetrie comprese tra 0,02 m³ e 5 m³, si definisce "caduta massi"; diversamente se la massa rocciosa che si stacca ha un volume notevole, occorrerà fare due distinzioni: se il volume supera i 1000 m³, ed è costituito da blocchi di varia pezzatura che interagiscono tra loro comportandosi come un continuo, si parlerà di "crollo di massa"; per volumi maggiori di 10⁶ m³ si parlerà di valanga di roccia.

Questi processi possono verificarsi sia in pendii naturali che artificiali e dipendono da molteplici fattori, mutevoli nel tempo, come la geometria e le proprietà geologiche, geotecniche ed idrauliche del pendio; rappresentando un pericolo naturale significante a causa degli effetti disastrosi che si potrebbero avere su attività, infrastrutture e vite umane.

La pericolosità di un fenomeno di questo tipo è legata all'impossibilità di prevederne con esattezza l'avvenuta, per cui diventa estremamente importante definire degli interventi atti a mitigarne il rischio.

Ogni tipo di intervento è inteso non solo come arresto del fenomeno in atto ma anche come misura di prevenzione di aree geologicamente simili e che potrebbero quindi essere soggette dallo stesso tipo di instabilità.

1.1 Cenni su classificazione e descrizione dei fenomeni franosi

Una delle classificazioni delle frane più utilizzate è quella di Varnes del 1978 (Tabella 1-1). Essa si basa sul tipo di movimento e sulla natura dei materiali coinvolti, poiché il tipo di materiale è uno dei fattori più influenti sul comportamento delle frane. Le tipologie di movimento vengono suddivise in 5 gruppi principali: crolli, ribaltamenti, scivolamenti, espandimenti laterali, colate.

I materiali sono distinti in due classi: rocce e terreni; a quest'ultimi appartengono due sottoclassi generate dalle dimensioni granulometriche: terreni grossolani indicati come detriti ("debris"), con percentuale di materiale grossolano compreso tra il 20% e l'80% e terreni prevalentemente fini, indicati con il termine di terre ("earth") con materiale fine superiore all'80%.

Tabella 1–1. Classificazione sui movimenti franosi (Varnes, 1978)

		TYPE OF MATERIAL			
TYPE OF MOVEMENT		BEDROCK	ENGINEERING SOILS		
		BEDRUCK	Predoninantly coarse	Predominantly fine	
FALLS		Rock fall	Debris fall	Earth fall	
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple	
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide	
SLIDES	TRANSLATIONAL				
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread	
FLOWS		Rock flow	Debris flow	Earth flow	
		(deep creep)	(deep creep)	(deep creep)	
СО	COMPLEX Combination of two or more principal types of movement		oes of movement		

Per quanto riguarda le rocce, Varnes fornisce sei classi principali:

- Crollo (fall): distacco improvviso di porzioni di roccia, detriti o terreno coesivo da un versante molto inclinato, a causa di fratture dell'ammasso roccioso o dei piani stratigrafici;
- Ribaltamento (topple): il materiale che si distacca durante il fenomeno subisce una rotazione attorno al punto di appoggio;

- Scivolamento (slide): si ha la formazione di una superficie di scorrimento e in base alla geometria di quest'ultima si distingue lo scorrimento traslazionale da quello rotazionale;
- Espansione laterale (lateral spread): fenomeno che avviene anche nelle zone di pianura, generalmente in seguito al cedimento (causato talvolta dalla liquefazione) del terreno sottostante;
- Flusso o colata (flow): classe di dissesti in cui il materiale mobilitato presenta un comportamento affine a quello di un liquido ed è in grado di percorrere anche notevoli distanze;
- Movimento complesso: combinazione di due o più movimenti elementari nello spazio e nel tempo.

Mentre per i flussi le classi principali sono tre:

- Rock flows: casi in cui il terreno roccioso si comporta come un fluido ad alta viscosità, con movimenti estremamente lenti;
- Debris flows: molto più veloci dei precedenti e riguardano miscele di acqua con sedimenti a diversa granulometria;
- Earth flows: flussi non molto rapidi di materiale piuttosto fine e saturo.

In Figura 1-1 si espongono graficamente in modo sintetico le tipologie di movimento che rientrano nella classificazione di Tabella 1-1.

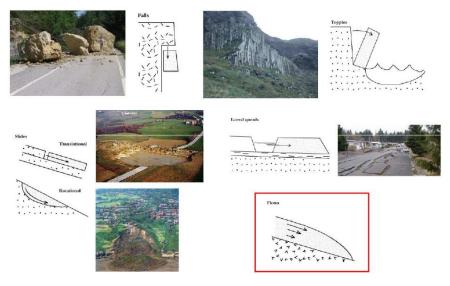


Figura 1–1. Rappresentazione dei movimenti franosi (Scavia, 2015)

Un'ulteriore classificazione può essere fatta in relazione alla velocità di movimento, esplicata in Tabella 1-2, parametro di notevole importanza per fare una prima stima in termini di probabili danni associati alle frane.

Velocity Velocity Typical Description Probable Destructive Significance (mm/sec) Extremely Catastrophe of major violence; buildings destroyed by impact of displaced material; many deaths; escape unlikely Rapid 5×10^3 5 m/sec Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape Very Rapid 5×10^1 3 m/min Escape evaluation possible; structures; possessions, and 5 Rapid equipment destroyed $\times 10^{-1}$ 1.8 m/hr Some temporary and insensitive structures can be Moderate 4 temporarily maintained 5×10^{-3} 13 m/month Remedial construction can be undertaken during movement, insensitive structures can be maintained with frequent maintenance work if total movement is not large Slow during a particular acceleration phase 5×10^{-1} 1.6 m/year 2 Very Slow Some permanent structures undamaged by movement

Tabella 1-2. Scala di velocità per movimenti franosi (Cruden e Varnes, 1996)

In questo elaborato, ci soffermeremo su materiale roccioso e tipologia di movimento definita come "rockfall" ovvero il crollo in roccia, comunemente indicato con il termine di "caduta massi".

Imperceptible without instruments; construction

POSSIBLE WITH PRECAUTIONS

1.2 Cause della caduta massi

Extremely

SLOW

 5×10^{-7}

15 mm/year

L'innesco di una frana di crollo è generalmente determinato da una rottura per taglio o per trazione lungo piani di discontinuità preesistenti, che separano un blocco potenzialmente instabile dal pendio roccioso. In funzione dell'elevata velocità con cui si manifestano, possono determinare conseguenze catastrofiche provocando il danneggiamento di infrastrutture e soprattutto minacciando l'incolumità delle vite umane. Per tale motivo risulta estremamente importante, ai fini di una corretta

pianificazione territoriale, riuscire a circoscrivere e valutare con precisione la diffusione spaziale del fenomeno.

Un crollo è tipico di pareti rocciose proprio perché esse sono caratterizzate dall'avere versante acclive, se non addirittura verticale, per cui il distacco di porzioni di materiale roccioso dal versante è controllato dai sistemi di discontinuità che costituiscono zone di debolezze che caratterizzano l'ammasso stesso. Un crollo è caratterizzato da velocità molto elevata ma soprattutto dall'imprevedibilità con cui accade. La dinamica è dettata sia dal volume della massa che si distacca che dalla geometria della massa che si è dislocata. Dipende anche dalle caratteristiche del materiale di cui è costituito il versante e con cui questo materiale entra in contatto: sostanzialmente la dinamica varia a seconda delle caratteristiche di cui è costituito sia il versante che il blocco stesso. Tipicamente la massa che si distacca non percorre grandi distanze a meno che non si trasformi in qualcosa di diverso, come una valanga di roccia, ovvero durante la propagazione non si aggiunga sempre più massa. Il fenomeno si può originare con un certo meccanismo e poi evolvere a seconda di cosa incontra durante il proprio percorso.

Tra le cause predisponenti il distacco e la successiva evoluzione del fenomeno si hanno:

- Fratturazione della parete rocciosa con presenza di numerosi elementi lapidei di varie dimensioni separati dalla compagine stabile;
- Presenza di vegetazione arborea impostata su fratture lungo le pareti rocciose,
 le cui radici allargano le fratture;
- Elevata pendenza del versante al piede della parete, che favorisce il rotolamento dei massi a valle.

Mentre si possono identificare come cause scatenanti (Figura 1-2):

- Sovrappressione idraulica nelle fessure;
- Brevi periodi asciutti alternati a precipitazioni piovose che comportano il ritiro
 e l'imbibizione dei fini;

- Allargamento delle fessure per crescita delle radici delle piante;
- Spinte del vento su vegetazione arborea e disarticolazione della roccia per rotazione delle ceppaie;
- Sollecitazioni sismiche anche di lieve entità;
- Ripetute fasi di gelo e disgelo;
- Forti escursioni termiche;
- Piogge intense;
- Fulmini;
- Incendi.

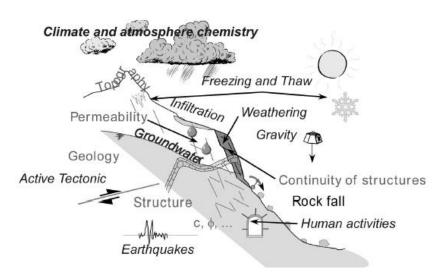


Figura 1–2. Possibili cause d'innesco di un fenomeno di rockfall (Volkvein et all, 2011)

Occorre distinguere due momenti: l'innesco del fenomeno, attraverso cui vengono definiti volume iniziale, velocità iniziale e punto di distacco, e l'evoluzione, ovvero la propagazione: dove va a finire il volume coinvolto nel distacco. La propagazione permette di definire l'area di invasione e, conseguentemente, di individuare i "bersagli".

Si ha una distinzione dei due momenti perché non esiste una metodologia che riesca a tener conto delle due cose contemporaneamente.

In questo elaborato verrà analizzata solo la fase di propagazione di un evento di caduta massi, assumendo noti volume e zona di distacco dei blocchi isolati, e si esaminerà la traiettoria successiva al distacco.

1.3 Fase di evoluzione del crollo

Ai fini di studiare la traiettoria di un blocco in caduta lungo un versante occorre conoscerne in ogni istante la posizione nello spazio e la velocità. Le fasi del moto, successive al distacco del blocco dalla nicchia, si possono dividere in:

- Traiettoria aerea (volo) al distacco e/o tra due rimbalzi successivi;
- Interazione blocco-pendio: rotolamento, scivolamento, rimbalzo, fratturazione.

1.3.1 Traiettoria aerea

Il cinematismo di un blocco in volo può essere di caduta a gittata o di caduta libera. Il primo tipo di moto avviene quando sono presenti sollecitazioni che imprimono al blocco una velocità iniziale non nulla (ghiaccio, spinta idraulica, sisma, dopo un rimbalzo, etc); il secondo avviene quando il blocco cade per gravità e quindi la componente orizzontale della velocità iniziale è nulla.

Perché nessuna azione esterna agisce sul blocco, la traiettoria si trova nel piano verticale. Una volta che il blocco arriva a contatto con un cambio di pendenza, a seconda della cinematica e condizioni geometriche, potrebbe rimbalzare, con conseguente nuova traiettoria parabolica.

Caduta a gittata

Il blocco nell'aria segue una traiettoria parabolica: le componenti verticale e orizzontale della velocità iniziale sono entrambe diverse da 0. Le condizioni iniziali sono:

- posizione iniziale: $P_0(x_0, y_0)$;
- velocità iniziale V_0 (V_{0x} , V_{0y});

All'istante generico t le coordinate saranno (Figura 1-3):

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t + x_0 \\ y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + V_{0y} \cdot t + y_0 \end{cases}$$
 (1.1)

Dove:

- g = accelerazione di gravità.

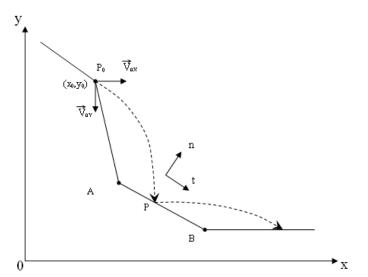


Figura 1-3. Traiettoria parabolica e rimbalzo del blocco (Giani, 1997)

Il punto in cui avviene il contatto tra il blocco ed il profilo del pendio è dato dall'intersezione tra la parabola della traiettoria e la retta passante per due punti appartenenti al profilo: A (x_1, y_1) e B (x_2, y_2) ; per valutare le coordinate x e y del punto di intersezione P (x_p, y_p) occorre risolvere il sistema:

$$\begin{cases} y = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{(x - x_0)^2}{V_{0x}^2} + V_{0y} \cdot \frac{x - x_0}{V_{0x}} + y_0 \\ \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \end{cases}$$
(1.2)

Caduta libera

Il blocco è soggetto alla sola forza di gravità. Si trascura, data la sua scarsa rilevanza, la resistenza offerta dall'aria. Questa tipologia di moto equivale ad una caduta a gittata per la quale la componente orizzontale di velocità iniziale è nulla. Le velocità raggiungibili dai massi in caduta libera varia solitamente tra 20 m/s e 40 m/s, essendo:

$$v = g \cdot t = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot t[s] \tag{1.3}$$

Dove:

- g = accelerazione di gravità;
- t = generico istante di tempo.

Generalmente, si può affermare che la velocità in caduta libera è strettamente connessa all'altezza di caduta.

1.3.2 Interazione blocco-pendio

Una volta che un blocco entra in contatto con il pendio, si verifica un urto anelastico che provoca una dissipazione di energia in funzione di:

- Peso, forma, geometria e resistenza del blocco in esame;
- Topografia del pendio;
- Natura e caratteristiche meccaniche dei materiali a contatto

Per materiali a bassa resistenza (roccia alterata, terreni, detriti, ecc.) si verifica una deformazione plastica che assomiglia a un cratere. Al contrario per materiali ad alta resistenza, come pendii rocciosi, la superficie rimarrà intatta senza nessuna traccia di impatto visibile, il che implica che si è verificata una deformazione nel regime elastico. Di seguito, solo i meccanismi per pendii rocciosi saranno considerati.

I tipi di riposta che si possono avere durante e successivamente all'interazione sono classificati come:

- Scivolamento:
- Rotolamento;
- Rototraslazione;
- Rimbalzo;
- Frantumazione del blocco;
- Arresto (affondamento per deformazione plastica della superficie).

Scivolamento

Il blocco scivola sulla superficie nella direzione di massima pendenza. La velocità angolare del blocco è nulla e la velocità di traslazione dipende dal coefficiente di attrito dinamico blocco/pendio e dall'inclinazione del piano. La velocità di traslazione durante lo scivolamento risulta superiore a quella assunta nel caso di rotolamento ma si ha una maggiore perdita di energia.

Rotolamento

Il blocco rotola ed assume un certo valore di velocità angolare e contemporaneamente si riduce la velocità di traslazione. Dal punto di vista cinetico, si può considerare come una sorta di scorrimento lungo la superficie del pendio intorno al baricentro del blocco. Paiola (1978), Bassatococco e Silvano (1985) hanno valutato i parametri che influenzano la dinamica del moto di rotolamento, utilizzando le nozioni di cinematica della rotazione di corpi rigidi, mediante la seguente espressione:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \alpha \cdot g \cdot s \cdot (tan\beta - tan\delta_{rot}) \cdot cos\beta}$$
 (1.4)

Dove:

- β = inclinazione del piano;
- δ_{rot} = angolo di attrito dinamico di rotolamento;

- s = lunghezza del segmento;
- α = fattore in funzione della forma del blocco;
- v_0 = velocità del masso calcolata come velocità normale attraverso le component orizzontale e verticale.

Rototraslazione

Il moto rototraslativo è una combinazione di rotolamento e scivolamento. Di particolare interesse è conoscere la velocità di cui è dotato un blocco soggetto ad un moto rototraslativo che percorre un rettilineo di pendio. Su base empirica risulta molto significativa la formula di Hoek (1987):

$$V = \sqrt{(V_0^2 + 2 \cdot s \cdot g \cdot K)} \tag{1.5}$$

Dove:

- V_0 = velocità iniziale di discesa;
- s = distanza percorsa;
- g = accelerazione di gravità;
- K = costante definite secondo la pendenza del versante (θ) e l'angolo di attrito del materiale a contatto (φ).

Hoek suggerisce di approssimare K con la funzione sinθ; sono comunque disponibili grafici che consentono una buona stima di tale parametro. Si osserva che nella relazione (1.4) Hoek presuppone che le dimensioni e la forma proprie del corpo in moto non influenzino le caratteristiche di rotolamento e scivolamento poiché la forma di uno stesso masso può variare durante l'azione dinamica, ovvero durante un rimbalzo, in quanto gli urti possono causare la sua rottura oppure il semplice smussamento degli spigoli; risulta pertanto difficile definire, all'interno di una modellazione del fenomeno di caduta, la forma precisa del blocco. Studi più recenti hanno invece dimostrato l'importanza degli effetti della forma del blocco sulle fasi di moto.

Rimbalzo

Il rimabalzo è ciò che avviene quando il blocco, che ancora possiede energia cinetica, impatta la superficie del versante acquisendo energia potenziale. Si tratta di una fase transitoria in cui le componenti di velocità del blocco variano, in quanto influenzate dalla pendenza locale del fronte, dalle caratteristiche del materiale e dalla forma del blocco stesso.

«I rimbalzi sono quindi eventi di carico rapido in cui gli spessori superficiali dei blocchi rocciosi vengono sottoposti a sollecitazioni alle quali rispondono in base alle proprie caratteristiche di compressibilità, in relazione alle condizioni dinamiche al contorno del contatto tra suolo e roccia. Normalmente si tratta di rimbalzi a carattere anelastico, in cui i parametri cinematici vengono determinati dalla velocità iniziale, che diventa un valore fondamentale, insieme alla localizzazione geografica del masso e all'angolo di proiezione della sua traiettoria.» (Marotto, 2014)

Occorre conoscere la velocità e la forma del blocco prima dell'impatto e dopo l'impatto e il coefficiente di restituzione, parametro che descrive la dissipazione energetica al momento dell'impatto. Questo è la parte più difficile di prevedere una traiettoria e la comprensione del fenomeno è limitata.

Frantumazione del blocco

Durante le fasi di moto può accadere che i litoidi si rompano trasformando il blocco unitario in singoli e molteplici frammenti. I frammenti compiono tragitti più brevi rispetto al percorso del blocco di partenza, per effetto della dissipazione di energia che è minore per blocchi di più piccola pezzatura.

La frantumazione avviene con maggiore facilità se il materiale è caratterizzato da molte superfici di debolezza.

1.3.3 Arresto

I parametri che influenzano l'arresto, ovvero la dissipazione di tutta l'energia cinetica del masso, sono la velocità, la dimensione e la forma del blocco di roccia che si stacca dal pendio, il tipo di suolo, la rugosità e la vegetazione del versante.

Durante la fase di moto si ha una distribuzione di frammenti di roccia, le cui energie cinetiche variano in funzione della loro dimensione; blocchi di roccia più grandi saranno in grado di possedere un maggiore quantitativo di energia rispetto blocchi più piccoli perché sentiranno meno dell'attrito dinamico che viene esercitato tra il blocco stesso e la superficie del pendio. Saranno i frammenti di dimensione minore i primi a fermarsi a causa dell'esaurimento di energia cinetica.

In generale, la fase post-impatto della traiettoria è calcolata secondo i coefficienti di restituzione (COR), che sono nel complesso valori che si presume tengano conto di tutte le caratteristiche dell'impatto e sono in grado di descrivere il cambiamento della velocità di movimento del blocco. (Giani 1992)

1.3.4 Coefficiente di restituzione

Quando un blocco impatta un pendio, le forze esterne agenti (attrito, gravità) sono trascurabili rispetto alle forze interne impulsive. Le forze impulsive, al momento dell'impatto, agiscono senza modificare la quantità di moto totale del sistema; in questa fase devono dunque valere i principi di conservazione della quantità di moto e dell'energia totale. L'urto può essere classificato come elastico oppure anelastico, a seconda che si abbia o meno la conservazione dell'energia cinetica del sistema.

Per descrivere in modo completo l'azione dinamica d'impatto e rimbalzo è stato introdotto un parametro denominato coefficiente di restituzione in grado di semplificare il problema molto complesso dell'interazione tra due corpi in collisione. La variazione della velocità dei due corpi dovuta all'urto reciproco è data da:

$$R = \frac{v_{post}}{v_{pre}} \tag{1.6}$$

Dove:

- v_{post} = velocità del blocco dopo il rimbalzo;
- v_{pre} = velocità prima dell'impatto.

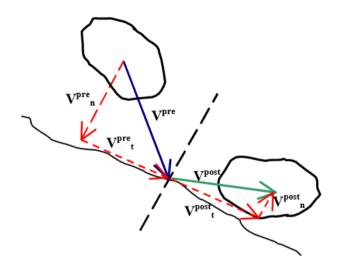


Figura 1–4. Rappresentazione schematica delle velocità pre e post-impatto (Migliazza et al,2002)

Il coefficiente di restituzione definisce dunque la perdita di energia cinetica del blocco durante la collisione con il versante.

È utile considerare due coefficienti omologhi di restituzione, R_n e R_t , rispettivamente in direzione normale e tangenziale relativamente al piano di impatto, definiti come nelle equazioni (1.7) e (1.8):

$$R_n = \frac{v_{post,n}}{v_{pre,n}} \tag{1.7}$$

$$R_t = \frac{v_{post,t}}{v_{pre,t}} \tag{1.8}$$

In assenza di indicazioni precise, si può fare riferimento a valori dei coefficienti di restituzione disponibili in letteratura (Tabelle 1-4, 1-5, 1-6) a seconda dei materiali costituenti il pendio. A tali coefficienti ne viene spesso associato un terzo (C_{rs}), definito

come coefficiente di roto-scivolamento, che esprime la perdita di energia causata dall'attrito tra il versante e il masso, nelle fasi di rotolamento/scivolamento.

Il principio fondamentale che regola la caduta dei massi è comunque quello secondo il quale ogni blocco, soggetto ad un movimento di caduta o roto-scivolamento su un pendio, rispetta, in ogni istante, la condizione di massima efficienza del moto. Di conseguenza sia le traiettorie compiute da un blocco, sia il tipo di moto assunto durante il percorso verso valle sono quelli che determinano la minor perdita di energia cinetica.

Il procedimento più corretto per studiare un evento di caduta massi è tuttavia ricorrere ad analisi a ritroso (back-analysis), ricercando i valori dei coefficienti che meglio consentono di riprodurre i fenomeni già avvenuti.

Tabella 1–3. Coefficienti di restituzione (Pfeiffer e Bowen, 1989)

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

Tabella 1-4. Coefficienti di restituzione (Richards, 1988)

Materiale	R_n	$\mathbf{R_t}$
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

Tabella 1–5. Coefficienti di restituzione (Rockscience, 2000)

Materiale	R _n	\mathbf{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

1.3.4 Effetti della forma del blocco

Blocchi di diversa forma e resistenza compiono diversi percorsi e subiscono diversi tipi di rottura. Se il tipo di roccia costituente il blocco è sufficientemente tenero, a seguito di collisioni multiple possono verificarsi le rotture degli spigoli, una sorta di smussatura; in rocce stratificate, la rottura avviene lungo i piani di scistosità, determinando dei solidi di roccia di forma tabulare i quali si muovono secondo la condizione di moto più efficiente, ossia con il piano di maggior inerzia parallelo alla sezione verticale di movimento.

Il fenomeno della rottura avviene con una notevole dispersione di energia e i frammenti generati compiono generalmente percorsi più brevi di quelli che compirebbe il blocco originario; talvolta, però, è possibile che la rottura generi dei frammenti di forma tale da disporsi in una condizione di moto più efficiente di quella del blocco originario, che compiranno perciò distanze maggiori.

La forma del blocco governa:

 La tipologia di impatto e la possibilità che avvenga frantumazione: spigolospigolo, spigolo-piano, piano-piano (blocco sferico, blocco spigoloso, blocco tabulare...); Il moto che succede all'impatto (rimbalzo, rotolamento, scivolamento, rotoscivolamento), la traiettoria e il punto di arresto;

È inoltre importante la relazione tra la forma del blocco e la scabrezza della superficie del versante. La scabrezza del terreno induce un incremento del numero e dell'altezza dei rimbalzi del blocco e riduce la sua velocità e l'energia all'impatto. Per tener conto della relazione tra dimensione del blocco e scabrezza del terreno, questa deve essere definita in un tratto di versante a cavallo del punto di impatto, per una lunghezza pari al raggio del blocco caratteristico. Essa è valutata di solito come la massima altezza dell'"ostacolo" geometrico che il blocco incontra con maggiore frequenza nel suo movimento verso valle. Come la scabrezza, anche le irregolarità del versante stesso rappresentano un "ostacolo" al moto del blocco.

In Figura 1-5 è rappresentata la variazione di forma e dimensione che può assumere un blocco durante il moto lungo il versante per effetto dell'interazione del blocco stesso con il pendio.

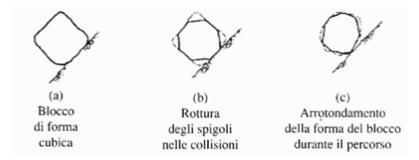


Figura 1–5. Variazione della forma del blocco in funzione della distanza percorsa (Giani, 1992)

Da esperimenti condotti su blocchi prevalentemente prismatici (Figura 1-6) è facilmente intuibile come forma e dimensioni del litoide implichino diverse condizioni di moto post-impatto. (Giani, 1992)

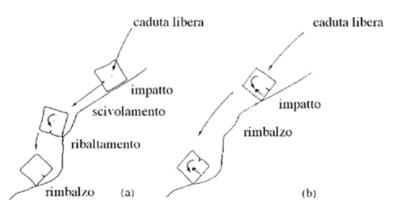


Figura 1-6. Tipologia di movimento in funzione delle condizioni d'impatto (Giani, 1992)

Dalla Figura 1-6 (a) si evince che quando il blocco impatta sulla superficie del versante con una delle facce, il moto più probabile è lo scivolamento. Il blocco continua a scivolare finché non interviene la scabrezza del pendio stesso sul cambio di pendenza che provoca un ribaltamento a cui può seguire la caduta libera. Dalla Figura 6 (b) è messo in evidenza come un impatto per mezzo dello spigolo del blocco generi un rimbalzo e un successivo rotolamento.

1.3.4 Effetti della dimensione del blocco

Nel caso in cui la superficie del pendio sia ricoperta da materiali detritici, il rapporto tra le dimensioni del detrito e quelle del blocco influenza la quantità di energia dissipata e quindi la tipologia di moto:

- Se il blocco in moto ha volume maggiore di quello dei detriti presenti sul pendio vi è una maggiore perdita di energia nell'impatto, quindi il blocco tende a rotolare;
- Se il blocco in moto ha volume minore o uguale di quello dei detriti presenti sul pendio il movimento con rimbalzi predomina su quello di rotolamento.
 Inoltre, è possibile notare una notevole dispersione delle lunghezze dei percorsi dei blocchi che si possono arrestare contro altri blocchi (Figura 1-7).

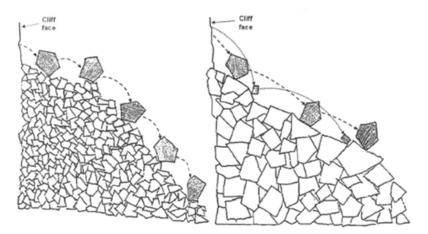


Figura 1-7. Percorso di blocchi lungo un pendio di detrito (Giani, 1992)

1.3.5 Effetto della vegetazione

Le foreste sono una protezione naturale contro la caduta massi. Gli strati che costituiscono il bosco (arboreo, arbustivo ed erbaceo) arrestano, rallentano e deviano il blocco in caduta, riducendo in ogni caso il contenuto energetico del fenomeno. Le radici arboree possono "cucire" il blocco al versante ma alberi di grosse dimensioni possono indurre l'attività di caduta massi poiché le radici possono penetrare nelle discontinuità dell'ammasso roccioso e agire come cunei. Movimenti del tronco dovuti alla neve o al vento, potrebbero essere visti come forze addizionali negative.

La foresta può svolgere due tipi di protezione:

- Protezione attiva (prevenzione: impedisce il distacco) impedendo al masso di mobilitarsi, fissando il blocco mediante il suo sistema radicale e diminuendo il potere erosivo dell'acqua intercettando la circolazione generale delle acque sulla superficie o negli strati più profondi del suolo;
- Protezione passiva (difesa: ostacola la propagazione) deviando i massi, frenando i blocchi, arrestando i blocchi.

L'interazione massi-alberi è molto complessa e dipende da molti parametri (forma e velocità di caduta dei blocchi, altezza d'impatto contro gli alberi, inclinazione del versante, scabrezza del suolo, etc). Il ruolo di protezione più rilevante è garantito dalla protezione passiva. In ogni caso, se il volume è di dimensioni ragguardevoli, il bosco

non è sufficiente a fornire una protezione, viene infatti travolto lungo la traiettoria di caduta; al contrario, per massi con una volumetria che non supera i 5 m³, gli alberi costituiscono un ostacolo al rotolamento, esercitando un effetto di rimbalzo, frenata e trattenuta naturale.

Arresto del blocco

La capacità protettiva del bosco dipende dalla dimensione del blocco in caduta (più che dalla sua forma):

- boschi con alberi a fusto alto sono in ogni caso molto adeguati a fermare i blocchi di roccia;
- per arrestare massi con piccole volumetrie è più importante la presenza di una foresta fitta piuttosto che la presenza di alberi con un tronco di grosso diametro: più alberi ci sono, più aumenta la probabilità d'impatto con essi. Alcune ricerche hanno dimostrato che una foresta molto fitta, costituita da alberi con piccolo diametro, può proteggere efficacemente dalla caduta massi, se i blocchi hanno un diametro compreso tra 0,13 m e 0,45 m;
- per arrestare blocchi con grande volume è necessario che gli alberi abbiano un diametro maggiore;
- il diametro necessario ad arrestare i massi, in ogni caso, dipende dalla specie vegetale poiché si è riscontrato che alberi a foglie larghe (decidui, quali querce, faggi, aceri etc.) resistono meglio agli impatti rispetto agli alberi di conifere (abeti, pini, larici, etc).

Rallentamento del blocco

Alcuni autori hanno appurato sperimentalmente che la velocità dei massi in caduta per crollo su un pendio alberato avente inclinazione tra 33° e 44° è circa compresa tra 15 m/s e 25 m/s, mentre le altezze di rimbalzo sono generalmente comprese tra 1 m e 2 m. L'impatto con gli alberi causa deviazioni laterali della traiettoria del crollo; di conseguenza la distanza totale percorsa dal masso, calcolata dal punto d'innesco della

frana al punto di arresto del blocco, è generalmente maggiore sui pendii vegetati e, quindi, la probabilità che una roccia impatti un albero aumenta.

Valutazione della dissipazione energetica per effetto della foresta

La dissipazione energetica che avviene all'impatto tra il singolo albero e il masso può essere dovuta a:

- rotazione e traslazione del sistema di radici;
- deformazione, oscillazione del tronco;
- penetrazioni locali del masso durante l'urto.

La valutazione dell'assorbimento energetico è stata studiata mediante sperimentazione in sito e modellazione numerica. Esistono programmi che consentono di simulare la presenza della vegetazione in modo diretto, introducendo gli alberi come ostacoli verticali. Alcuni autori hanno individuato la percentuale di riduzione della velocità del masso dovuta alla presenza di vegetazione (per esempio Dorren e Berger hanno valutato, in pendii con inclinazione 38°, una riduzione delle velocità del 26% e delle altezze medie di rimbalzo del 33%).

2. Metodi di analisi della caduta massi

L'importanza di utilizzare un modello che descriva in modo affidabile il fenomeno di instabilità è dovuto alla necessità di valutare il rischio: informazione territoriale da cui bisogna partire per una pianificazione territoriale o per interventi di tipo strutturale. Per arrivare a definire il livello di rischio sul territorio è necessario fare un'analisi di rischio:

- Analisi della pericolosità (H): valutazione della probabilità di occorrenza che un dato fenomeno potenzialmente distruttivo si possa verificare in una determinate area e in un determinato periodo di tempo (Varnes et al., 1984);
- Identificazione degli elementi a rischio (E): valutazione in termini di numero e caratteristiche di vite umane, beni architettonici, etc.;
- Analisi della vulnerabilità degli elementi a rischio (V): individuazione del livello di danno sugli elementi a rischio.

La vulnerabilità è un indice che varia tra 0 e 1 oppure tra 0% e 100%. Il 100% rappresenta la totale distruzione.

L'insieme di pericolosità, elementi a rischio e vulnerabilità forniscono il rischio.

La definizione della pericolosità costituisce una linea guida per la realizzazione delle carte di pericolosità: cartografie in cui il territorio viene zonato in classi di pericolosità distinte a seconda della probabilità di occorrenza.

La redazione di queste carte necessita di:

- Previsione tipologica: capire che tipo di frana si può verificare;
- Previsione spaziale: individuare la parte di versante potenzialmente instabile;
- Previsione temporale: quando può avvenire la frana;
- Previsione dell'evoluzione: è una previsione della distanza di propagazione;
- Previsione dell'intensità: previsione sulle dimensioni areali, volumetriche, di velocità, energia cinetica.

Per poter reperire queste informazioni di previsione occorre dunque realizzare dei modelli di analisi.

L'affidabilità di un modello è la sua capacità di descrivere correttamente le fasi del moto di un generico blocco che si stacca da un versante roccioso, la frequenza di accadimento dell'evento franoso e la sua entità. I cinematismi coinvolti all'interno dell'analisi dovranno perciò rappresentare nel modo più veritiero possibile i cinematismi reali semplici e cinematismi complessi ovvero dati dalla combinazione di più cinematismi tra loro. Questo si traduce nell'utilizzo di un modello matematico in grado di prevedere il moto di caduta e descriverne il comportamento meccanico.

La validazione del modello avviene mediante osservazioni sul campo di eventi già verificatisi e si può ritenere soddisfatta nel momento in cui la comparazione tra i risultati della simulazione numerica e la realtà avvenuta nel sito di interesse sono più prossimi tra loro.

L'osservazione in campo di eventi passati si può ritenere un catalogo bibliografico a cui fare riferimento, una sorta di banca dati che fornisce informazioni ed indicazioni circa i possibili fenomeni franosi che potrebbero avvenire in futuro. Si tratta di uno strumento molto potente per l'analisi della stabilità ma spesso non è sufficiente perché le serie storiche non si possono ritenere valide in senso assoluto, in quanto i versanti hanno diverse caratteristiche meccaniche e morfologiche. Per questa ragione l'analisi previsionale è certamente la parte più complicata e delicata; sarà necessario dunque operare un'estensione dei dati già in possesso ed affidarsi all'esperienza del progettista che si occupa dello studio in questione.

I metodi di analisi che descrivono il comportamento dinamico dei blocchi instabili si basano essenzialmente su modelli di tipo bidimensionale (2D) o tridimensionale (3D); modelli di tipo empirico e modelli di tipo cinematico (analitici e numerici), all'interno dei quali i singoli blocchi, definiti come masse o semplicemente puntiformi, si muovono lungo traiettorie. Si tratta di modelli elaborati, diversi tra loro, che tuttavia sono affetti da incertezze in quanto non è possibile prevedere con assoluta certezza dei fenomeni naturali di natura discontinua.

Vi è una difficoltà oggettiva nel ricavare informazioni sulla previsione tipologica, spaziale, temporale, dell'evoluzione e dell'intensità delle frane. È difficile identificare le cause, i fattori d'innesco e le relazioni causa-effetto ed avere dati storici continui. Il principio base per cui le aree affette da instabilità passata e presente lo saranno anche in futuro è valido solo per fattori che restano immutati nel tempo, come le caratteristiche litologiche del versante, ma non lo è per fattori di tipo ambientale, come l'uso del suolo o il clima. Ciò significa che i fattori predisponenti possono variare rapidamente.

A seconda del metodo scelto si hanno analisi empiriche, deterministiche o probabilistiche ed il fine è quello di caratterizzare i volumi coinvolti nell'evento (in termini di peso volumetrico e dimensioni), l'energia cinetica massima, la velocità massima, le traiettorie seguite dai blocchi, le altezze di caduta rispetto la geometria del versante ed i punti di arresto intesi come massime distanze percorse lungo il pendio.

La modellazione deve essere il più corretta possibile perché saranno proprio i parametri di ingresso a definire il risultato stesso della simulazione ed è proprio la scelta di questi parametri la parte più difficile dell'analisi. Una scelta erronea anche solo di uno degli elementi influenti può portare a costruire un fenomeno completamente diverso da quello che si vuole creare.

Innanzitutto il modello deve essere in grado di leggere la topografia del versante e riconoscerne le caratteristiche al fine di simulare i percorsi di caduta dei litoidi che si staccano dalla parete, il passaggio tra un cinematismo e l'altro e le fasi di urto ed impatto. La scelta che influenza questi passaggi è l'ipotesi assunta sulla forma geometrica dei volumi instabili. In letteratura troviamo blocchi il cui moto è considerato nel piano verticale ed assunti di forme geometriche:

- Puntiformi: elementi la cui massa è concentrata in un singolo punto;
- Ellissoidici: elementi la cui forma geometrica è definita dalla lunghezza di semiassi maggiore e minore;
- Sferici: elementi con semiassi di uguale lunghezza;
- Solidi di forma qualunque.

La difficoltà maggiore nella modellazione della dinamica della caduta massi risiede nella determinazione dei parametri di ingresso. Qualunque sia il metodo di simulazione adottato per le analisi, occorre individuare i parametri ai quali la modellazione è più sensibile (parametri critici). A tale scopo è sempre utile eseguire delle analisi parametriche per ognuno dei parametri di ingresso. I parametri critici così individuati saranno quelli sui quali concentrare la massima attenzione in fase di valutazione.

Esperimenti dimostrano la modellazione probabilistica risulta spesso applicabile per affrontare le incertezze legate alla modellazione della caduta massi grazie all'utilizzo di algoritmi semplificati e all'efficienza computazionale. Un modello probabilistico è capace di rappresentare la dispersione delle traiettorie causata dalle incertezze intrinseche della posizione delle celle di distacco, delle proprietà dei blocchi e del pendio e soprattutto delle condizioni iniziali del distacco. Una piccola variazione delle condizioni iniziali influenza in modo significativo la dispersione delle traiettorie dei blocchi. Un approccio probabilistico è indicato specialmente per simulare l'interazione tra i blocchi e il versante stesso. (Langping&Hengxing, 2015)

2.1 Modelli empirici

Considerano la dissipazione dell'energia rilasciata durante il moto proporzionale alla distanza percorsa. Sono anche conosciuti come modelli "zenitali" che delimitano l'area d'invasione della frana attraverso l'uso di angoli di attrito equivalente. Sono metodi semplificati e di facile utilizzo in ambiente GIS. La stima dei parametri utilizzati è affetta da notevole incertezza ed in genere è basata su serie storiche di crolli. I modelli empirici sono adatti solo per una prima stima del massimo avanzamento dei blocchi in funzione della topografia del versante (Jaboyedoff&Laboiuse, 2003, 2011) e per una prima stima semplificata delle energie coinvolte (Castelli et al.,2016).

Tra i metodi più conosciuti vi è lo "Shadow Angle" di <u>Evans&Hungr</u>, <u>1993</u>, che però si può applicare solo in caso di cono detritico alla base della parete:

«Tale metodo, impostato su parametri di ingresso facilmente reperibili (DTM), consente una valutazione preliminare su vasta scala delle aree di massimo avanzamento

dei massi considerando la dissipazione di energia proporzionale alla lunghezza del percorso, in rapporto alla differenza di quota tra il punto di distacco e di arrivo. In particolare esso si basa sul concetto del "cono d'ombra" che delimita, orizzontalmente e verticalmente, l'area entro la quale si arresta la quasi totalità dei blocchi. Il "cono d'ombra" viene essenzialmente definito dall'angolo di scansione verticale ovvero dall'angolo del segmento congiungente il punto di distacco e il punto di arresto e, nello spazio tridimensionale, dall'angolo di scansione orizzontale ovvero dall'angolo di deviazione angolare rispetto alla massima pendenza.» (Università degli Studi di

Modena e Reggio Emilia, 2012)

Tra i codici di calcolo che utilizzano un metodo empirico si citano:

- CONEFALL (Jaboyedoff&Laboiuse, 2003): basato sul metodo dei coni che permette di stimare le velocità e le energie medie e massime di blocchi nelle aree di propagazione utilizzando parametri di input quali pendenza e angolo di inclinazione medio del versante;
- *QPROTO* (QGIS Predictive Rockfall Tool) (Castelli et al., 2016): si tratta di un nuovo plugin per QGIS attraverso cui si implementa il metodo dei coni (Jaboyedoff&Laboiuse, 2003). Il metodo esegue analisi preliminari per individuare le aree maggiormente esposte ad un fenomeno massi senza ricorrere allo studio del processo fisico e solo considerando la topografia della pendenza e la taratura di alcuni parametri empirici. Consente inoltre di stimare quantitativamente le velocità e le energie cinetiche connesse al fenomeno e di valutare un rischio massi indipendente dal tempo.

2.2 Modelli cinematici

Si tratta di modelli che riescono ad analizzare la traiettoria di caduta dei blocchi attraverso le equazioni del moto (Azzoni et al., 1995, Guzzetti et al., 2002, Agliardi&Crosta, 2003, Crosta et al., 2004). Le equazioni sono in grado di definire la correlazione tra le fasi del moto, l'energia cinetica posseduta dal generico litoide e i coefficienti di restituzione caratterizzanti il pendio. I parametri di ingresso sono aleatori e di difficile stima ma, ciò nonostante, questi modelli offrono il vantaggio di

operare simulazioni di tipo probabilistico per quanto concerne traiettorie, velocità e altezze. Si basano su metodi numerici e metodi analitici.

2.2.1 Metodi numerici

Discretizzano il problema in un numero finito di punti. Si utilizzano:

- Metodo di analisi delle deformazioni dei mezzi discontinui (Discontinuous Deformation Analisys-DDA): viene usato, in fase di distacco ed in fase di evoluzione, per svolgere analisi a ritroso (back-analysis) di masse rocciose che vengono schematizzate come dei blocchi. I dati all'interno dell'analisi a ritroso riguardano sollecitazioni, deformazioni e spostamenti di un numero finito di punti dell'ammasso roccioso per ritrovare la configurazione geometrica d'equilibrio. Proprio le deformazioni e gli spostamenti sono le incognite del problema che si ricavano mediante la risoluzione di un sistema lineare di equazioni di equilibrio con la minimizzazione dell'energia complessiva;
- Metodo degli elementi distinti (Distinct Element Method-DEM): permette di ricreare durante l'analisi nuovi contatti tra elementi particellari che si staccano dall'ammasso. L'analisi può essere condotta secondo due approcci: deterministico e probabilistico. Questo metodo è valido nello studio dell'evoluzione del fenomeno d'instabilità perché permette spostamenti relativi e distacchi tra gli elementi.

2.2.2 Modelli analitici

Sono modelli che necessitano la definizione della geometria del versante e l'attribuzione dei parametri geomeccanici dei materiali costituenti i blocchi e il pendio. Le condizioni cinematiche sono definite con una descrizione matematica del fenomeno, mediante la risoluzione di equazioni attraverso cui si è in grado di dare valori puntuali di posizione e velocità dei blocchi.

Una prima distinzione basale tra i modelli analitici è il modo in cui simulano la dimensionalità del fenomeno: si distinguono in bi-dimensionali e tri-dimensionali.

Come suggeriscono gli autori <u>Castelli et al., 2016</u>, un modello tri-dimensionale sarebbe più adatto a simulare un'analisi traiettografica di caduta massi, in quanto essa avviene nello spazio e non nel piano. Ai modelli 3D devono essere legate necessariamente informazioni della superficie topografica del versante, che viene rappresentata generalmente da una mappa raster contenente le caratteristiche altimetriche del terreno (DTM). Quando si effettua la scelta di un modello a due dimensioni ci si avvale di alcune semplificazioni: la tridimensionalità dell'evento viene ridotta a due dimensioni analizzando il percorso di caduta del masso lungo una sezione verticale del pendio. La sezione deve essere scelta in modo opportuno ed è generata dall'intersezione del DTM con un piano o con una poligonale spezzata per accogliere la direzione di caduta dei blocchi.

«Nel caso si scelga di effettuare simulazioni bidimensionali, è necessario dedicare particolare attenzione alla scelta dei profili da considerare, prendendo in conto diverse sezioni in modo da ricoprire in modo uniforme il versante e analizzare tutte le possibili zone di distacco. Solo in questo modo è possibile tenere conto della variabilità delle traiettorie di caduta. Al termine delle simulazioni sarà così possibile ottenere un inviluppo spaziale dei risultati in termini di velocità, energie, distanze di arresto dei blocchi.» (Castelli et al., 2016)

Un'ulteriore distinzione può essere effettuata sulla base dell'approccio utilizzato: deterministico/parametrico o probabilistico.

Un modello deterministico non è in grado di considerare la variazione dei parametri durante l'analisi, essi rimangono fissi, se non considerando un range di valori prefissati che hanno la medesima probabilità di verificarsi.

Un modello probabilistico riesce a creare invece una distribuzione statistica dei valori del set di parametri di input. Ogni traiettoria simulata durante l'analisi avrà una certa probabilità di accadimento in funzione della distribuzione di frequenza statistica dei parametri. (Castelli et al., 2016, Barla et al., 2007)

L'ultima classificazione dei modelli analitici è fatta sul principio cinematico che segue il blocco in caduta e sulla sua forma e dimensione. Si tratta di modelli: lumped mass, rigid body, ibridi.

2.2.2.1 Metodo "lumped mass"

Il comportamento del blocco si riconduce a quello che succede al suo baricentro di massa per cui si parla di blocco puntiforme dotato di massa infinitesima. Esso possiede una determinata velocità (v) data dalla combinazione delle due componenti normale e tangenziale, mentre non viene considerata la velocità rotazionale. Come detto precedentemente, settare i parametri d'ingresso è uno dei punti cruciali dell'analisi e rappresenta una forte incertezza. A tale ragione è utile avviare analisi probabilistiche assegnando una distribuzione statistica ad ogni parametro geometrico e meccanico così da eseguire numerose analisi.

Si tratta di un'analisi semplificata di tipo energetico con costruzione rigorosa del profilo del versante. Il blocco è un punto, la velocità è costante al variare della massa, l'energia cinetica è proporzionale mentre la traiettoria del blocco non è funzione alla massa. All'inizio è solo energia potenziale e man mano che il corpo puntuale si muove, all'energia potenziale, si aggiungerà l'energia cinetica e l'energia dissipata. Dal bilancio energetico sarà possibile individuare il punto di arresto che corrisponderà al punto in cui l'energia cinetica si azzera.

Molti codici di calcolo sono basati su modelli lumped mass; tra i più noti il codice Rockfall (Hoek, 1987): esegue analisi statistiche 2D, fornendo, lungo il profilo del versante, le distribuzioni di frequenza di energia cinetica, velocità, altezze di rimbalzo e punti di arresto di blocchi in caduta. Ogni massa rocciosa è modellata come una piccola particella sferica, priva di dimensioni e dotata solo di massa, usata per il calcolo dell'energia cinetica per grafici e risultati. L'analisi particellare è eseguita tramite tre algoritmi:

 Algoritmo particellare: fa si che i parametri della simulazioni siano validi, settando le condizioni iniziali;

- Algoritmo a proiettile: calcola il movimento della particella in aria;
- Algoritmo di scivolamento: calcola il movimento della particella quando è a contatto con il pendio.

Qualunque metodo si scelga, le fasi di analisi lumped mass prevedono:

Definizione del profilo del versante

In un'analisi 2D il profilo del pendio è caratterizzato da una serie di segmenti su cui il masso eseguirà il suo percorso. La ricostruzione è generalmente estrapolata da una serie di dati storici di cui si è a conoscenza a seguito di eventi già realizzatisi, linee di massima pendenza tra due isoipse consecutive, morfologia del versante derivata da sezioni di un DTM. Tuttavia il percorso che seguono i blocchi è governato da più fattori e non solo dalla morfologia del versante; elementi come le caratteristiche meccaniche del versante stesso e del masso o il tipo di cinematismo durante il moto, etc. questo ci fa capire che sono molte le variabili in gioco. Per ovviare, in modo parziale, ad errori sulla scelta del percorso vengono analizzati più profili, le coordinate del profilo vengono inserite all'interno del software come variabili statistiche.

In un'analisi 3D invece il profilo è estratto direttamente da modelli digitali del terreno (DTM, DEM).

Individuazione della nicchia di distacco

Capire quali sono le più probabili zone di distacco, in un'analisi previsionale di pericolosità, è un altro fattore di difficile individuazione. Si ricorre, al solito, a dati storici di fenomeni passati, ad osservazioni di segni di dissesto sul pendio e di zone più aggettanti.

In un'analisi 2D la nicchia viene inserita come puntiforme o lineare all'interno del codice di calcolo mentre in un'analisi 3D viene costruito un poligono su modello digitale del terreno, in ambiente GIS. Da uno o più punti appartenenti alla nicchia viene

simulato un certo numero di traiettorie in modo parametrico o probabilistico per tenere conto dell'aleatorietà del fenomeno.

Individuazione delle dimensioni del blocco e calcolo della massa

Come avviene per la determinazione della nicchia di distacco, anche per capire quali sono le dimensioni del blocco che si stacca dalla parete, si ricorre ad aventi storici ed osservazioni del versante in modo da sfruttare l'eventuale presenza di massi al piede oppure osservare le superfici di debolezza perchè attraverso i sistemi di discontinuità è possibile individuare volumi potenzialmente instabili.

Il valore della massa è poi facilmente calcolabile mediante equazioni fisiche.

E' da sottolineare che all'interno dei codici di calcolo probabilistici ci si avvale di una distribuzione statistica della massa del blocco in quanto non è facile individuare il vero volume coinvolto che è un'altra fonte d'incertezza.

Scelta della velocità iniziale del blocco

La scelta della velocità con cui il volume si stacca, in termini si direzione e d'intensità, deve essere fatta tenendo in considerazione le cause che hanno portato all'instabilità e la tipologia di cinematismo con cui il corpo ha percorso il versante.

Nella maggior parte dei software disponibili è possibile assegnare al blocco una velocità iniziale tramite le sue componenti, orizzontale e verticale.

Scelta dei parametri di restituzione dei materiali costituenti il versante

I coefficienti di restituzione vengono tarati sulla base di valori dati in bibliografia. Solitamente i programmi in commercio implementano analisi che si basano su coefficienti di restituzione definiti come rapporto tra le velocità post e pre impatto. I valori tabellati sono molto vari e affetti da incertezza, per cui dovranno essere tarati mediante back-analysis. Ciò significa che verrà effettuata una prima ipotesi dei

coefficienti di restituzione per materiali di cui può essere costituito il versante e successivamente, mediante analisi a ritroso, saranno variati fino a raggiungere un risultato affidabile, confrontadolo con il fenomeno osservato in sito.

A fronte di queste informazioni si può affermare con certezza che il loro valore di questo parametro è influenzato da: caratteristiche meccaniche e morfologiche del pendio, moto e dimensioni del blocco dopo l'urto.

Definizione dei parametri di resistenza dei materiali costituenti il versante

I parametri di resistenza, capaci di modificare la traiettoria del blocco durante il suo moto, sono due:

- Scabrezza della superficie del pendio;
- Angolo di attrito.

La definizione della scabrezza è piuttosto difficile per cui ci si deve avvalere di valori bibliografici oppure, in via del tutto cautelativa, porla pari a zero, il che significherebbe che il blocco durante il percorso non è soggetto ad ostacoli. Mentre l'angolo di attrito varia in funziona della forma geometrica del masso scelta per l'analisi.

Scelta del numero di simulazioni

Per ottenere dei risultati affidabili occorre un numero di simulazioni elevato. La normativa UNI consiglia di effettuare un minimo di 1000 simulazioni ma, essendo un'analisi di tipo statistico, la bontà dei risultati dovrebbe essere garantita, ovvero per un numero maggiore di simulazioni i risultati non cambiano (Netti et al., 2016)

2.2.2.2 Metodo "rigid body"

La caratteristica di un modello a corpo rigido è quella di concepire il blocco di roccia instabile come dotato di forma, dimensioni e massa; parametri che vengono scelti a priori nell'analisi. La traiettoria che viene assunta è di tipo balistico, associando tutti i possibili movimenti, compresa la rotazione in aria. Durante le fasi del moto, il litoide impatta sul versante con conseguente modifica della traiettoria che aveva prima dell'urto. Questi, sono modificati a causa di differenti fattori come: forma degli angoli di contatto, angolo di rotazione nel punto di impatto, scabrezza della superficie del pendio.

Le fasi di analisi possono essere definite come segue:

Definizione del profilo del versante

Il profilo del pendio, in un modello "rigid body", è generalmente ricavato mediante l'utilizzo di un modello digitale del terreno (DTM) ovvero un file raster, ad opportuna risoluzione, contenente la ricostruzione topografica del versante.

É possibile tuttavia fare delle approssimazioni, attraverso delle correzioni della poligonale del pendio, riconducendo l'analisi tridimensionale ad una bidimensionale. Occorrerà scegliere delle sezioni trasversali (supponendo il moto avvenga in un piano) in cui possano essere contenuti i possibili percorsi compiuti dai blocchi e le variazioni delle fasi del moto dovute alla pendenza e al materiale di copertura.

Individuazione della nicchia di distacco

È difficile individuare quali siano i blocchi sorgente del crollo solo dai segni di dissesto sul territorio, per cui la nicchia di distacco deve essere individuata mediante osservazioni in campo, osservazioni di ortofoto pre e post-evento, basandosi sull'inventario frane e sullo stato di fratturazione della roccia. A queste osservazioni

si dovrà aggiungere l'esperienza del progettista ma soprattutto occorrerà procedere per tentativi.

Dal punto di vista pratico, in analisi 2D la nicchia è rappresentata come lineare mentre in analisi 3D è un poligono modellato su base del DTM.

Individuazione delle dimensioni del blocco

La forma dei blocchi sorgente è considerata invariabile durante la simulazione, all'interno dei codici di calcolo "rigid body", in entrambe le analisi (2D e 3D). Principalmente la forma può essere modellata come sferica, parallelepipeda, ellissoidica o discoidale. Le dimensioni sono poi calcolate a seguito della forma scelta e del volume coinvolto. Nel caso di back-analysis, non è così facile stimare il volume; ad esso dovrà essere associata una probabilità di accadimento. Solitamente si analizzano scenari di differente volumetria a cui si associa un tempo di ritorno.

Scelta della velocità iniziale del blocco

La velocità iniziale è assegnata facendo delle ipotesi tenendo in considerazioni le cause che hanno innescato l'evento e la tipologia del cinematismo coinvolto. Anche in questo caso, è l'esperto a valutare quale possa essere la velocità più plausibile.

Scelta dei parametri di restituzione dei materiali costituenti il versante

A differenza del "lumped mass", in questa modellazione i parametri non vengono rappresentati solo dai coefficienti di restituzione ma entrano in gioco anche i coefficienti che tengono conto della variazione che può subire la componente tangenziale della velocità a seguito degli urti blocco-pendio.

Scelta dei parametri di resistenza dei materiali costituenti il versante

La resistenza è rappresentata essenzialmente da:

- Copertura di vegetazione del versante;
- Rugosità del suolo:

Questi fattori sono in grado di influenzare i risultati delle analisi poiché entrambi sono elementi capaci di arrestare o rallentare il percorso dei blocchi.

Scelta del numero di simulazioni

Per ottenere dei risultati prossimi alla realtà occorre un numero di simulazioni elevato. Trattandosi di un'analisi di tipo statistico, la bontà dei risultati dovrebbe essere garantita, ovvero per un numero maggiore di simulazioni i risultati non cambiano. (Netti et al., 2016)

2.2.2.3 Metodo "ibrido"

Il metodo "ibrido" è una sintesi dei metodi descritti precedentemente. Il blocco viene modellato come puntiforme e solido allo stesso tempo. Si utilizza l'approccio "lumped mass" per la fase di caduta libera ma vengono presi in considerazione anche movimenti di rotazione e scivolamento, unitamente ai rimbalzi, come per il "rigid body". L'approccio "rigid body" rientra anche all'interno dell'individuazione dei parametri di restituzione e resistenza dei materiali costituenti il pendio in quanto vengono inseriti come parametri sia la rugosità della superficie che la copertura vegetale.

2.3 Risultato delle analisi di caduta massi

Per ogni simulazione effettuata i vari software restituiscono: traiettorie dei volumi coinvolti nell'instabilità, le loro distanze di arresto, gli andamenti statistici delle energie cinetiche, delle altezze di rimbalzo e delle velocità. A seconda che si utilizzi un metodo bidimensionale o tridimensionale, i risultati saranno interpretati su più sezioni del profilo o in cumulate di frequenza.

Per ogni scenario è possibile:

- Fare un'analisi di pericolosità: i risultati danno informazioni su quale è la zona coinvolta, quali siano le energie cinetiche e velocità massime e con quale probabilità i blocchi colpiscano un bersaglio;
- Progettare di barriere/ opera di difesa: conoscendo le traiettorie dei blocchi, le velocità massime, le energie cinetiche, le altezze di rimbalzo e le frequenze cumulate di tutti i parametri cinematici coinvolti (la normativa impone che il progetto delle opere di difesa sia effettuato sui valori corrispondenti al frattile del 95%).

3. Il software Rockyfor3D

Per ottenere delle simulazioni sulla traiettoria massi che risultino sufficientemente accurate è necessario in larga misura effettuare il calcolo dei rimbalzi dei massi in caduta sulle diverse parti di un pendio dove potrebbe verificarsi una frana. Con banalità, si può affermare che è maggiormente conveniente utilizzare codici di calcolo che assumono un approccio tridimensionale per il calcolo dei percorsi seguiti dai massi, al fine di ottenere dei modelli robusti di simulazione che rispecchino un livello soddisfacente di prevedibilità.

In particolare, in questo lavoro di tesi è stato utilizzato il codice di calcolo Rockyfor3D®Ecorisq. (<u>Dorren, 2014</u>)

Rockyfor3D è un modello di simulazione che calcola la traiettoria di caduta nelle tre dimensioni (3D) per i singoli blocchi rocciosi. Il modello combina algoritmi deterministici con approcci stocastici; ciò contribuisce a fare di Rockyfor3D un modello fisicamente basato, per quanto riguarda la descrizione dei processi di caduta massi, e probabilistico, in quanto i parametri dell'analisi sono determinati in maniera stocastica, facendoli variare entro un intervallo di valori plausibili.

Il software può essere usato per simulazioni di caduta di massi su scala regionale, su scala locale e di versante. È stato sviluppato in linguaggio Matlab dal 1998 e successivamente integrato sulla base di osservazioni ed esperimenti di campo e sulla base di algoritmi di calcolo. Oggi il codice del programma è scritto in C.

Per ottenere risultati attendibili, Rockyfor3D richiede dati in ingresso coerenti che rappresentino la realtà sul terreno con un grado di accuratezza confrontabile con la scala di analisi adattata all'obiettivo dello studio.

La simulazione delle traiettorie avviene, con la memorizzazione dei valori di velocità e posizione nelle tre dimensioni, attraverso un vettore. Il calcolo viene eseguito su una sequenza di cadute libere del blocco con legge parabolica di caduta libera in aria e di rimbalzi sulla superficie del versante, e quando richiesto, urti contro gli alberi (Figura

3-1). Rimbalzi a piccolo distanza tra loro rappresentano un rotolamento, mentre lo scivolamento, inteso come slittamento dei massi, non è modellato dal software.

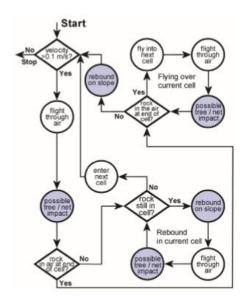


Figura 3–1. Diagramma di flusso di Rockyfor3D. I cerchi colorati in blu indicano i punti del modello in cui possono avvenire variazioni della direzione simulata di caduta del blocco. (Dorren,2014)

3.1 Dati raster di input

I dati d'input richiesti consistono in dieci mappe raster in formato ESRI ASCII Grid, di uguale dimensione e risoluzione. All'aumentare della dimensione delle celle diminuiscono precisione spaziale delle mappe risultanti e accuratezza delle dinamiche cinematiche simulate. Gli autori consigliano per tali ragioni di scegliere una risoluzione compresa tra (2x2) m e (10×10) m (Dorren & Heuvelink, 2004).

In Tabella 3-1 si riporta alla voce "dem.asc" un piccolo raster in formato ESRI ASCII Grid da prendere come esempio. L'intestazione da informazioni sul numero di righe e colonne che costituiscono il file raster (ncols e nrows), la dimensione delle celle (cellsize) o risoluzione del raster (in m), le coordinate x e y del centro (o dell'angolo in basso a sinistra) della cella in basso a sinistra (xllcenter/xllcorner e yllcenter/yllcorner) e il valore che indica l'assenza di dati (NODATA_value; di default si assegna il valore -9999). I decimali devono essere preceduti da un punto (.).

In Tabella 3-1 si descrivono le mappe richieste da Rockyfor3D:

Tabella 3–1. Elenco e descrizione dei raster richiesti da Rockyfor3D (Manuale Dorren, 2014)

Nr.	Raster	Descrizione					
1	dem.asc	mappa raster del DEM (Digital Elevation Model), che descrive la topografia (double type raster; [values 0-8850.00 m or NODATA_value]). I voli Laserscan (LiDAR) generalmente forniscono dei DEM accurati. Dal DEM, Rockyfor3D calcola una mappa delle pendenze (slope) e una mappa dell'esposizione (aspect) seguendo l'approccio proposto da Zevenbergen e Thorne (1987); si veda anche Burrough e altri (1998). Un breve esempio di file dem.asc è mostrato di seguito:					
		ncols 5					
		nrows 3					
		xllcorner 123456.123					
		xllcorner 1234567.123					
		cellsize 2.5					
		NODATA_value -9999 1115.81 1114.28 1109.25 1107.74 1105.01 1110.31 1109.35 1107.33 1103.57 -9999					
		1006.55 1005.00 999.05 -9999 -9999					
2	rockdensity.asc	mappa raster che descrive la densità dei massi in ogni cella sorgente o punto di distacco (integer type raster, 2 or 4 byte; [values 0 o 2000 - 3300 kg.m-3]). Questa mappa caratterizza le celle che corrispondono ai punti di distacco (valore > 0) attribuendo un valore di densità ai blocchi (kg m-					
		3) che saranno simulati staccarsi da ogni cella sorgente (punto di distacco). Perciò le celle raster con un valore pari a 0 non saranno considerate come delle celle sorgente. Invece dalle celle con valore maggiore di zero, per esempio 2500 o 3000, verrà simulata la caduta di un blocco con densità rispettivamente di 2500 kg m-3 o 3000 kg m-3. Per evitare effetti ai bordi, le celle sorgenti non devono essere nelle due righe o colonne più esterne del raster, poichè queste celle non vengono prese in considerazione					
3	d1.asc	mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce le dimensioni del blocco: altezza, larghezza e lunghezza in ogni cella sorgente (double type raster; [values 0 - 20.00 m]). Queste mappe raster devono contenere i valori in metri. Se il valore di dimensione definito in una delle tre celle raster equivale a 0, quella cella raster non sarà considerata come cella sorgente. Le tre dimensioni del blocco definite in ogni cella sorgente vengono variate in modo casuale e uniforme con una predefinita % (basata sulla variazione di volume definito tra) prima di ogni simulazione. Questa variazione random è identica per tutti e tre i valori di dimensione del blocco per ogni singola simulazione. Questo significa che se la variazione di volume è fissata a 5%, allora tutte e tre le dimensioni del blocco saranno incrementate o diminuite in modo casuale con un valore compreso tra 0 e 1.639%.					
4	d2.asc	mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco (vedi spiegazione d1.asc);					
5	d3.asc	mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco (vedi spiegazione d1.asc);					

6 blshape.asc

mappa raster che definisce, per ogni cella sorgente, la forma del blocco in caduta (integer type raster; [values 0-4]). La forma del blocco raster può contenere i sequenti valori:

- 0 blocco senza formal assenza di celle sorgenti definite
- blocco parallelepipedo (le tre dimensioni possono essere differenti tra loro)
- blocco ellissoidale (i tre diametri possono essere differenti tra loro)
- 3 blocco sferico (i tre diametri sono identici)
- 4 blocco discoidale (il diametro più piccolo del blocco è massimo 1/3 degli altri due, che sono comparabili in termini di grandezza)

Se non viene definita la forma del blocco in una cella sorgente (valore 0), Rockyfor3D simulerà un blocco ellissoide o sferico a seconda delle dimensioni del blocco assegnate in precedenza (d1, d2, d3, densità dei massi).

7 rg70.asc

mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce la scabrezza della superficie inclinata (double type raster; (values 0 - 100.00 m]). Questa scabrezza non rappresenta la micro topografia (per esempio salti del terreno) ma i massi situati lungo il pendio che vanno ad ostacolare la caduta del blocco. La scabrezza deve essere determinata in campo individuando zone omogenee nell'area di studio che vengono rappresentate sulla mappa come dei poligoni. Ogni poligono definisce la scabrezza della superficie, espressa come dimensione del materiale che ricopre la superficie del pendio, percepita guardando il pendio verso valle, lungo la direzione di caduta di un ipotetico masso. Tale scabrezza viene espressa in termini probabilistici da tre classi di probabilità, chiamate rg70, rg20, rg10. Queste classi descrivono la probabilità che un masso ha di incontrare un ostacolo di una certa altezza lungo il suo percorso. Ognuna di queste classi è rappresenta da una mappa raster e corrisponde all'altezza in metri di un ostacolo rappresentativo (MOH) che un masso che cade incontra nel 70%, 20% e 10% dei casi, durante un rimbalzo nel poligono definito (Figura 2).

La scabrezza varia tra 0 e 100 metri (vedasi Allegato A). Se la superficie del pendio è liscia deve essere usato un valore di scabrezza pari a 0. Il valore 100 può essere usato per forzare i blocchi simulati a fermarsi, per esempio in un fiume. La scelta del valore da attribuire al parametro MOH richiede molta attenzione, perché Rockyfor3D è sensibile a questo parametro. La scabrezza della superficie viene utilizzata per calcolare il coefficiente tangenziale di restituzione. E' quindi il parametro che determina l'energia persa durante il rimbalzo sulla superficie e non una scabrezza che viene aggiunta alla topografia rappresentata dal DEM Pertanto non comporta effetti sull'altezza del terreno o sull'angolo di pendenza locale in una cella raster.

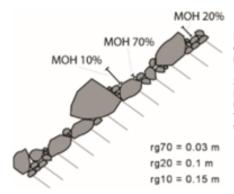


Figura Rappresentazione dell'altezza di un ostacolo (MOH) rappresentativa per il 70%, 20% e 10% della superficie senza una zona omogenea sul pendio. II parametro MOH deve essere misurato guardando il pendio verso valle, nella direzione di discesa del masso.

Durante il calcolo di ogni rimbalzo, la dimensione del materiale incontrato dal blocco che impatta è scelta in modo casuale tra le tre dimensioni, o scabrezze, delle tre classi di probabilità, data la loro probabilità di accadimento. Ogni classe di probabilità è rappresentata da un raster. Per esempio, i valori delle celle nella mappa raster rg70.asc rappresentano la dimensione che copre il 70% della superficie di queste celle. La scabrezza della superficie è un parametro importante, rilevato in campo su un apposito foglio (Tabella 1), per preparare le simulazioni per Rockyfor3D. La Figura 3 può aiutare a stimare la percentuale di superficie coperta nel campo. L'Allegato A mostra la precisione dei valori di scabrezza che devono essere utilizzati, mentre l'Allegato B presenta esempi di valori di scabrezza registrati in campo.

rg20.asc

mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 20% da un blocco in caduta (vedi spiegazione rg70.asc);

9 rg10.asc mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 10% da un blocco in caduta (vedi spiegazione rg70.asc);

10

mappa raster che definisce la tipologia del suolo (integer type raster; [values 0 - 7]). Questa mappa rappresenta l'elasticità del terreno e deve essere mappata in campo utilizzando poligoni (che rappresentano aree omogenee); successivamente deve essere convertita in una mappa raster denominata soiltype.asc, usando un Geographical Information System (GIS). Rockyfor3D prevede 8 tipi di suolo che sono elencati in Tabella 1 e 2. Nel modello questi tipi di suolo sono collegati direttamente al valore di Rn (coefficiente di restituzione normale). Per descrivere correttamente il tipo di suolo, si consiglia di scavare un piccolo buco con un martello geologico e osservare come si presenta sotto il muschio o la copertura vegetale del suolo.

soiltype.asc

Osservazione soiltype 7 (strada asfaltatal sul Fino ad ora non è disponibile alcun dato sperimentale riguardo l'energia assorbita dal manto stradale durante un impatto dinamico. Il valore di , che varia tra 0.32 e 0.39, è leggermente inferiore al valore di 0.4 assunto da Hoek et. al. (1987). Tuttavia il modello può sottostimare la perdita di energia durante gli impatti su tali strade. Se l'utente ritiene che i massi percorrano distanze troppo elevate, può utilizzare valori di 3, 2 o 1 per le strade asfaltate che assorbono più energia. Si apprezza un riscontro da parte degli utilizzatori che hanno acquisito esperienza nello sperimentare valori di soiltype per le strade asfaltate al fine di poter migliorare il modello.

La Figura 3-2 rappresenta un modo per stimare in situ la percentuale di superficie coperta da una certa scabrezza; mentre in Tabella 3-2 si evidenziano le tipologie di suolo che condisera il software e i relativi valori dei coefficienti di restituzione.

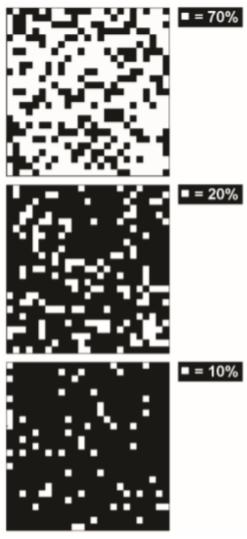


Figura 3–2. Immagine di supporto per la stima in campo della percentuale di superficie coperta da una certa scabrezza (Dorren, 2014)

Tabella 3–2. Tipi di suolo da Rockyfor3D e valori di Rn (Manuale Dorren, 2014)

Tipo di suolo	Descrizione generale del suolo	R _n valori medi	R _n intervallo di valori		
0	Fiume, o palude, o materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	0	0		
1	Materiale fine (spessore > ~100 cm)	0,23	0,21 - 0,25		
2	Materiale fine fluviale (spessore < ~100 cm) o sabbia/qhiaia mista	0,28	0,25 - 0,31		
3	Detrito di falda (Ø < ~10 cm); o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali	0,33	0,30 - 0,36		
4	Detrito di versante (Ø > ~10 cm); o suolo compatto con grandi massi	0,38	0,34 - 0,42		
5	Substrato roccioso con materiale fine di degradazione meterorica	0,43	0,39 - 0,47		
6	Substrato roccioso	0,53	0,48 - 0,58		
7	Strade asfaltate	0,35	0.32 - 0.39		

3.2 Simulazione con foresta

Rockyfor3D riesce anche ad integrare il contributo dissipativo della copertura forestale del versante mediante l'utilizzo di una delle due metodologie riportate:

1. La prima opzione è l'utilizzo di un file denominato "treefile.txt" da salvare nella directory di lavoro, che contiene le coordinate di ogni singolo albero e il diametro del tronco misurato all'altezza del petto in cm. Quando non si dispone di misure in situ sufficienti, i dati possono essere reperiti in modo rapido con l'uso di un modello di superficie normalizzata (DSM). Il file "treefile.txt" è formato da tre colonne contenenti le coordinate nel piano (x, y) di ogni singolo albero e il diametro medio del fusto ad altezza di petto, che generalmente viene misurato a 1,3 m dal suolo:

```
136578.55 2236789.45 43
136554.89 2236793.22 27
136531.39 2236801.37 34
```

Oltre il file che descrive posizione e diametro del tronco degli alberi, è necessario inserire il raster "conif_percent.asc" (integer type raster; [values 0 - 100]), contenente il valore della percentuale media di conifere all'interno di ogni cella (Figura 3-3).

- 2. In alternativa si possono creare quattro mappe raster:
 - nrtrees.asc i valori delle celle indicano il numero di alberi per ettaro
 all'interno di ogni cella (integer type raster; [valori 0 10000 ha -1]);
 - dbhmean.asc i valori delle celle indicano la DPU media all'interno di ogni cella (integer type raster; [valori 0 - 250 cm]);
 - dbhstd.asc i valori delle celle indicano la deviazione standard di DPU
 all'interno di ogni cella (integer type raster; [valori 0 250 cm]);
 - conif_percent.asc (integer type raster; [Werte 0 100 %]) i valori delle celle indicano la percentuale media di alberi di conifere all'interno di ogni cella.

Sulla base di questi quattro raster (Figura 3-3), il modello assegna all'interno di ogni cella, in modo casuale, un dato numero di alberi aventi un determinato diametro. Si tratta di una distribuzione Gamma definita dal valore medio e dalla deviazione standard in ogni cella. Tutti questi file raster devono avere la stessa dimensione del raster dem.asc e la stessa risoluzione.

«Il vantaggio della seconda opzione è che gli strati di vegetazione che sono ricoperti dagli alberi più grandi, ovvero il sottobosco, vengono rappresentati in modo migliore rispetto ai dati ottenuti tramite DSM. Dal momento che questi strati di vegetazione sono costituiti da molti alberi piuttosto piccoli, possono avere una significativa funzione di protezione che si va ad aggiungere a quella degli alberi predominanti.» (Dorren, 2014)

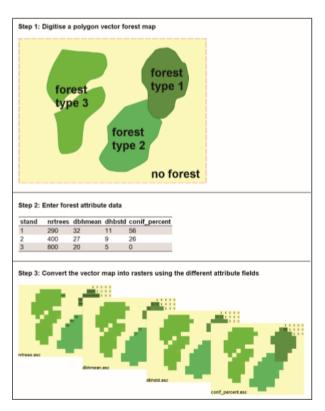


Figura 3–3. Step per la creazione delle mappe raster del bosco necessari per l'opzione 2. (Dorren, 2014

3.3 Simulazione con reti paramassi

Il software permette anche di fare delle simulazioni di caduta massi con la presenza di interventi di difesa. Si tratta di barriere paramassi ad assorbimento energetico, il cui ruolo è quello di arrestare la totalità dei massi in caduta o di rallentarne la discesa verso valle. Analisi di questo tipo, permettono di ottenere risultati, in una determinata zona, in termini probabilistici.

Per avviare una simulazione con barriera, è necessario creare tre raster ed inserirli nella directory di lavoro:

- net number.asc (integer type raster; [valori 0 999]);
- net energy.asc (integer type raster; [valori 0 20000 kJ]);
- net height.asc (integer or double type raster; [valori 0 10 m]).

Creati gli attributi net_number (identificativo della rete, adimensionale), net_energy (capacità di assorbimento dell'energia da parte della rete in kJ) e net_height (altezza della rete calcolata in metri nella direzione perpendicolare alla superficie del pendio) si procede alla loro rasterizzazione, con dimensione e risoluzione del raster dem.asc. Ogni singola linea che rappresenta una rete deve avere un unico net_number ed ogni rete creata non deve sovrapporsi ad un'altra. Non esiste limitazione per il numero di reti o di barriere di calcolo.

I risultati cinematici della simulazione con reti vengono memorizzati in corrispondenza della posizione occupata dalle reti stesse e salvati in un file denominato "Rockyfor3D v50 CalC SCR dd-mm-yy HHhMM.txt".

L'utilizzo di un valore di net_energy e net_height pari a 0, corrisponde all'utilizzo di un collettore: i valori calcolati saranno raccolti ogni volta che un masso entra o passa sopra una delle celle dove una rete è localizzata virtualmente. Per cui viene creata una raccolta efficiente dei valori calcolati nella posizione di una data rete, senza tener conto dell'effetto barriera creato da una rete nella simulazione.

I raster in output, registrati per ogni blocco che arriva nella barrier virtuale, rappresentano:

- E = energia cinetica di traslazione e di rotazione [kJ];
- Ph = altezza del passaggio calcolata nella direzione normale alla superficie del pendio [m];
- V = velocità [m/s];
- V_{rot} = velocità rotazionale [rad/s];
- Imp_a = angolo di impatto (corrisponde all'angolo tra il piano orizzontale e la traiettoria del masso all'istante in cui arriva nella rete; i valori negativi indicano un masso che sta cadendo, mentre i valori positivi indicano un masso che si allontana dalla rete, verso l'alto).

Viene inoltre memorizzato il numero totale di blocchi (n), che arriva nella rete. Il file di testo in uscita contiene i valori simulati e i valori post-processati corrispondenti al 90%, 95% e 98% del valore della funzione densità di probabilità di ogni variabile cinematica. Questi dati sono registrati per ogni barriera di calcolo (scr_nr). (<u>Dorren, 2014</u>)

3.4 Impostazioni iniziali per l'utilizzo del software

Dopo aver installato il software dal file "setup.exe", si definisce la posizione della cartella di lavoro in cui sono stati inseriti precedentemente tutti i raster di input elencati nel ¶ 3.1 e si avvia la simulazione cliccando il tasto "Run Simulation". Terminate le analisi, i risultati vengono salvati automaticamente nella directory di lavoro e a video comparirà l'ombreggiatura del DTM con sovrapposto il raster delle traiettorie individuate (Figura 3-4). Tutti i raster di output, come i raster di ingresso, potranno essere letti su un software GIS.



Figura 3-4. Interfaccia grafica di Rockyfor3D

Terminate le simulazioni, l'utente può visualizzare l'inviluppo delle energie simulate, altezza di volo e distanza percorsa dai blocchi sul profilo 2D, che può essere definite manualmente, individuando un punto di inizio e uno di fine sulla mappa e poi cliccando su "Plot". Il profilo dell'analisi verrà visualizzato in un'altra finestra. I dati mostrati nell'analisi del profilo vengono salvati nella directory di lavoro come un file ASCII txt chiamato Rockyfor3D_V5.1_CalC_SCR_dd-mm-yy.txt.

3.5 Aspetti principali del modello

Forma dei blocchi

Rockyfor3D permette di scegliere tra varie tipologie la forma del blocco di input per la simulazione: parallelepipedo, ellissoidale, sferica o discoidale. La forma è significativa per il calcolo di volume, massa e momento di inerzia del blocco massa del blocco, sulla base dei tre diametri d1, d2, d3 definiti. Per calcolare la posizione del blocco, il rimbalzo sulla superficie del pendio e l'impatto contro gli alberi, Rockyfor3D usa sempre una forma sferica di diametro pari a:

- Il più piccolo tra i tre diametri definiti se il blocco colpisce un albero;

 Un diametro maggiore, che è la media tra i due diametri maggiori, per calcolare le perdite di energia durante l'impatto con il suolo che è dato dal rapporto tra scabrezza della superficie e raggio del perimetro di impatto maggiore.

Forme più complesse ed effetti espliciti causati dalla forma del blocco sulla direzione di caduta, non sono presi in considerazione. Ciò implicherebbe un algoritmo che permetta di calcolare statisticamente un numero molto elevato di traiettorie, tenendo conto di tutti gli effetti delle forma del blocco sulla tipologia di rimbalzo che avviene in realtà. Attualmente non esiste un algoritmo che soddisfi entrambe le condizioni. Da quando gli algoritmi usati per calcolare la direzione di caduta in Rockyfor3D sono basati sulle osservazioni di campo, che comportano la presenza di forme di blocco multiple, la forma viene rappresentata implicitamente dagli algoritmi probabilistici di direzione di caduta utilizzati nella simulazione. (Dorren, 2014)

Caduta con moto parabolico

La caduta a gittata viene calcolata con un algoritmo standard per il moto parabolico uniformemente accelerato, permettendo così di determinare la posizione e la velocità all'intersezione con la topografia 3D della zona di studio. Rockyfor3D simula una traiettoria tridimensionale calcolando l'evoluzione della posizione lungo i tre assi x, y, z che rappresentano rispettivamente le direzioni: Est-Ovest, Nord-Sud e verticale. (Dorren, 2014)

Rimbalzi sulla superficie

La velocità dopo un rimbalzo sulla superficie viene calcolata attraverso dieci funzioni. Le velocità in ingresso sul piano orizzontale xy (V_{hor}) e sul piano verticale z (V_{vert}) vengono trasformate in velocità in ingresso normale V_n e in velocità in ingresso tangenziale V_t rispetto alla pendenza locale (Figura 3-5).

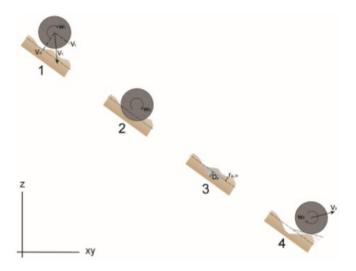


Figura 3–5. Rappresentazione dei meccanismi di rimbalzo secondo l'algoritmo di Rockyfor3D (Dorren, 2014)

La profondità di penetrazione del blocco nel punto di impatto viene calcolato sugli studi di <u>Pichler et al., 2005</u>.

I parametri di input richiesti da questo algoritmo sono:

- Coefficiente di restituzione normale: R_n;
- Diametro del blocco: d [m];
- Massa del blocco: RockMass [kg];
- Velocità di impatto del blocco: V [m/s].

Le costanti usate sono:

- k = 1,207 costante adimensionale per il calcolo della forma del blocco sferico;
- B = 1,2 costante adimensionale di compressibilità del materiale su cui avviene
 l'impatto e varia poco a seconda del materiale (<u>Pichler et al., 2005</u>).

La profondità di penetrazione (D_p) è calcolata con le [Equazioni (3.1), (3.2)]:

$$\frac{D_p}{d} = \frac{2}{\pi} \cdot N \cdot ln \left[\frac{1 + \frac{l_e}{N}}{1 + \frac{kn}{N}} \right] + k \quad per \quad \frac{D_p}{d} > k$$
 (3.1)

$$\frac{D_p}{d} = \sqrt{\frac{1 + \frac{k\pi}{4N}}{1 + \frac{l_e}{N}}} \cdot \frac{4k}{\pi} \cdot I_e \quad per \quad \frac{D_p}{d} \le k$$
 (3.2)

Dove:

-
$$I_e = momento d'inerzia calcolato come$$
: $I_e = \frac{RockMass \cdot V^2}{R_i \cdot d^3}$ (3.3)

- $R_i = resistenza$ alla penetrazione posto pari a: $R_i = 55 \cdot 10^9 \cdot R_n^7$ (3.4)

(Questa funzione fornisce valori di resistenza alla penetrazione compresi tra $1 \div 5$ MPa per materiale fine e valori compresi tra $200 \div 250$ MPa per il substrato roccioso).

$$-N = \frac{RockMass}{\rho_{soil} \cdot d^3 \cdot B \cdot 0,5} \tag{3.5}$$

$$- \rho_{soil} = densit\`{a} \ del \ terreno \ [kg \cdot m^3] \ calcolata \ come:$$

$$\rho_{soil} = 1200 \cdot \ln(R_n) + 3300 \eqno(3.6)$$

(Questa funzione fornisce valori di sensità del terreno compresi tra 1500 $kg \cdot m^3$ per materiale fine e 2500 $kg \cdot m^3$ per substrato roccioso).

Il software calcola una massima profondità di penetrazione D_p che corrisponde al raggio del blocco simulato. Conosciuto il valore di D_p , è possibile calcolare la velocità del blocco dopo il rimbalzo. Un parametro importante per il calcolo della velocità del blocco dopo il rimbalzo è il coefficiente di restituzione tangenziale R_t (Chau et al., 2002). Gli studi di Dorren et al., 2005 dimostrano che R_t dipende dalla composizione e dalla dimensione del materiale che ricopre la superficie e dal raggio del blocco stesso. Il legame del coefficiente di restituzione tangenziale con la dimensione del blocco è dovuto al fatto che blocchi di grandi dimensioni risentono meno dell'effettiva scabrezza della superficie rispetto a massi più piccoli (Kirkby M.J., Statham I., (1975), Dorren L.K.A., Seijmonsbergen A.C., (2003)), principio simile a quello sul coefficiente di variazione della pendenza usato da Pfeiffer T.J., Bowen T.D., (1989), Spang M.R., Krauter E., (2001)).

Dorren et al., 2006 hanno proposto il seguente algoritmo di calcolo per R_t:

$$R_t = \frac{1}{1 + \left\lceil \frac{MOH + D_p}{R} \right\rceil} \tag{3.7}$$

Dove:

- MOH = altezza rappresentativa dell'ostacolo sulla superficie del pendio [m];
- D_p = profondità di penetrazione [m];
- R = raggio del blocco sferico equivalente [m].

Nella pratica non è possibile misurare nel dettaglio il valore di MOH in ogni posizione di un pendio soggetto ad una caduta massi intensa. Poiché è possibile creare una mappa dei diametri medi che ricoprono la superficie, classificata secondo differenti classi di diametro, R_t dovrebbe essere derivato da tale mappa. Gli autori del codice hanno scelto di mappare tre classi di MOH, ritenute rappresentative dell'altezza media di un ostacolo che i massi incontrano durante il 70%, il 20% e il 10% dei rimbalzi. L'algoritmo di calcolo sceglie quindi la MOH sulla base delle tre classi di copertura nel poligono, in modo casuale. Perciò i valori dati dalle tre classi di probabilità (Rg70, Rg20, Rg10) rappresentano i valori che sono usati rispettivamente per i calcoli relativi al 70%, 20% e 10% dei rimbalzi. Il valore di R_t ottenuto viene utilizzato per calcolare la componente della velocità tangenziale del blocco dopo il rimbalzo V₁₂ tramite la seguente equazione in accordo con Pfeiffer T.J., Bowen T.D., (1989):

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 \cdot (I \cdot V_{rot1}^2 + RockMass \cdot V_{t1}^2) \cdot R_t}{I + RockMass \cdot R^2}}$$
(3.8)

Dove:

- V_{t1} = componente della velocità tangenziale del blocco prima del rimbalzo;
- V_{rot1} = velocità rotazionale del blocco prima del rimbalzo;
- I = momento d'inerzia relativo alla forma del blocco.

Prima di calcolare effettivamente V_{t2} , il modello varia casualmente il valore calcolato di R_t di +/-10% per rappresentare la varianza della scabrezza della superficie osservata

in natura. Lo stesso conto viene effettuato per il coefficiente di restituzione normale R_n , che è utilizzato per calcolare la componente di velocità normale dopo il rimbalzo V_{n2} , utilizzando la seguente equazione, secondo <u>Pfeiffer T.J., Bowen T.D., (1989)</u>:

$$V_{n2} = -\frac{V_{n1} \cdot R_n}{1 + \left[\frac{abs(V_{n1})}{9}\right]^2} \tag{3.9}$$

Dove:

- V_{n1} = componente della velocità normale del blocco prima del rimbalzo;
- $-\frac{abs(v_{n1})}{9}$ = fattore che tiene conto della diminuzione del coefficiente di restituzione normale all'aumentare della velocità d'impatto. Rappresenta la transizione da rimbalzi elastici con velocità normali basse a rimbalzi meno elastici dovuti all'incremento della formazione di fratture nel blocco e di depressioni nella superficie del pendio a velocità normali più alte (<u>Habib</u>, (1977)). In questo modo il modello tiene conto indirettamente degli effetti dell'angolo d'impatto sul tipo di rimbalzo (<u>Wu</u>, (1984))

La velocità rotazionale post-impatto viene calcolata con la [Equazione (3.10)]:

$$V_{rot2} = min\left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) \cdot 2}{5 \cdot R}\right]$$
(3.10)

L'angolo d'inclinazione del pendio nella posizione del rimbalzo viene diminuito in modo uniforme durante ogni rimbalzo (il valore massimo della diminuizione è 4°); mentre il rotolamento è rappresentato da una sequenza di piccoli rimbalzi ad una distanza pari a quella del raggio del blocco, con distanza minima di 0,2 m. Queste ultime due condizioni valgono solo per pendenze comprese tra 0° e 30°.

3.6 Impatto contro un albero

Dal momento che il modello utilizza soluzioni analitiche, l'esatta posizione del blocco simulato è nota in continuo. Perciò si possono calcolare sia la posizione dell'impatto sul tronco degli alberi sia la sua influenza sulla dissipazione di energia durante tale impatto. Oltre alla posizione dell'impatto sul tronco dell'albero, il modello usa il diametro dell'albero colpito, la tipologia di albero (conifera o latifoglia) e l'energia del blocco. Le posizioni e i diametri degli alberi nell'intorno del blocco simulato sono costantemente disponibili in una lista in cui sono indicate le coordinate x e y e i valori DBH. Se avviene un impatto contro un albero, il blocco dissipa una porzione di energia cinetica, secondo le funzioni visualizzate in Figura 3-4.

Secondo <u>Dorren et al., 2006</u> la massima quantità di energia cinetica EdissM che può essere assorbita e quindi dissipata da un albero è legata al tipo di albero e al diametro del tronco:

$$E_{dmiss} = FE_ratio \cdot 38,7 \cdot DBH^{2,31} \tag{3.11}$$

Dove:

- E_{dissM} = massima quantità di energia cinetica che può essere dissipata dall'albero [J];
- FE_ratio = rapporto di energia-rottura relativo alla tipologia di albero (<u>Dorren</u> et al., 2006):

FE_ratio = 0,93 per conifere;

FE ratio = 1,59 per latifoglie;

DBH = diametro del tronco misurato all'altezza del petto [cm].

Se durante l'impatto si dissipa la massima quantità di energia, questo dipende da posizione orizzontale e verticale dell'impatto sull'albero (Figura 3-6). L'effetto della posizione orizzontale (dE_{hor}) si dtermina con la [Equazione (3.12)] (<u>Dorren et al.</u>, 2006):

$$dE_{hor} = -0.046 + \frac{0.98 + 0.046}{1 + 10^{\left[0.58 - \left(\frac{P_i - CTA}{0.5 \cdot DBH}\right) \cdot (-8)\right]}}$$
(3.12)

Dove:

dE_{hor} = massima quantità di energia che può essere dissipata dall'albero,
 relativa alla posizione orizzontale dell'impatto [-];

- Pi CTA = distanza orizzontale tra la posizione dell'impatto e l'asse verticale passante per il centro dell'albero;
- DBH = diametro del tronco misurato all'altezza del petto [m].

Una volta determinata l'altezza teorica dell'albero H_{tree} (in metri):

$$H_{tree} = 1,22 \cdot DBH^{0,8} \tag{3.14}$$

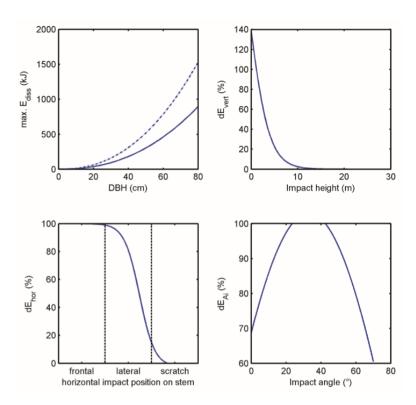


Figura 3–6. Rappresentazione delle quattro funzioni per calcolare la dissipazione di energia cinetica durante l'impatto con un albero. Per il grafico in alto a destra si è utilizzata un'altezza dell'albero di circa 13 m e una DBH di 20 cm. (Dorren, 2014)

Si procede al calcolo della percentuale della massima quantità di energia che può essere dissipata dall'albero (dE_{vert} [-], relativa alla posizione verticale dell'impatto (Zi [m]):

$$dE_{vert} = 1,62 \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{18,04 \cdot \left(\frac{Z_i}{H_{tree}}\right) + 0,02 \cdot DBH - 2,35}} - \frac{1}{1 + e^{15,69 + 0,02 \cdot DBH}}\right)$$
(3.16)

L'equazione (3.16) si basa su msure derivanti dagli studi condotti da <u>Dorren et al.</u>, <u>2006</u>, <u>Jonsson</u>, <u>2007</u> e <u>Lundström et al.</u>, <u>(2009)</u>, su un cospicuo numero di alberi presenti nell'arco alpino.

Gli studi di Jonsson (2007), mostrano che la percentuale di quantità massima di energia che può essere dissipata dall'albero [Equazione (3.18)] è funzione dell'angolo di impatto del blocco rispetto alla posizione verticale dell'albero [Equazione (3.17)]:

$$dE_{\alpha_{-imp}} = min \left[1; 1,03 \cdot sin \left(1,46 \cdot \frac{min[\alpha_{imp};70]}{180^{\circ}} \cdot \pi + 0,73 \right) \right]$$
(3.17)

L'energia dissipata dall'albero è valutata in [kJ]:

$$dE_{tree} = E_{dmiss} \cdot dE_{vert} \cdot dE_{hor} \cdot \frac{dE_{\alpha_imp}}{1000}$$
(3.18)

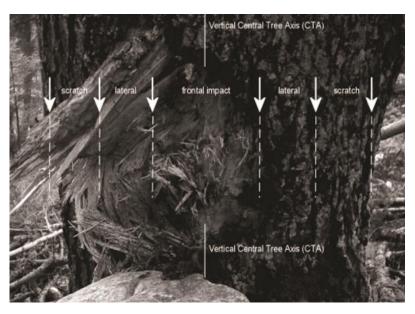


Figura 3–7. Tre tipologie principali di impatto in base alla distanza orizzontale tra centro dell'impatto e asse verticale passante per il centro dell'albero (CTA). (Manuale Dorren, 2014)

3.7 Calcolo della direzione di caduta

La direzione di caduta del blocco simulato viene determinata inizialmente dall'esposizione della cella sorgente. In seguito la direzione del blocco che cade varia a causa dei rimbalzi sul terreno o degli impatti contro gli alberi. L'angolo di deviazione

dopo un rimbalzo sulla superficie è determinato dalla topografia, dalla direzione di caduta del blocco prima del rimbalzo e dalla velocità del blocco che cade.

Durante ogni rimbalzo, il modello permette di far cambiare al blocco la direzione che aveva prima del rimbalzo nella direzione determinata dall'esposizione della cella (slope aspect) nella quale il blocco rimbalza. Essa è la direzione, guardando verso valle, corrispondente alla massima variazione del gradiente valutato tra ogni cella e le quattro celle raster più vicine (sopra, sotto, a destra e a sinistra). L'aspect rappresenta quindi la direzione di massima pendenza per ogni cella ed è calcolata con l'algoritmo proposto da Zevenbergen L.W., Thorne C.R., (1987).

A causa dello slope aspect, il blocco devia la direzione di caduta che possedeva prima di rimbalzare. L'angolo di deviazione viene determinato dalla velocità del blocco (Tabella 3-3) e da un numero casuale.

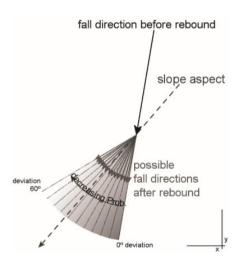


Figura 3–8. Principio dell'algoritmo di calcolo della direzione di caduta dopo un rimbalzo sulla superficie del pendio. (Dorren, 2014)

Il numero casuale definisce di quanto il blocco viene deviato rispetto alla sua direzione originale. I casi descritti in Tabella 3-3 sono legati ad una probabilità di accadimento, che è determinata dalla velocità del blocco prima del rimbalzo.

In Figura 3-8 un esempio della deviazione di direzione di caduta a seguito di un rimbalzo.

Tabella 3–3. Probabilità (in %) degli intervalli dell'angolo di deviazione del blocco dopo il rimbalzo, per tre classi di velocità usate da Rockyfor3D. (Dorren, 2014)

Angolo di deviazione	0÷5	5÷10	10÷15	15÷20	20÷25	25÷30	30÷35	35÷40	40÷45	45÷50	50÷55
V< 10 m·s ⁻¹	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
10 ≤ V < 15 m·s-1	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
V≥ 15 m·s-1	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

I valori in Tabella 3-3 sono basati sull'analisi statistica delle traiettorie dei massi caduti e le velocità osservate negli esperimenti di caduta massi presentati da <u>Dorren et al., 2006</u>. Se il blocco entra in un buco (piccola depressione del DEM), le direzioni prima e dopo il rimbalzo restano invariate.

La traiettoria del blocco, in caso di impatto con contro un albero, può essere deviata lateralmente fino a 76° rispetto alla direzione iniziale di caduta (<u>Dorren et al., (2005)</u>). Si ha una direzione entrante e uscente in un cerchio con a raggio di 5 m attorno all'albero colpito. Vicino al tronco dell'albero si può avere anche uno scostamento di 180° tra la direzione di caduta prima e dopo l'impatto. Al momento dell'impatto è la posizione del baricentro del blocco rispetto il tronco dell'albero a governare la deviazione del blocco dopo l'impatto. Per calcolare la devizione si usano tre tipi di impatto: frontale, laterale e di striscio (Figura 3-7). Le probabilità per ciascun tipo, sono combinate con un numero casuale distribuito uniformemente (Tabella 3-4).

Tabella 3–4. Probabilità (%) della deviazione di caduta dovuta all'impatto contro un albero. (Dorren, 2014)

Tipo di impatto	Probabilità [%]					
ripo di illipatto	Deviazione di 0÷22,5°	Deviazione di 22,5÷67,5°	Deviazione di 67,5÷76°			
Frontale	44	50	6			
Laterale	11	84	5			
Di striscio	72	24	4			

3.8 Files di output del modello

Per ogni istante in cui il blocco vola o rimbalza in una cella raster, i massimi delle variabili simulate in quella cella raster vengono memorizzati in diversi raster (Figura 3-9).

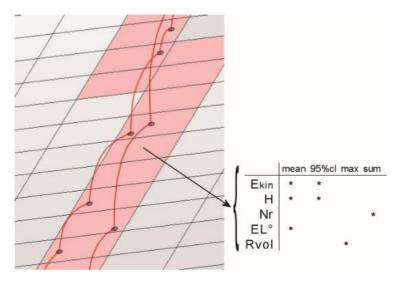


Figura 3–9. Rappresentazione del passaggio da traiettoria 3D ai dati raster di output. (Dorren, 2014)

I raster di output creati da Rockyfor3D, aventi stessa dimensione, risoluzione e formato dei raster di input, sono:

- E_mean.asc: media dei massimi valori di energia cinetica (di rotazione e di traslazione) di tutti i blocchi simulati in quella cella;
- E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc: il 50, 90, 95 e 98 percentile di energia cinetica registrati in ogni cella. L'output è in formato intero e corrisponde alle seguenti confini classe energetica: ≤3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 270, 285, 300, 500, 1.000, 1.500, 3.000, 5.000, 10.000, >10.000 [kJ];
- E_95CI.asc: intervallo di confidenza pari al 95% (CI) di tutti i massimi di energia cinetica registrati in ogni cella, dove:
 - $95\%CI = E_{mean} + 2 \cdot \sigma$ del massimo valore in una cella, assumendo una distribuzione normale 95%CL non rappresenta il 95 percentile. La deviazione standard in Rockyfor3D viene calcolata come segue:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \left[n \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2 \right]}$$
 (3.19)

- Ph_mean.asc: media della massima altezza di passaggio (misurata in metri nella direzione normale alla pendenza della superficie) di tutti i blocchi che passano attraverso la cella;
- Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc: il 50, 90, 95 e 98 percentile di altezza di passaggio registrata in ogni cella. L'output è in formato intero e corrisponde alle seguenti confini classe d'altezza: ≤0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, >20 [m];
- Ph_95.asc: di tutti i valori massimi di altezza di passaggio registrata in ogni cella, misurata in metri nella direzione normale alla pendenza della superficie.
 Può essere considerato come la massima altezza di passaggio in ogni cella;
- Nr_passages.asc: numero di blocchi passati in ogni cella;
- Nr_sourcecells.asc: numero di celle sorgenti che alimentano una data cella [-].
 In altre parole, questa mappa mostra per ogni cella, da quante celle sorgenti arrivano i blocchi in quella data cella;
- Reach_probability.asc: mappa che mostra se è probabile (valori più elevati nella mappa) o improbabile (valori più bassi nella mappa ma sempre maggiori di zero) che un masso arrivi in una data cella. In ogni cella è rappresentato in % il seguente valore: (Nr_passages*100) / (Nr_simulations_per_source_cell * Nr_sourcecells) [%];
- Nr_deposited.asc: numero di blocchi fermati in ogni cella. Questa mappa è una fonte eccellente per delineare le zone di arresto di una caduta massi su un'area di studio come base per una mappa di pericolosità;
- Rvol deposit.asc: massimo volume del blocco arrestato in ogni cella;
- EL_angles.asc: raster con gli angoli minimi sottesi dalla linea dell'energia ricalcolata per cella (in °). L'angolo della linea dell'energia (come descritto da Heim (1932); Scheidegger (1973); Toppe (1987); Gerber (1998), Jaboyedoff e Labiouse (2003)) è l'angolo di inclinazione di una linea diretta virtuale tra la posizione di arresto e la posizione di origine del blocco caduto. Questa mappa raster può essere utilizzata per comparare gli angoli EL calcolati dalle simulazioni di Rockyfor3D con i valori di angoli EL usati comunemente (27°-33° per pendii senza vegetazione e valori più alti per pendii con vegetazione);

- Traj_time.asc: tempo minimo necessario per raggiungere una cella raster dalle aree sorgenti definite [s];
- V_max.asc: velocità simulata massima in valore assoluto per cella raster [m/s].
 Questi dati devono essere usati con cautela in quanto non ci sono ulteriori informazioni sulla distribuzione statistica delle velocità del blocco; questo output è stato aggiunto su richiesta.

Se si effettua una simulazione con foresta, si ottengono anche i raster:

- Tree_impact_heights.asc: massima altezza di impatto sull'albero per cella raster [m];
- Nr tree impacts.asc: numero di impatti sull'albero per cella raster [-].

Dopo ogni simulazione viene inoltre creato il logfile "Rockyfor3D_v50_logfile_dd-mm-yyyy HHMM.txt" (Figura 3-11).

```
Rockyfor3D v5.0 - Simulations completed on Tue Jan 24 15:12:39 2012

simulation started on Tue Jan 24 15:12:33 2012

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 0
- nr. of simulations per source cell = 1
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2382
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation without forest and with nets

Overall simulated block volumes:
- min = 0.100000 m3
- mean = 0.100000 m3
- max = 0.100000 m3

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 323.900000 kj
- maximum energy value = 462.100000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated trajectories:
EL_angle[°] frequency[-] frequency[%]
24.00 1.00 0.04

List with output rasters

REMARKS
```

Figura 3–10. Esempio di logfile (Dorren, 2014)

4. Caso di studio

4.1 Inquadramento geografico

L'area oggetto di studio si trova nel comune di Perrero (TO), al centro della Val Germanasca. La Val Germanasca, conosciuta anche con il nome storico "Val San Martino", è una valle alpina, diramazione della Val Chisone, localizzata nella Provincia di Torino. Entrambe le valli devono il nome all'assetto idrografico di tutta l'ex comunità montana, governato dalla presenza di due torrenti, Chisone e Germanasca (Figuta 4-1). L'intera superficie coperta dalle valli ha un'estensione di 55.750 ettari comprendendo al suo interno 16 comuni, di cui solo 5 costituiscono la Valle Germanasca: Pomaretto, Salza di Pinerolo, Perrero, Massello e Prali.

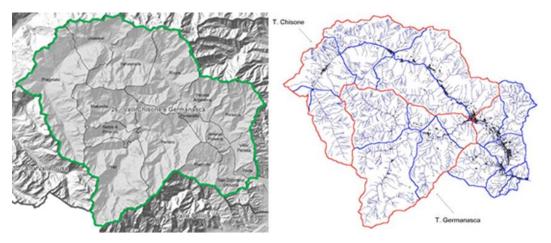


Figura 4–1. Limiti geografici dell'area forestale 26 (sinistra) e Carta del reticolo idrografico (destra) (Tresso et al., 2012)

All'interno del Piano Forestale Territoriale (PFT), le Valli Chisone e Germanasca sono identificate con l'area forestale "26", la quale è costituita per la maggior parte del territorio da settori montani ampiamente boscati caratterizzati da significative altimetrie; minori, ma non di scarsa ampiezza, i settori rurali ed adatti alla pastorizia. La morfologia dell'area è ben visibile dalle rappresentazioni di Figura 4-2 e Figura 4-3 e dai dati sulle altimetrie della Val Germanasca, nello specifico, in Tabella 4-1, dove si leggono pendenze elevate che a volte superano anche il 50%.

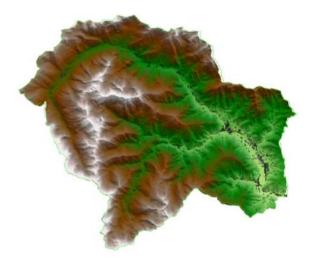


Figura 4–2. Morfologia dell'AF26 (Tresso et al., 2012)- si rappresentano in marrone aree montuose con assenza di vegetazione, in verde aree boscate.

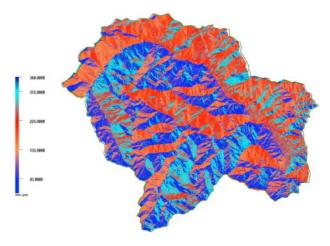


Figura 4–3. Carta delle esposizioni (Tresso et al., 2012)

La Figura 4-3 riproduce la mappa delle esposizioni da cui è evidente come l'uso del suolo è stato regolato proprio dall'esposizione e dall'acclività dei versanti: depluvi orientati a Nord e quindi "freddi", per esempio, colorati in blu, hanno favorito lo sviluppo delle aree selvatiche. In rosso sono indicate le aree esposte a Sud.

Tabella 4-1. Altimetrie e pendenze dei comuni della Val Germanasca (Tresso et al., 2012)

Comune	Area [ha]	Quota Min [m]	Quota Media [m]	Quota Max [m]	Pendenza media [%]
Massello	3839,67	1009,96	2076,98	3035,97	51
Perrero	6327,95	630,97	1532,85	2855,98	47
Pomaretto	839,76	568,83	982,71	1677,75	44
Salza di Pinerolo	1603,43	976,94	1842,66	2860,95	54
Prali	7232,58	1096,95	2105,28	3007,32	44

4.2 Inquadramento climatico

L'inquadramento climatico è stato estratto dagli studi di <u>Tresso et al., 2012</u> ne "La filiera bosco legno energia nelle Valli Chisone e Germanasca". Come viene scritto:

«Il regime climatico è di tipo prealpino, con assenza di mesi secchi, con temperature medie annue comprese tra 9 e 11°C e 4-5 mesi freddi nella Bassa Valle, dal Chisone alla confluenza con Germanasca e risalendo per ciascun ramo lungo il fondovalle. Le temperature medie annue sono comprese tra 7 e 9°C nel fondovalle interno, lungo i rami del Chisone e della Germanasca fino all'area montana (Perosa Argentina per il Chisone e Massello per la Germanasca). Nella montagna interna, le temperature medie annue sono comprese tra 4 e 7°C con 6-7 mesi freddi: in questa fascia si verificano le condizioni endalpiche (dei settori più interni del sistema montuoso alpino) tipiche delle valli circondate da rilievi molto alti e orientati in modo da fare schermo all'afflusso delle perturbazioni atlantiche. Sui rilievi alpini le temperature medie annue sono invece comprese tra 0 e 4°C con 6-9 mesi freddi.» (Tresso et al., 2012)

Tali valutazioni sono state definite attraverso la raccolta di dati giornalieri, su archivio regionale di un periodo di 7 anni, estratti dalle stazioni di Pragelato, Salbertrand, Coazze, Sauze d'Oulx, Prali, Pinerolo e Bobbio Pellice, da parte della Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione-Settore Meteoidrografico e Reti di Monitoraggio. (Tresso et al., 2012)

Il resoconto di tali informazioni è leggibile sulle carte climatiche in Figura 4-4 e Figura 4-5:

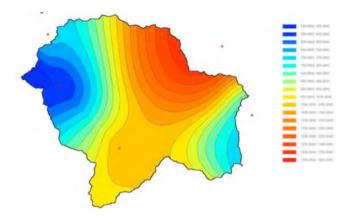


Figura 4–4. Carta delle isoiete annuali (Tresso et al., 2012)- la scala dal blu al rosso indica andamento crescente delle isoiete

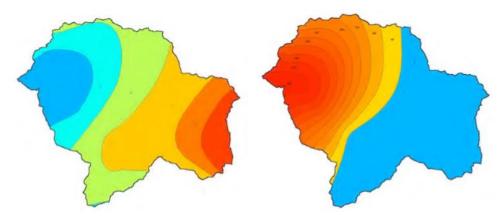


Figura 4–5. Isoterme del valore massimo delle temperature massime giornaliere (sinistra) e Isonivometriche (destra) (Tresso et al., 2012)- la scala dal blu al rosso indica andamento crescente delle isoterme e delle isonivometriche

4.3 Inquadramento geomorfologico

Come già descritto nel ¶4.1, il territorio è morfologicamente caratterizzato dalla presenza contemporanea di valli e piccole pianure alluvionali (dovute alla presenza dei torrenti Chisone e Germanasca) e dal gruppo delle Alpi Cozie; pendii fortemente acclivi dalla struttura sedimentaria. La grande varietà di litotipi presenti fa sì che il bacino idrografico sia piuttosto eterogeneo e che il territorio stesso sia interessato da un grado di erosione variabile di zona in zona.

La pianura è costituita in superficie da depositi prevalentemente continentali di origine fluviale e fluvo-glaciale, possiede una media fertilità ma è soggetta ad umidità

eccessiva ed a pericolo d'inondazione. Ai lembi delle formazioni alluvionali sono presenti depositi morenici importanti per le caratteristiche di stabilità.

Addentrandoci più nello specifico, la cittadina di Perrero è caratterizzata da lembi consecutivi di cinque ordini di superfici asimmetriche terrazzate, in roccia, rimodellate e conservate in sponda sinistra del torrente Germanasca subito dopo la confluenza con il ramo di Massello e da strette dorsali conservate nei pressi dello sbocco del Vallone di Faetto. Le superfici terrazzate sono separate da scarpate con profilo trasversale a forte pendenza o addirittura subverticale, mentre le dorsali sono da attribuire, anche se non con certezza, a depositi morenici non rimodellati dall'evoluzione dei versanti oppure alla presenza di collettori di drenaggio "incisi entro depositi fluvioglaciali e rimasti isolati sul versante e trasformati dai processi di rimodellamento in rilievi modellati in negativo." (Regione Piemonte, 2013)

Il fondovalle principale è anch'esso costituito da antiche successive superfici terrazzate di erosione. La superficie inferiore, a monte di Perrero, è caratterizzata da piccole porzioni di alvei abbandonati che potrebbero essere riattivati, almeno in parte, nel caso di eventi di cospicua portata.

4.4 Inquadramento litologico

4.4.1 Substrato

I litotipi presenti nel Comune di Perrero appartengono all'unità strutturale denominata "Massiccio Dora – Maira" (DM) e sono costituite da tre litotipi principali:

Gneiss minuti e micascisti polideformati: si tratta di litotipi caratterizzati da un'intensa laminazione e diffusa fratturazione e degradazione fisico-chimica. La struttura palesa un'immersione dei piani di scistosità verso Sud-Ovest nel settore orientale, mentre nel settore occidentale vi è una più grande dispersione di valori. I valori d'immersione variano in un range che va dai 20° ai 30° ma maggiore è la variazione man mano che dagli gneiss minuti si passa alla zona dove preponderano i micascisti;

- Micascisti grafitici: rocce di color scuro, tendente al nero, caratterizzate da un elevato grado di degradazione e fratturazione. Sono prevalenti all'estremità orientale;
- Gneiss occhiadini: litotipi con struttura massiccia ed immersione dei piani di scistosità verso Nord-Ovest con valori di inclinazione compresi tra 20°-30°.
 Sono localizzati in un lembo orientate ad Est-Ovest.

Il primo litotipo (micascisti con intercalazioni di gneiss minuti) si estende su una fascia orientata a Nord-Sud delimitata più a Ovest da calcestisti e pietre verdi. Quest'ultime sono derivati metamorfici degli ofioliti, cioè rocce ignee basiche, e conferiscono ai versanti compattezza e scarsa erodibilità.

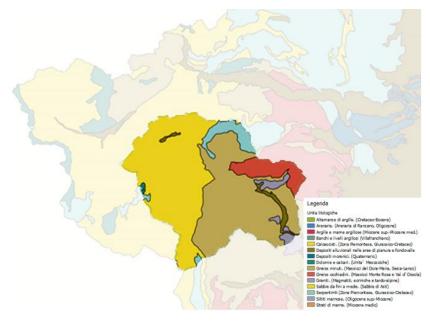


Figura 4-6. Carta litologica delle Valli Chisone e Germanasca (Regione Piemonte, 2018)

4.4.2 Copertura quaternaria

I depositi quaternari più antichi sono quelli di origine fluvo-glaciale che subaffiorano in corrispondenza di lembi di superfici terrazzate conservate allo sbocco del Vallone di Faetto. Si ritiene che essi appartengano all'età tardo pleistocenica superiore o olocenica, esaminando altri depositi glaciali detritico-colluvionli più a monte.

In generale:

- Le superfici terrazzate su cui erge l'abitato di Perrero, sono modellate da depositi alluvionali e detritici;
- Il fondovalle è costituito da depositi alluvionali mentre sulle sponde destra e sinistra della valle sono presenti depositi di conoide;
- I versanti sono costituiti per lo più da elementi detrici e colluvionali aggiungendo localmente potenze superiori a 20-30 m (a Nord di Perrero).

4.5 Descrizione e storia del sito

"Perrero dicesi derivato da pietraia quasi che un tempo il luogo non fosse che un infame ammasso di pietre...

Comunque sia, è fatto che se un tempo il paese era un ammasso di pietre, ora quelle pietre le hanno messe l'una sull'altra e ne hanno fatti e ne fanno tutti i giorni dei bei palazzi."

(Giuseppe Sallen, 1908)

Il Comune di Perrero, facente parte della provincia di Torino, è una cittadina localizzata al centro della Val Germanasca e lungo l'asse della Provinciale. Ha una popolazione di 737 abitanti e si estende per una superficie di circa 63,2 km² ad un'altitudine che parte dai 630 m s.l.m. ed arriva fino ai 2855 m s.l.m. La pendenza media del sito si aggira intorno al 47%, ed è da ritenersi quasi aggettante (Tabella 4-1).

Si pensa che il nome abbia origine dal temine dialettale "*prie*", cioè un luogo nato da una pietraia oppure dal termine piemontese "*pré*" usato in genere per indicare lo "stomaco" della valle.



Figura 4–7. Vista aerea del comune di Perrero (Google Maps, 2018)

Nei tempi passati, Perrero era un borgo, ai piedi di un austero sperone roccioso, che godeva di una grande importanza. Grazie alla posizione geografica era un crocevia commerciale, ma era anche luogo di sede della Pretura e sede amministrativa di 11 comuni, che oggi, a partire dal 1928, sono stati in larga parte conglobati; si tratta dei comuni Bovile, Chiabrano, Maniglia, Riclaretto, Faetto, S. Martino e Traverse.

Nel Medioevo la zona era difesa da alcune fortificazioni (Batteria Podurante, Batteria Monte Castello, Torre delle Banchette, Fort Louis, Bunker Ponte Rabbioso) e due castelli: il "Palaizass" ovvero il "palazzaccio", e l'altro a monte del capoluogo.

Per un periodo molto breve, durato quattro anni (1704 al 1708), portò il vanto di essere capitale della Serenissima Repubblica della Val San Martino, insieme a Pomaretto, Inverso Pinasca e Chianaviere, conosciuta anche come "Repubblica del sale", una zona immune sotto la protezione del re di Francia, che divenne il più importante centro amministrativo della valle.

Oggi, è sede del Municipio, della sola suola media della valle e del Tempio Valdese. Particolare anche dal punto di vista culturale e paesaggistico sono le miniere di talco di Maniglia e di Malzas, che in passato costituivano una delle maggiori risorse economiche.

4.6 Descrizione degli eventi franosi del Marzo 2011

La Val Germanasca è sempre stata interessata, nel corso degli anni, da molteplici eventi franosi, che colpendo le principali fonti di viabilità, hanno portato all'isolamento dei comuni. Sicuramente i movimenti lungo i versanti della valle, sono stati causati dalle grandi fratturazioni del materiale roccioso, dalla presenza di detrito ai piedi del pendio generatisi per alterazioni fisico-chimiche della roccia e dalla conseguente mancata canalizzazione delle acque. Oltre i fattori innescanti, hanno contribuito anche fattori di carattere puramente climatico come le precipitazioni prolungate e l'aumento delle temperature che, ad esempio, nel caso di zone ad elevate altitudini ed innevate nelle stagioni fredde, ha contribuito a far sciogliere il ghiaccio ed accrescere la quantità idrica dei torrenti.

Come si può vedere nei cartogrammi di Figura 4-8, derivante dal censimento sulle frane di Arpa Piemonte nel 2011, l'intero territorio comunale di Torino è interessato da una percentuale in superficie comunale franosa piuttosto variegata. Le sole Valli del Chisone e Germanasca, riportano una percentuale complessiva che arriva all'80%, mentre i comuni della Val Germanasca arrivano al 40%, un dato di notevole importanza da non sottovalutare.

Ogni frana avvenuta è censita all'interno della banca dati del SIFraP (Sistema Informativo Frane Piemonte), la quale è costantemente aggiornata grazie ai rilievi effettuati, allo studio foto-interpretativo di voli aerei relativi a diversi periodi temporali ed al recupero di dati d'archivio. Il SIFraP nasce come estensione del Progetto IFFI (Progetto Inventario Fenomeni Franosi in Italia) con lo scopo di catalogare, integrare e sviluppare un sistema in grado di fornire un quadro di riferimento scientifico-conoscitivo della Regione Piemonte. All'interno della banca dati pubblicata sul Geoportale di ARPA Piemonte è possibile reperire informazioni su: perimetro delle frane, elementi morfologici areali e lineari che caratterizzano i corpi franosi, schede descrittive di I e II livello, in modo completamente gratuito.

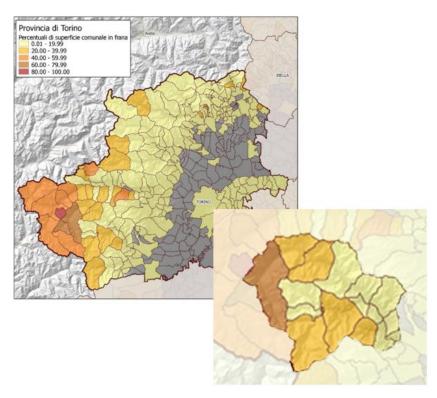


Figura 4–8. Percentuale di superficie in frana nella provincial di Torino (sinistra) e zoom nelle Valli Chisone e Germansca (destra) relative all'anno 2011 (Arpa Piemonte, 2018)

Gli eventi che verranno descritti in questa tesi, sono quelli inerenti al 16 marzo 2011 nella località di Perrero. Si tratta di ben due eventi verificati a distanza di poche ore l'uno dall'altro.

In particolare nel comune di Perrero la franosità rilevata nell'anno 2011 varia tra il 20÷40%. In Tabella 4-2 una ricerca storica di eventi franosi che hanno coinvolto Perrero, effettuata su studi precedenti (Mininno, 2013).

Tabella 4–2. Storico degli eventi franosi che hanno coinvolto il Comune di Perrero. (Mininno, 2013)

Comune	Località	Data	Descrizione
	Poimefrè	11 Novembre 1911	Frana nei pressi della frazione Poimefrè. Ostruita la
	Poimefrè	18-19 Marzo 1912	rotabile per il capoluogo. Frana in località Poimefrè. Ostruita la strada per il capoluogo, nella notte tra il 18 e il 19 Marzo 1912 il terreno ripetutamente franaa e grossi massi di pieta giunsero sulla strada.
	Perrero/Prali	21 Novembre 1958	Frana in gneiss minuti alterati e dislocati. Danni muri e sede stradale.
	Chiotti inf./Perrero- Prali	23 Ottobre 1978	Frana in sinistra del Torrente Germanasca coinvolgente la S.P. incassata artificialmente tra il torrente ed una parete di roccia più o meno competente, strapiombante e alta circa 10 m. Piani di scistosità con giaciture a franapoggio. Ostruzione sede stradale per caduta di notevole terriccio.
Perrero	Poimefrè, SP Perrero-Prali km 11+200	15 Gennaio 1996	Frana per il crollo interrompe la strada provinciale Prali-Perrero. Distacco dalla parete rocciosa di un cuneo scivolato lungo l'intersezione di due superfici di discontinuità principali. Il cuneo, crollato sul sottostante detrito ha mobilizzato parte del detrito stesso (volume tot. 10000 m3). Il materiale franato in parte si è depositato in corrispondenza della strada, in parte ha raggiunto il sottostante Torrente Germanasca. Asportato un tratto della provinciale, Prali isolata. Volume del cuneo roccioso: 5000 m3, volume complessivo della frana circa 10000 m3, la traccia principale del detrito mobilizzato ha uno sviluppo di 150x40 ed una pendenza di circa 45°.
	Ponte Raut, versante destro	Ottobre 1996	Pericolo di caduta massi con rischio di sfondamento della soletta del canale IDREG e conseguente pericolo che l'acqua del canale si riversi sulla sottostante provinciale.
	Perrero-Prali	1996	Crollo massi 10x8x8 (circa 650 m3). Parziale asportazione tratto stradale.
	Poimefrè	13-16 Ottobre 2000	Crollo di cresta rocciosa, stabilizzatosi in corrispondenza a cengia sottostante. Pericolo potenziale per l'accesso all'imbocco della miniera Luzenac. Crollo di blocchi a partire dal ciglio di una parete
	Sabbione		rocciosa sovrastante la strada provinciale, con interruzione temporanea della viabilità.
	Trosseri/Perrero- Prali		Frana coinvolge 4-5 m di terreno ed alcuni fabbricati in gneiss minuti, micascisti talora eclogitici, giacitura variabile per ripiegamenti localmente intensi e dislocazioni. Frana di tipo complesso
	Chiotti inf./Chiotti- Ponte Raut		Crollo di piccoli massi dalla parete subverticale a monte della strada provinciale, litotipo prevalente scisti grafitici.
	Indritti dei Marmi/Perrero- Prali/Ghigo	14 Giugno 1957	Franamento della falda soprastante la strada. Litotipo prevalente gneiss minuto. Presenza di massi e material alluvionale in equilibrio instabile, pensio molto ripido. Ingombro del piano viabile per 12 m, crollo di 9 m di muro di controriva alto 4,2 m, asportazione di 9 m di parapetto in muratura sul ciglio stradale a valle.
	Gianna Perrero- Prali/Ghigo		Frana. Ostruzione strada provinciale in località Indritti dei Marmi (poco a valle delle frazioni Villa di Prali).
Prali	Perrero-Prali	15 Novembre 1958	Frana proveniente dallo smottamento di terriccio mescolato a grossi massi. Litotipo prevalente gneiss minuto. Completa ostruzione della strada provinciale per 12-15 m, cediemtno del muro di controriva alto 10 m e già lesionato nel 1957.
	SP 169 Perrero- Prali, km 8.250	7-8 Novembre 1962	Interrotta la Perrero-Prali. Dopo giorni di piogge. Prali isolata da una frana. Frana che ha divelto 40 m della strada provinciale.
	SP 179 Perrero- Prali	17 Novmbre 1978	Crollo lungo la Perrero-Prali provoca una vittima. Ucciso un automobilista che transitava.

4.6.1 Evento franoso 1

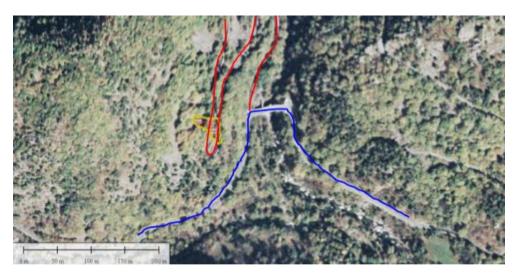


Figura 4–9. Localizzazione dell'evento franoso 1 (CNR, 2011)

Come viene riportato sui rapporti di frana redatti da <u>ARPA Piemonte, 2011</u> e <u>CNR, 2011 (Allegato A1, Allegato A2)</u>, si legge che in data 16 marzo 2011, intorno le 05:30 del mattino, nel comune di Perrero, ad altezza del Ponte Rabbioso, è avvenuto un crollo in una zona intensamente fratturata, definita da sistemi strutturali a direzione Nord-Est e Nord-Sud con sistemi di fratture a basso angolo immergenti mediamente a Nord-Ovest. La parete rocciosa, classificabile come aggettante, è localizzata in corrispondenza della confluenza tra la porzione del torrente Germanasca che percorre Perrero e quella che percorre Massello.

Durante il crollo, alcuni massi, dell'ordine di qualche metro cubo, hanno danneggiato la sede stradale, il guard-rail ed il parapetto del ponte, invadendo la S.P. 170 di Massello, immediatamente dopo il secondo tornante posto al di sopra del Ponte Rabbioso (quota 930 m s.l.m.), e danneggiandola in diversi punti per un tratto interessato di circa 100 m. I blocchi si sono distribuiti lungo tutto il versante sottostante la S.P. 169 e poi arrestati nel letto del Torrente Germanasca.

Un blocco con cinematismo "a cuneo", si è distaccato dal versante con una velocità elevata, che come indicano i rapporti di frana, ha superato i 5 m/s. Il cuneo è stato generato lungo un piano principale a medio angolo immergente verso Sud ed un

secondo piano a più alto angolo con direzione quasi parallela al versante, coinvolgendo in totale una volumetria dell'ordine di alcune migliaia di metri cubi.

Le misurazioni delle dimensioni dei blocchi di roccia che hanno costituito l'accumulo di frana, ha permesso di classificare i blocchi con dimensioni di media pezzatura di volume di circa 1-2 m³; in minoranza sono stati trovati massi con volumetria di alcune decine di metri cubi.

Al momento del sopralluogo, il tratto della S.P. 170 di Massello risultava completamente invaso dal materiale di accumulo del crollo.

La franosità della parete era già manifesta agli abitanti del capoluogo, di fatti negli anni antecedenti, erano state utilizzate delle misure di protezione come chiodature e disgaggi. Ciò non è bastato a mettere in sicurezza il versante che presentava, ancora durante il sopralluogo, diverse aree instabili, tra cui quelle in prossimità della nicchia di distacco.

Nel rapporto non viene fornita nessuna indicazione sulla forma dei blocchi.

Si riportano nelle Figure 4-10, 4-11, 4-12 e 4-13 le foto inserite nei rapporti di Arpa Piemonte e CNR:



Figura 4–10. Vista frontale del crollo (SiFraP, 2011)



Figura 4–11. Dettaglio della nicchia di distacco (SiFraP, 2011)



Figura 4–12. Vista frontale del cinematismo. In rosso la zona di distacco, in blu la S.P. 170, in giallo la S.P. 169 (CNR, 2011)



Figura 4–13. Tracce d'impatto del danneggiamento stradale in prossimità di Ponte Rabbioso (Arpa Piemonte, 2011)

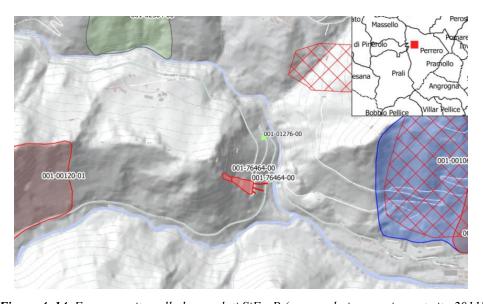


Figura 4–14. Frana censita nella banca dati SiFraP (www.webgis.arpapiemonte.it, 2011)

4.6.2 Evento franoso 2



Figura 4–15. Localizzazione indicativa del fenomeno franoso 2 (CNR, 2011)

Dai rapporti di Arpa Piemonte e CNR si legge che il secondo crollo, con distacco a cinematismo "rototraslativo", è avvenuto un paio d'ore più tardi del primo evento, intorno le 08:30 circa in prossimità della località Airassa, a monte del bivio per borgata Rivoira. Esso ha invaso completamente la S.P. 169 in un tratto in cui erano state già realizzate delle opere di protezione dalla caduta massi distruggendole ed ha coinvolto una grande porzione dell'ammasso roccioso già fortemente fratturato.

I blocchi, costituiti da materiale eterogeneo (litoidi a grossi blocchi con differenti gradi di alterazione e materiale detritico più fine derivante da depositi colluvionali che ricoprivano il substrato roccioso in corrispondenza del coronamento della frana) si sono depositati su detriti grossolani già presenti lungo il versante. Dai rilievi effettuati risulta una pezzatura media di poco inferiore al metro cubo; alcuni blocchi di volumetria dell'ordine di alcuni metri cubi ed un solo blocco con dimensioni maggiori di 50 m³. I blocchi sono definiti da tre principali sistemi di frattura immergenti a Nord-Est di 85°, a Sud-Est immergenti di 45° e a Nord-Ovest di 50°.

Al momento del sopralluogo l'accumulo si manifestava ancora fortemente instabile con blocchi in stabilità precaria.



Figura 4–16. Vista laterale di parte basale dell'accumulo (CNR, 2011)



Figura 4–17. Blocco di circa 50 m³ all'interno dell'accumulo di frana in prossimità della loalità Airassa (Arpa Piemonte, 2011)

4.6.3 Cause dei movimenti franosi

Gli eventi franosi che hanno coinvolto la Val Germanasca nel marzo 2011 hanno natura principalmente climatica. I giorni precedenti, la valle e tutto il territorio piemontese, sono stati scenario di durature precipitazioni, tali da fornire un enorme apporto idrico al Torrente Germanasca e creare così le condizioni tali di innesco delle frane.

ARPA Piemonte ha redatto un rapporto dell'evento meteopluviometrico avvenuto tra il 15 ed il 16 marzo 2011 (estratto del rapporto in <u>Allegato A3</u>) in cui è possibile

leggere accuratamente i valori delle precipitazioni dei giorni intercorsi tra il 14 e il 17 marzo 2011 che hanno accentuato gli effetti al suolo, dopo un periodo di piogge diffuse.

ARPA ha ricostruito questi effetti su analisi delle segnalazioni pervenute da diversi enti, informazioni riportate su quotidiani regionali e locali, siti web e in casi più significativi da sopralluoghi.

5. Analisi del caso studio

Il crollo in roccia, avvenuto in data 16 marzo 2011 nel comune di Perrero (citato come "evento franoso 1" nel <u>Capitolo 4</u>) è stato studiato mediante una "back analysis" della fase di caduta massi, cioè attraverso una procedura in cui i parametri, che governano la traiettoria dei massi, sono settati a ritroso.

Come descritto nel <u>Capitolo 3</u>, è stato utilizzato un codice di calcolo capace di fare un'analisi di tipo spaziale. A tale scopo sono stati introdotti modelli topografici, come il modello digitale del terreno (DTM) e modelli aereo-fotogrammetrici, da cui estrarre le informazioni tridimensionali.

Le quote altimetriche del versante sono state estratte da un DTM generato da un volo del 2010, fornito dalla Regione Piemonte, avente dimensioni di ogni cella pari a 5m x 5m. Attraverso poi uno strumento GIS open source, conosciuto con il nome di "Quantum Gis" (www.qgis.org), è stato possibile caricare, leggere e gestire le mappe concernenti le informazioni spaziali ma anche i files di input ed output di Rockyfor3D, tutti in formato ESRI ASCII Grid.

L'analisi di stabilità ha richiesto l'ausilio della seguente documentazione:

- DTM 5 m x 5 m pre-evento (2010) fornito da Regione Piemonte;
- Relazioni tecniche su Perrero fornite da ARPA Piemonte (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) e da CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche);
- Ortofoto pre-evento (2010) della Regione Piemonte;
- Ortofoto post-evento (2012) della Regione Piemonte;
- Scheda- SiFraP (Sistema informativo dei fenomeni franosi in Piemonte) fornita da ARPA Piemonte;
- Carta d'uso dei suoli "Corine Land Cover" e la Carta forestale, entrambe della Regione Piemonte.

5.1 Procedura per la definizione del pendio in ambiente GIS

Il versante è stato caratterizzato attraverso l'utilizzo del DTM, convertito mediante una funzione apposita in QGIS, da file raster (.asc) a file vettoriale di tipo puntuale, al fine di assegnare ad ogni sua cella gli attributi richiesti da RockyFor3D.

Lo step iniziale ha previsto il caricamento in ambiente GIS dell'ortofoto e del DTM 5m x 5m, risalenti al 2010 ovvero prima che si verificasse l'evento oggetto di studio. Le mappe cartografiche sono state reperite sul Geoportale della Regione Piemonte grazie al servizio WMS che permette, copiando l'apposito link nella funzione "aggiungi layer WMS" di QGIS, di connettere l'ortofoto sfruttando la connessione internet.

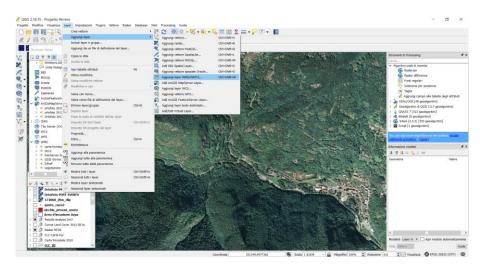


Figura 5-1. Schermata d'inserimento del layer WMS (QGIS 2.18.15)

Cliccando poi su "aggiungi raster" è stato caricato il DTM. Eseguita questa operazione è stato necessario scegliere il sistema di riferimento (WGS84 / UTM 32 N) in modo da rendere possibile la sovrapposizione coerente di DTM ed ortofoto.

Come detto in precedenza, il modello digitale del terreno è stato poi convertito da file raster a file vettoriale usando il geoalgoritmo "punti regolari" che si trova all'interno del menù "Processing". Il geoalgoritmo prevede l'inserimento del file raster d'origine,

la definizione della spaziatura tra i punti (che corrisponde alla dimensione della singola cella del DTM) e un nome da assegnare al file di destinazione.

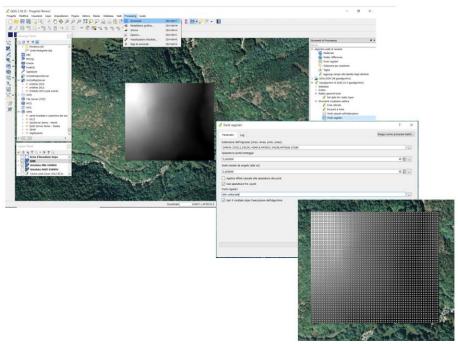


Figura 5-2. Schermate della conversione da raster a vettoriale. (QGIS 2.18.15)

Una volta trasformato il DTM si è proceduto alla creazione degli attributi per il reticolo.

5.1.1 Creazione degli attributi di caratterizzazione

Il reticolo vettoriale ottenuto dalla trasformazione possiede già degli attributi: coordinate spaziali (x,y) e quota altimetrica, ma al fine di creare le mappe raster necessarie a Rockyfor3D per l'analisi, sono state inserite ulteriori colonne, a cui sono stati poi assegnati dei valori, che hanno consentito la caratterizzazione accurata del pendio. Le colonne aggiunte sono state denominate proprio come i raster di input per l'avvio di Rockyfor3D (¶3.1):

- dem.asc;
- rockdensity.asc;
- d1.asc, d2.asc, d3.asc;

- blshape.asc;
- soiltype.asc;
- rg70.asc, rg20.asc, rg10.asc;
- nrtrees.asc;
- conif percent.asc;
- dbhmean.asc, dbstd.asc;
- net number.asc, net height.asc, net energy.asc.

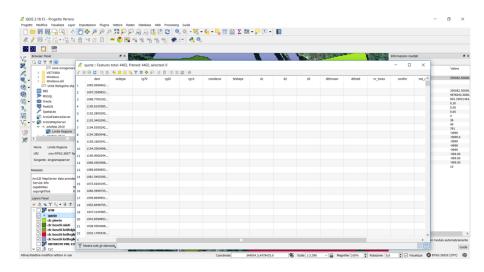


Figura 5–3. Creazione tabella attributi. (QGIS 2.18.15)

Si accede alla tabella già esistente direttamente dal reticolo vettoriale cliccando su "apri tabella attributi" e si aggiungono i nuovi attributi attraverso il comando "attiva modifiche" e successivamente "nuovo campo". Per ogni nuovo campo è stato necessario definirne la tipologia (Integer, Double, Real) e il numero di cifre intere e decimali come spiega il manuale d'uso del software. (Dorren, 2014)

5.1.2 Modalità di inserimento dati

Per la caratterizzazione del versante di particolare aiuto sono la carta d'uso del suolo "Corine Land Cover" della regione Piemonte, che in questa tesi sarà citata per semplicità con l'acronimo "CLC", e la carta forestale della Regione Piemonte. Queste sono costruite su monitoraggio e rilevamento delle caratteristiche di copertura e uso del territorio, e tengono conto delle esigenze di tutela ambientale.

Le carte sono consultabili in modo gratuito e scaricabili sottoforma di shapefile (.shp) dai siti web dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e del SIFOR (Sistema Informativo Forestale Regionale).

Il programma Corine Land Cover":

«[..] si propone la creazione di una base di dati omogenea relativa alla copertura del suolo, classificata secondo una legenda gerarchica, definita da una nomenclatura unitaria per tutti i Paesi dell'Unione Europea. La caratteristica fondamentale è l'approccio "naturalistico" allo studio del territorio. [..] il progetto fa riferimento alla copertura del suolo, piuttosto che al suo uso, in quanto è finalizzato alla tutela ed alla gestione del territorio e, pertanto tiene conto del valore della vegetazione come bioindicatore. [..] Il criterio gerarchico consente di dettagliare progressivamente le categorie sfruttando il diverso grado di risoluzione a terra delle diverse fonti di informazione. In questo modo la struttura della classificazione è in grado si assicurare elevata risoluzione nonché massima flessibilità (spaziale e temporale) e stabilità, in quanto il sistema è aperto e può essere espanso in qualsiasi punto ed in qualsiasi momento. Esso ha il vantaggio di rendere possibile l'inserimento di tutte le tipologie di copertura del suolo presenti su un territorio.» (Acosta et al., 2003)

Creata la tabella attributi si è proceduto al caricamentto di CLC e carta forestale e conseguentemente all'assegnazione quantitativa degli attributi di ogni punto.

Le zone omogenee della copertura del suolo sono state individuate attraverso il CLC, per cui selezionata una determinata area da caratterizzare si sono poi interpolate le informazioni date dalle due carte (copertura del suolo dal CLC e tipologia specifica di vegetazione dalla carta forestale) con il reticolo vettoriale puntuale, inserendo i valori per tipo di suolo, scabrezza e vegetazione.

Per selezionare la zona si usa il comando "seleziona per posizione" all'interno del menù "vettore".

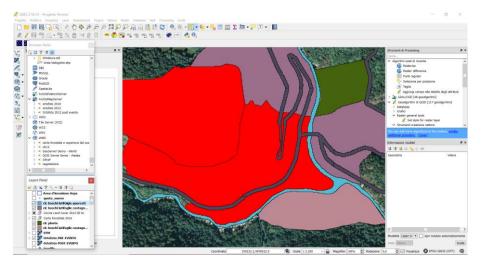


Figura 5–4. Modalità di selezione dell'area d'interesse dalla carta del Corine Land Cover Piemonte. (QGIS 2.18.15)

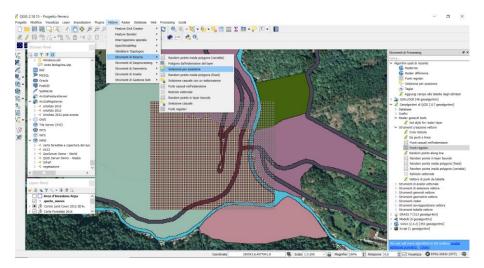


Figura 5–5. Procedura di interpolazione per l'assegnazione degli attributi. (QGIS 2.18.15)

Una volta selezionata l'area d'interesse, entrando in tabella, sono stati assegnati i valori interpolati sulla mappa. È stato attribuito il valore -9999 per tutti i punti per i quali non ci sono informazioni da inserire. Ad esempio, per le celle in cui non rientra la presenza di alberi, alla vegetazione è attribuito il valore -9999.

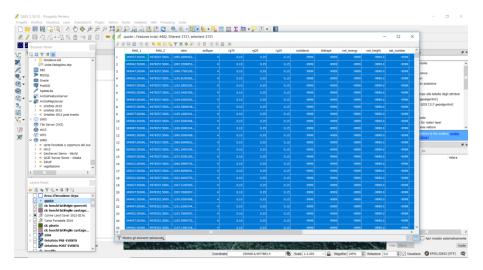


Figura 5–6. Assegnazione attributi. (QGIS 2.18.15)

La scelta dei valori da attribuire per tipo di suolo, scabrezza e copertura vegetativa è da valutare su osservazione dell'ortofoto e su dati già a disposizione, se ci sono, pervenuti tramite monitoraggio.

In Tabella 5-1 sono elencati i valori suggeriti da Rockyfor3D riguardo il tipo di suolo e le tre classi di rugosità (rg70, rg20, rg10) al variare del tipo di superficie del pendio, mentre in Tabella 5-2 è definito il codice appartenente alle categorie di suolo.

Tabella 5–1. Valori suggeriti da RockyFor3D. (Dorren, 2014)

Photo	rg70	rg20	rg10	Soiltype
	0	0	0,05	6
	0	0,05	0,1	5
	0,25	0,5	0.9	4
	0,03	0,05	0,05	3
	0,05	0,05	0,1	4

Name and the second sec		A-11-12-1	10.70.70.70	
	0,05	0,1	0,2	4
	0,03	0,03	0,03	3
	0	0	0,05	3
	0	0	0	7
	0,15	0,15	0,25	4
	0,1	0,35	0,15	4

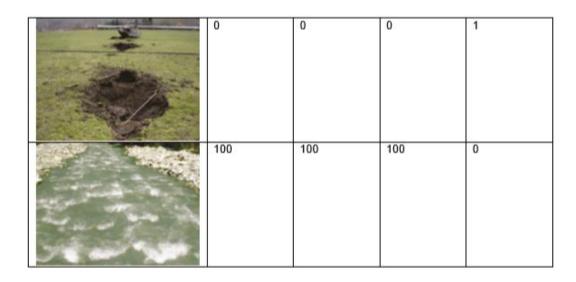


Tabella 5–2. Tipo di suolo e coefficienti di restituzione. (Dorren, 2014)

Tipo di suolo	Descrizione generale del suolo	R _n valori medi	R _n intervallo di valori
0	Fiume, o palude, o materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	0	0
1	Materiale fine (spessore > ~100 cm)	0,23	0,21 - 0,25
2	Materiale fine fluviale (spessore < ~100 cm) o sabbia/ghiaia mista	0,28	0,25 - 0,31
3	Detrito di falda (Ø < ~10 cm); o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali	0,33	0,30 - 0,36
4	Detrito di versante (Ø > ~10 cm); o suolo compatto con grandi massi	0,38	0,34 - 0,42
5	Substrato roccioso con materiale fine di degradazione meterorica	0,43	0,39 - 0,47
6	Substrato roccioso	0,53	0,48 - 0,58
7	Strade asfaltate	0,35	0.32 - 0.39

In Rockyfor3D la scabrezza della superficie viene determinata sulla base della granulometria del materiale subsuperficiale e non sulla base della micro-topografia del terreno; cioè sulle dimensioni dei massi/materiale presenti nello stato subsuperficiale, che formano la reale scabrezza e sulla presenza di ostacoli per la caduta dei massi durante un rimbalzo sulla superficie. (Dorren, 2014)

Rockyfor3D suggerisce un range di valori per i parametri rg70, rg20 e rg10, consultabili in Tabella 5-3:

Tabella 5–3. Range valori Rg. (Dorren, 2014)

Valori di scabrezza superficiale (MOH) [cm]	Valori possibili per Rg [m]				
scarezza nulla, assenza di ostacoli	0				
> 0-10	0,03; 0,05; 0,08; 0,1				
> 10-50	0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5				
> 50-100	0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1				
> 100-250	1,1; 1,2, 1,3; 1,4; 1,5; 2, 2,5				
> 250-1000	3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10				
>10000	100				

Tipo di suolo

L'attribuzione della tipologia di suolo è stata dedotta da osservazioni dell'ortofoto preevento risalente al 2010 e da informazioni reperite su GoogleMaps attraverso il database fotografico (2018). La localizzazione della foto, in relazione al versante, può essere interpretata mediante la mappa in basso a sinistra presente su ogni singola foto.



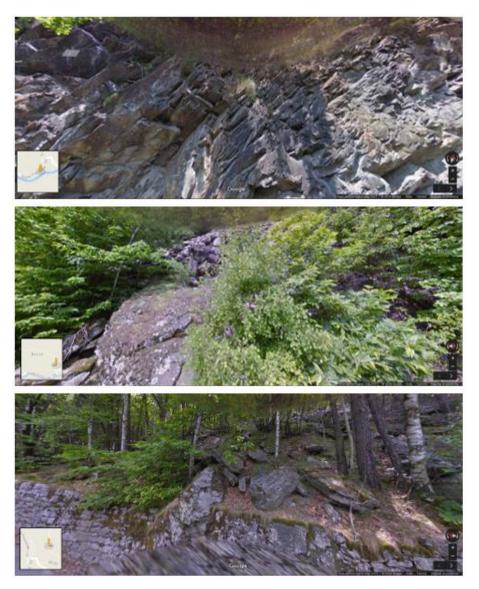


Figura 5–7. Serie di immagini per la caratterizzazione del tipo di suolo. (GoogleMaps, 2018)

Come si evince dalla serie fotografica di Figura 5-7, il suolo che ricopre il versante oggetto di studio e quello opposto, presentano ostacoli che sono per lo più blocchi di roccia di dimensioni varibili.

Caratterizzate tutte le aree del pendio si è proceduto alla creazione delle mappe raster del tipo di suolo e della rugosità.

Nella prima fase dell'analisi sono state utilizzate le situazioni di default suggerite da Rockyfor3D (Tabella 5-1) ma ciò non ha portato a risultati coerenti con l'evento franoso oggetto di studio, per cui si è ritenuto opportuno creare nuovi scenari in cui sono stati combinati i valori di tipo di suolo con diversi valori di rugosità all'interno dei range forniti nella Tabella 5-3. L'esito prodotto nel raster di output è rappresentato in Figura 5-8.

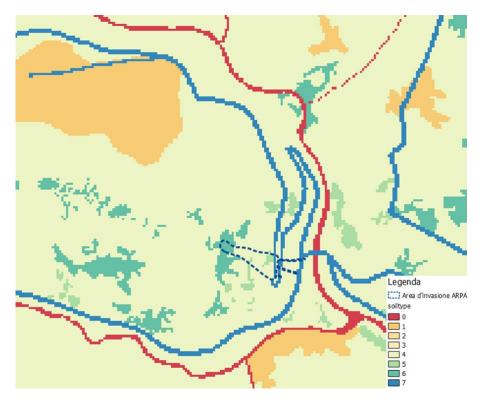


Figura 5–8. Raster di output del tipo di suolo. (QGIS 2.18.15)

Vegetazione

Per creare i raster relativi alla vegetazione è stato necessario conoscere la componente forestale in termini di numero di alberi per ettaro, dimensione media del tronco ad altezza di petto e deviazione standard delle dimensioni del tronco.

Per entrare in possesso di queste informazioni occorre individuare la tipologia arborea d'appartenenza della zona d'interesse tramite la carta di copertura ed uso del suolo e la carta forestale. Sono state individuate aree omogenee di vegetazione e poi è stato quantificato il numero di piante per ettaro utilizzando tre procedure:

 Per sottrazione di modelli digitali con il software "FINT", acronimo di "Find Individual Trees", prodotto da Ecorisq;

- Tramite misurazione della distanza tra le fila e della distanza tra i singoli alberi dei filari attraverso lo strumento "misura linea" in QGIS, in zone lontane dall'area d'invasione del crollo;
- Tramite misurazione del numero di alberi su porzioni di 1 ha in QGIS, in zone vicine l'area d'invasione del crollo.

Sono state adottate tutte e tre le metodologie in modo da aver un confronto che potesse validare i risultati ottenuti.

FINT (<u>Dorren et al., 2014</u>) è uno strumento in grado di calcolare la posizione, l'altezza e il diametro medio del tronco degli alberi tramite elaborazione di formule empiriche sulla base dati fornita dalla sottrazione del modello digitale di superficie del terreno (DSM) e del modello digitale del terreno (DTM). I modelli devono avere la stessa risoluzione e la stessa dimensione delle celle.

FINT calcola la differenza in elevazione tra i modelli digitali e da la possibilità all'utente di scegliere la quota in elevazione [Equazione (5.1)] da cui considerare alberi gli elementi trovati.

Nel caso specifico è stata scelta un'altezza H = 1 m, poichè il territorio analizzato appartiene alla categoria delle aree boschive, dunque durante l'elaborazione dei dati, il software non avrebbe potuto confondere alberi e/o arbusti con altri elementi, come ad esempio edifici. Il metodo attraverso cui lavora FINT valuta la dominanza della cella analizzata sopra le relative celle circostanti quindi restituisce i parametri relativi alla vegetazione sulla base della predominanza.

In sostanza, prima di posizionare l'albero, il software verifica che l'altezza trovata sia maggiore del massimo delle celle adiacenti, all'interno un raggio di valutazione, questo perchè, come detto precedentemente, la cella deve risultare dominante; solo allora FINT calcola il DBH.

La relazione empirica di base su cui lavora il software è la seguente:

$$DBH = H^{1,25} (5.1)$$

Dove:

- DBH = diametro medio del tronco calcolato ad altezza di petto, posta pari a
 1,3 m, e valutato in cm;
- H = altezza dell'albero [m].

Il risultato dell'elaborazione è un file treefile.txt che può essere inserito in modo speditivo su Rockyfor3D al posto delle quattro mappe raster richieste per la vegetazione.

Tuttavia, anche se il metodo è piuttosto veloce, non ha prodotto risultati affidabili.

La densità di alberi estrapolate da FINT risulta troppo lontana dalla realtà. Dalla Figura 5-9, in cui i singoli alberi posizionati dal software sono indicati con puntini gialli, si evince che la concentrazione di vegetazione presente sul territorio è di gran lunga maggiore. La motivazione di un tale squilibrio è senz'altro da attribuire al fatto che il DSM della regione Piemonte è ancora oggi troppo poco accurato nelle zone montane.



Figura 5–9. Elaborazione dei risultati prodotti da FINT. (QGIS 2.18.15)

Per questa ragione si è preferito determinare la concentrazione di vegetazione con misurazione a video su QGIS tramite ortofoto. Il numero di alberi per ettaro, in prossimità dell'area d'invasione, è stato valutato contando gli alberi presenti in aree da 1 ha di estensione in pianta, mentre il DBH medio è stato valutato attraverso una media tra i valori tabellati in letteratura (Figura 5-13, Rondelet, 1839), valori estratti

da FINT e dati che sono stati reperiti su personale rilievo (Tabella 5-4). Per i DBH degli alberi di zone in cui la presenza della vegetazione è ininfluente sul fenomeno di crollo, sono stati utilizzati invece i valori estrapolati da FINT, in quanto l'approssimazione di questo parametro in aree lontane non compromette l'analisi.

Nelle poche zone accessibili ad un rilievo manuale sono stati misurati da me stessa diametri di valore inferiore a quelli tabellati in Figura 5-13. Le aree che sono state sottoposte a rilievo sono evidenziate in modo qualitativo in Figura 5-10, mentre le misurazioni riscontrate sono riportate in Tabella 5-4. I vari dati sono stati incrociati in modo da ottenere più campioni di misure.

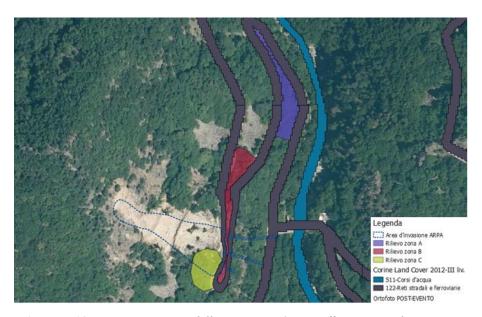


Figura 5-10. Rappresentazione delle aree in cui è stato effettuato un rilievo in sito.

Tabella 5–4. Diametri misurati in sito.

Settore		DBH [cm]						
Α	80	100	16	67	57	30	15	50
В	15	20	60	80	47	28	34	26
C	17	7	13	21	46	5	23	



Figura 5–11. Una delle misurazioni in sito.

Per mappare la concentrazione di vegetazione (numero di piante/ha), conoscendo la distanza tra i filari e tra i singoli alberi, è stata utilizzata la [Equazione (5.2)] (www.allasiaplantmg.it, Camorani, 2015).

$$n = \frac{10000}{D \cdot N} \tag{5.2}$$

Dove:

- n = numero di piante per ettaro;
- D = distanza tra le fila degli alberi [m];
- N = distanza tra i singoli alberi di ciascun filare [m];
- $-10000 [m^2] = 1 [ha].$

Dalla carta forestale, aggiornata al 2016, risultano presenti le seguenti specie arboree:

- Querceti di rovere a Teucrium scorodonia var. pino silvestre;
- Castagneti mesoneutrofili a Salvia glutinosa var. latifoglie miste;
- Castagneti mesoneutrofili a Salvia glutinosa var. rovere e/o roverella;

Pineta mesalpica acidofila di pino silvestre.

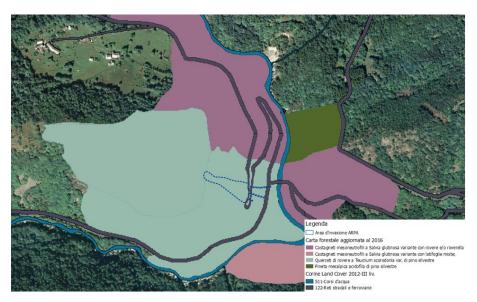


Figura 5–12. Tipo di vegetazione da Carta Forestale Regione Piemonte. (QGIS 2.18.15)

Dalle immagini fatte su rilievo personale e collezionate in Figura 5-13, si riscontra anche la presenza di betulle nella zona che la carta forestale individua come "Castagneti mesoneutrofili a Salvia glutinosa var. rovere e/o roverella".



Figura 5–13. Vegetazione presente attorno al versante su personale rilievo fotografico.

TAVOLA delle altezze medie alle	quali possono	elevarsi alcune specie di albi	eri , quella
del loro tronco, il peso specifico	del legno d'	ognuno e quello di un piede	cubico.

NOME DEGLI ALBERI	ALTEZZA MEDIA				DIAMETRI		PE	
	DEGLI ALBERT		DEI TRONCHI		TRONCHI		PESO	d'un piede cu-
	In metri	In piedi	In metri	In piedi	In centim.	la pollici	SPECIFICO	bico in libbre
Albicocco	9	27	4	12	27	10	780	55 1/4
cacia a tre spine o Gledistia.	12	36	6	18	49	18	6:6	47 1/3
oto comune	24	72 60	13	59	72 60	26	879	61 1/2
Allier	20	60	12	36		22	739	51 3/4
Amandorlo	12	36	6	21	36	14	1102	77 174
Albero di Giudea	10	30		18	32	12	686	
egno di Santa Lucia	25	25	14	42	75	28	655 865	60 172
Setulla comune	9 27	27 81	15	15 45	87	30	702	
Setulla bianca a visciole	24	72	13	39	72	26	570	49 1/4
Sosso di Maone		27	5	15	27	10	919	64 1/5
atalpa	9	42	8	24	42	16	467	52 2/3
edro del Libano	30	QO	16	48	100	37	603	42 174
arpino comune	18	54	10	30	54	20	760	53 17
astagno	24	8°	14	42	81	26	685	48
dercia comune	27		14	42	81	30	905	63 1/3
uercia bianca del Canadà	50	90	18	54	90	33	842	59
Quercia di Borgogna	25	25 81	14	42	8,	28	764	
uercia rossa di Virginia	27	63	15	45		30	587	41
orbo comune	15	45	8	36	63	23	994	63 5/4
ipresso piramidale	24	72	12	24 36	45	20	91 r 655	05 574
apresso spiegato	20	72 60	11	33	72	20	572	46 40
Chano delle Alpi	10	30	6	18	3o	11	1054	75 374
Acero della Virginia	24	72	12	36	100.00	27	629	75 374
Accro diasprato	12	72 36	7	21	72 36	14	554	38 3/4
raisa Acacia	20	60	10	30	6a	22	791	55 173
ricdistia senza spine	18	54	9	27	54	20	780	54 1/2
Frassino	20	60	12	27 36	60	22	787	55
Faggio	21	72	14	42	72	26	720	50 1/2
l'asso Castagno d' India	24	27	5	15	27	10	778	54 172
arice	25	72	14	42	92	36		46
Voce	18	75 54	15	45	90	33	656	46
oce di America	20	60	9	27 30	92	34	680	47 172
Amo	24		14	42	96 80	36	735	51 1/2
hoppo d' Italia	25	72 75 81	15	45	81	50 30	758 415	51 2/3
'ino del Nord	27 25	81	15	45	87	33	612	29 45 45 172
latano comune	25	75 81	14	42	75	28	622	45 172
Platano d' Oriente	27	8t	14	42	96	36	538	37 2/3
Platano d' Occidente	25	75 36	13	39	90	33	704	49 1/2
Pero selvatico	12		6	18	36 1	14	715	50
runo id	10	30	5	15	53	12	735	51 172
Abete	52 52	27	5	15	30	11	762	53 173
salice	18	96 54	18	54	120	44	542	58
ocomoro	20	60	9	27	30	22	462	32 1/2
orbo	12	36	6	50	72	27	645	45
Liglio	18	54	10	18 30	42	16	742	52
I ulipier	20	60	10	30	66	25	564	59 1/2
Luja della Cina	18	54	10	30	7º 56	26	427	55 1/3
Vernice del Giappone	10	30	6	18	36	14	560 820	59 1/2 57 1/2

Figura 5–14. Valori di DBH noti in letteratura. (Rondelet, 1839)

Determinati DBH e numero di alberi per ettaro, si è proceduto a creare la mappa raster della deviazione standard relativa al diametro medio dei tronchi ad altezza di petto e della percentuale di conifere presenti (dbstd.asc, conif_percent.asc).

La deviazione standard è calcolata matematicamente tramite la [Equazione (5.3)]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \tag{5.3}$$

Dove:

- $-\sigma =$ deviazione standard (nel caso specifico rappresenta la dbhstd);
- xi = singolo campione;
- μ = valore medio dei campioni;
- n = numero totale di campioni.

La percentuale di conifere invece è stata valutata tramite il CLC e tramite analisi visiva.

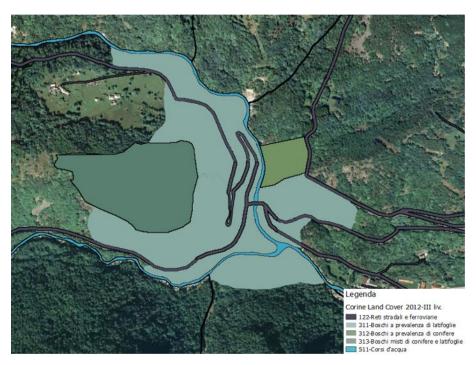


Figura 5–15. Carta del Corine Land Cover. (Regione Piemonte, 2012)



Figura 5–16. Foto aerea della zona interessata dall'evento franoso. (Google Maps, 2018)

Dalle Figure 5-14 e 5-15 si nota come la presenza di conifere sia piuttosto bassa. Il CLC mette in evidenza come l'area sia caratterizzata per lo più da boschi a prevalenza di latifoglie e ciò è confermato dalla ripresa aerea di Google Maps; dove di fatti gli alberi sempre verdi, ovvero le conifere, sono ben visibili.

È stata utilizzata pertanto una percentuale di conifere pari al 10% nelle zone definite come "boschi a prevalenza di latifoglie" mentre è stato attrabuito il 100% nell'area "boschi a prevalenza di conifere", trattandosi di una pineta di pino silvestre individuate sulla carta forestale, ed anche laddove è evidente una verde coltre, in stagione invernale, da Google Maps.

Il risultato dell'analisi sulla vegetazione, una volta inseriti i dati nelle colonne degli attributi, si può riassumere con il seguente raster di output del numero di alberi per ettaro:

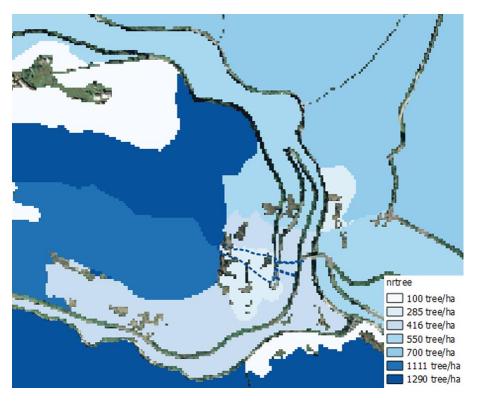


Figura 5–17. Raster di output "nrtrees" (QGIS 2.18.15)

5.1.2.3 Definizione delle celle sorgenti

Caratterizzato il versante in termini di suolo, vegetazione e scabrezza, si è proceduto all'individuazione della nicchia di distacco mediante tre strumenti:

- SIFraP: tramite il quale è stato possibile visualizzare la perimetrazione e le principali caratteristiche del fenomeno franoso;
- Ortofoto post-evento (2012): osservazione dei segni di dissesto;
- Raster delle pendenze "Slope" ricostruito su QGIS mediante la funzione Raster→Analisi→DEM analisi morfologica: osservazione delle celle a maggiore pendenza.

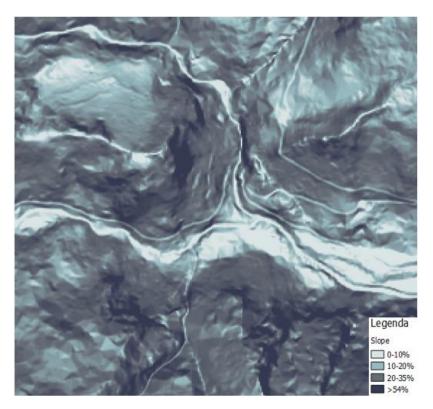


Figura 5–18. Mappa delle pendenze (QGIS 2.18.15)

Le celle sorgenti che danno origine all'instabilità sono abbastanza difficili da individuare anche per il personale esperto del settore, per cui sono state condotte più analisi prendendo in considerazione celle diverse. La nicchia è stata collocata sulle celle che vanno dai 1040 ai 1060 m s.l.m. all'interno della perimetrazione eseguita da ARPA Piemonte.

Per identificare la nicchia, su QGIS è stato creato uno shapefile poligonale a cui sono stati assegnati i valori degli attributi: "rockdensity", "d1, d2, d3" e "blshape" attraverso la modalità di selezione ed editing della tabella degli attributi.

Le ipotesi fatte hanno previsto l'assegnazione di 2500 kg/m³ per la densità (poiché si suppone che la roccia abbia una densità almeno pari a quella del calcestruzzo) e dopo aver effettuato simulazioni a differente forma dei blocchi, si è ritenuto opportuno assegnare il valore 1, che corrisponde a un blocco sferico, poiché l'utilizzo di forma sferica ha mostrato risultati più soddisfacenti in termini di area d'invasione. Alle dimensioni d1, d2 e d3 è stato attribuito il medesimo dato, trattandosi di un elemento

sferico, pari a 1,56 m in quanto il rapporto di frana redatto da ARPA ha riportato una volumetria media di 2 m³ dei blocchi distaccatasi dalla parete rocciosa.

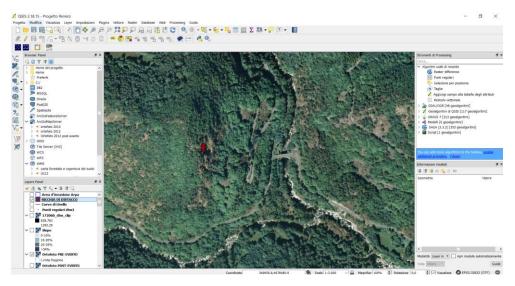


Figura 5–19. Shapefile della nicchia di distacco (QGIS 2.18.15)

Una volta definiti tutti i rasters d'input, si è proceduto alla back-analysis dell'evento franoso del 16 marzo 2011 (evento franoso 1).

Poiché nel rapporto di frana sono state indicate diverse volumetrie dei blocchi, oltre lo scenario con volume di 2 m³ pari alla pezzatura media misurata, si è deciso di rappresentare altri tre scenari per tenere conto delle altre volumetrie definite sul rapporto di evento, per un totale di quattro scenari.

6. Simulazione del crollo con il codice Rockyfor3D

Mentre nel <u>Capitolo 5</u> si è descritta la procedura utilizzata in questa tesi per il settaggio della back-analysis. Una volta realizzate le mappe raster, che servono al software per generare l'analisi tridimensionale, queste vengono collocate all'interno di un'apposita cartella, la cui posizione è definita dal codice come "working directory".

6.1 Back-analysis

Allo scopo della ricostruzione dell'evento del 16 marzo 2011, analizzando visivamente l'area di invasione fornita da ARPA Piemonte nella scheda del SIFraP 001-76464-00 (Figura 4-14, <u>Allegato A1</u>) e i segni di dissesto sul territorio dall'ortofoto post-evento del 2012, sono stati settati i parametri d'ingresso inseriti nei raster.

Il risultato più realistico dell'analisi, in termini di area d'invasione, per blocchi di volumetria pari a 2 m³, simulati con forma sferica di diametro 1,56 m, e per un numero di lanci per cella pari a 1000 (con un totale di 6000 lanci), è rappresentato in Figura 6-1.

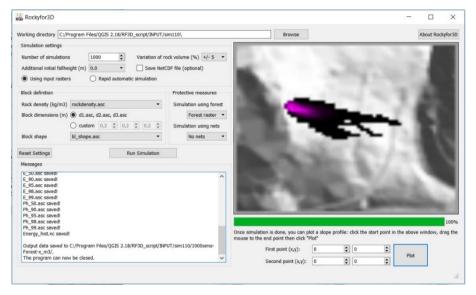


Figura 6-1. Risultato della simulazione con 1000 lanci per cella

Tuttavia come indicano gli autori <u>Castelli et al., 2016</u> in bibliografia, l'affidabilità dei risultati di un'analisi probabilistica di caduta, dipende principalmente, tra gli altri fattori, dal numero di simulazioni delle traiettorie di caduta massi lungo il versante. Questo significa che è possibile correlare l'errore previsto sui risultati con il numero di simulazioni: a seconda dei parametri d'ingresso dell'analisi, il numero minimo di simulazioni necessario per ottenere risultati affidabili, in termini di velocità di caduta, energia e altezza di rimbalzo, può essere molto diverso.

Per questo motivo si è ritenuto necessario validare il risultato della simulazione di Figura 6-1, avviando nuove analisi in cui è stato portato il numero di lanci per cella ad un valore di 100000. L'idea è stata quella di ridurre al minimo possibile l'errore sulla simulazione.

In Figura 6-2 è mostrato il risultato, in termini di traiettorie, dell'analisi eseguita con 100000 lanci per cella. Tale risultato si ritiene essere più soddisfacente in quanto approssima meglio l'area d'invasione disegnata da ARPA Piemonte.

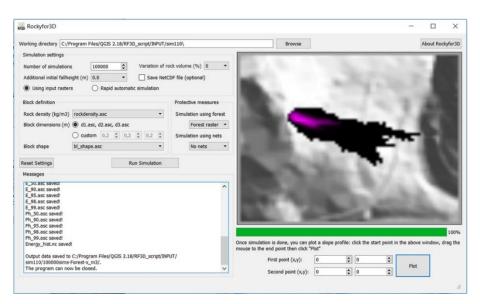


Figura 6-2. Simulazione con 100000 lanci per cella

I rasters di output generati dal codice Rockyfor3D, descritti nel ¶3.8 sono stati letti su QGIS. Mediante questo strumento si è in grado di conoscere il valore del parametro in questione in modo puntuale, per ogni singola cella.

Il raster caricato può, inoltre, essere tematizzato impostando una graduazione di colore che mette in evidenza la variazione del parametro considerato in funzione di una suddivisone in classi, consentendo di individuare le zone interessate dai valori massimi e minimi. (Camorani, 2015)

La Figura 6-2 è stata ottenuta a seguito di differenti simulazioni e quindi costruendo vari scenari frutto dell'incrocio tra tipi di suolo e valori di scabrezze non necessariamente appartenenti alla stessa classe.

Nello specifico, sono state individuate due zone del versante (Figura 6-3):

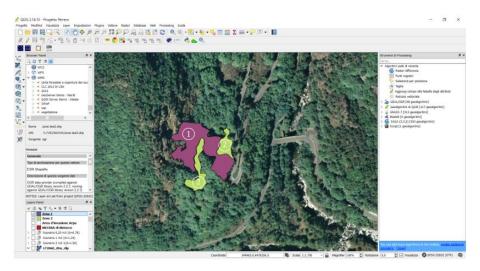


Figura 6–3. Zone modellate con valori di scabrezza diversi da quelli di default (QGIS 2.18.15)

Alla zona 1 e alla zona 2 sono stati associati rispettivamente i seguenti valori:

Zona 1:

- Soiltype = 4 (detrito di versante/suolo compatto con grandi massi);
- Rg70 = 0,1;
- Rg20 = 0,35;
- Rg10 = 0,15.

Zona 2:

Soiltype = 5 (substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica);

- Rg70 = 0;

- Rg20 = 0,05;

- Rg10 = 0,1.

Le celle sorgenti dell'instabilità sono state modellate con soiltype 6 ovvero quello corrispondente al bedrock mentre alle restanti zone del pendio sono stati associati per ogni classe di suolo i valori di default di rugosità definiti da Rockydor3D (Tabella 5-1).

6.2 Risultati dell'analisi

Il risultato delle analisi effettuate con il codice di calcolo Rockyfor3D consente di rappresentare la distribuzione lungo il versante di:

- Energia cinetica;

Velocità;

Altezza di rimbalzo;

- Depositi.

Nello specifico, una volta terminata la simulazione, vengono restituiti non solo i parametri con valor medio ma anche energie cinetiche a diversi percentili.

In questo elaborato ci soffermeremo sui valori medi e sui valori al 99° percentile. Ci si riferirà ai valori al 99° percentile considerandoli come valori massimi in quanto Rockyfor3D non restituisce valori al 100° percentile.

6.2.1 Area d'invasione

L'area di invasione risultato dell'analisi si può ritenere soddisfacente se confrontata con l'area individuata sul rapporto di frana di ARPA Piemonte, sia in termini di elongazione delle traiettorie (200 m la parte più lunga) che estensione (40 m) occupando una grande porzione del versante (estensione di circa 7600 m²).

In generale, la distribuzione delle traiettorie simulate, governata dalle pendenze del versante, dal tipo di suolo e dalla vegetazione, si può considerare piuttosto uniforme. Il risultato (Figura 6-4) sembra un po' sovrastimato rispetto l'area individuata da ARPA Piemonte ma occorre sottolineare che tutti i parametri sono stati tarati su un volume intermedio tra tutti i volumi dei blocchi misurati in campo dopo l'evento.

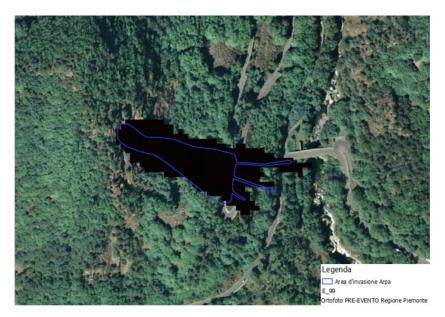


Figura 6-4. Scenario 2 m³ - Rappresentazione dell'area di invasione simulata

6.2.2 Energia cinetica

Le energie cinetiche medie che si sono sviluppate nella ricostruzione dell'evento, vanno da un minimo di circa 180 kJ ad un massimo di circa 1870 kJ (Figura 6-5).

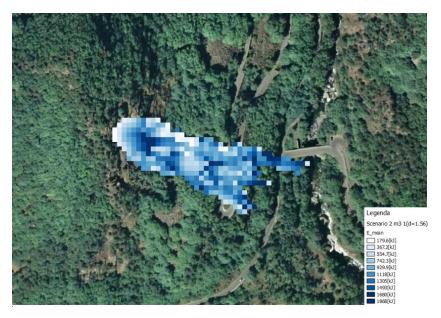


Figura 6-5. Scenario 2 m³ - Energia cinetica media

Le zone del versante in cui l'energia cinetica media è più alta si concentrano subito al di sotto della parete rocciosa dopo la nicchia di distacco, in una piccola zona proprio al di sopra della strada provinciale ed infine nelle aree terminali, precedenti i punti di arresto, in cui alcuni blocchi isolati deviano la loro traiettoria in tre individuali diramazioni.

La zona centrale è invece interessata da energie cinetiche più ridotte con valori che si aggirano tra i 370 kJ e i 750 kJ. Questa decrescita è da attribuire principalmente ad un cambio di pendenza del versante e alla presenza di suolo vegetato.

Da una prima osservazione della rappresentazione grafica delle energie cinetiche al 99° percentile (Figura 6-6) la nostra attenzione si concentra sulla distribuzione che sembra avere un andamento piuttosto settoriale.

I blocchi discendono lungo il versante con un'energia cinetica di partenza di 750 kJ per poi raggiungere i 2870 kJ e decrescere nuovamente a 1800 kJ e ancora una volta aumentare sfiorando in piccole aree circoscritte, in corrispondenza di un affioramento roccioso, i 5000 kJ.

Dal profilo altimetrico del pendio (Figura 6-7), si evince che l'aumento del parametro è da ritenere dipendente dall'andamento topografico del suolo; in particolare, è

probabile che nelle aree a maggiore intensità energetica, i blocchi dissipino meno energia durante i rimbalzi entrando in contatto con un affioramento roccioso, cioè un suolo a maggiore rigidezza.

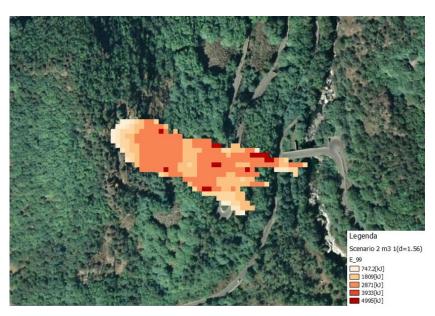


Figura 6–6. Scenario 2 m³ - Energia cinetica al 99° percentile

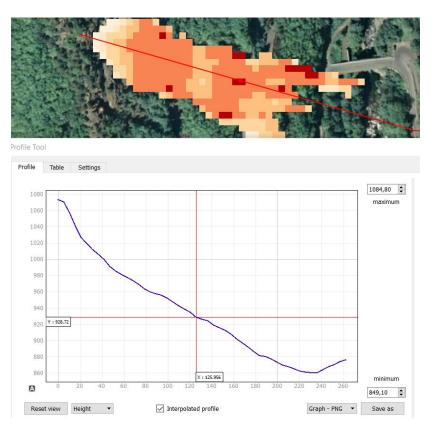


Figura 6–7. Profilo altimetrico del pendio in correlazione al 99° percentile di energia cinetica (indicato dall'incrocio degli assi in rosso)

6.2.3 Velocità

Connesso all'energia cinetica al 99° percentile (Figura 6-6), è l'andamento delle velocità (Figura 6-8).

I valori maggiori si esplicano nella parte più alta del versante, ai piedi della parete rocciosa da cui ha avuto origine il crollo, per poi decrescere e nuovamente aumentare in prossimità del tratto precedente la strada provinciale.

I valori di picco sono piuttosto elavati e raggiungono i 36,9 m/s in una piccola ed isolata zona in alto del versante e nell'ultimo tratto di una delle tre diramazioni. Giunti alla parte finale della zona di trasporto le velocità si mantengono entro i 20 m/s fino all'arresto totale dei blocchi.

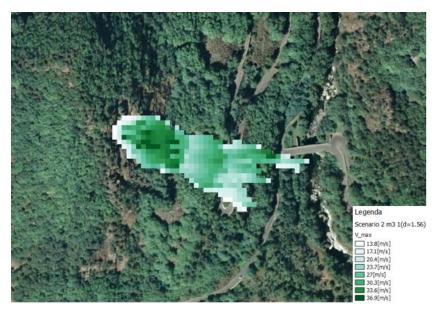


Figura 6–8. Scenario 2 m³ - Andamento delle velocità (QGIS 2.18.15)

6.2.4 Altezze di rimbalzo

In Figura 6-9 sono definite le altezze medie di rimbalzo dei blocchi, analizzate da Rockyfor3D.

La distribuzione delle altezze medie di rimbalzo resta piuttosto uniforme per tutta l'area d'invasione della frana ad eccezione per alcune porzioni ridotte del versante.

Nello specifico, la massima altezza viene conseguita in prossimità dell'ultimo tratto di una delle tre diramazioni, raggiungendo la quota di 2,46 m; mentre altezze più contenute (1÷2 m) si manifestano nella zona centrale. Si può affermare che in queste regioni i blocchi tendano ad avere un moto contraddistinto da urti e successivi rimbalzi.

Tutti i valori di altezza indicati dal codice, sono riferiti al baricentro del blocco.

In generale, in ampie parti del versante, si suppone che il moto principale dei massi sia quello di rotolamento/scivolameto poichè un'altezza di 0,78 m corrisponde al baricentro dei blocchi stessi, essendo stato supposto il diametro di ogni singolo blocco pari a 1,56 m.

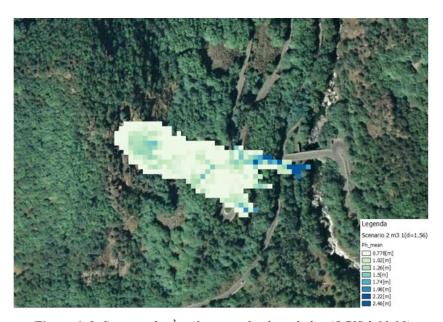


Figura 6–9. Scenario 2 m³ - Altezze medie di rimbalzo (QGIS 2.18.15)

6.2.5 Distribuzione dei depositi

Da un'osservazione della distribuzione dei depositi (Figura 6-10) si evince che il maggior numero di blocchi si ferma prima di raggiungere l'infrastruttura stradale (S.P. 170), nella porzione di versante al piede della nicchia di distacco e nella zona alta

di trasporto. Tuttavia la viabilità viene colpita ed invasa, seppur con un numero inferiore di blocchi, e addirittura superata, fino all'arresto completo subito dopo la S.P. 169, singoli massi si arrestano infine in prossimità del Torrente Germanasca sfiorando il ponte di collegamento.

Poiché il numero dei blocchi dipende dal numero di lanci per cella effettuato durante l'analisi, è opportuno concretare una stima del numero di depositi in termini di percentuale.

Identificando tre regioni distinte sul versante (Figura 6-10), la percentuale dei depositi è così stimata:

- Zona 1 (area precedente la S.P. 170) \rightarrow 99,89%
- Zona 2 (area intermedia tra S.P. 170 e S.P. 169) \rightarrow 0,1%
- Zona 3 (area tra la S.P. 169 ed il torrente) → 0,01 %



Figura 6–10. Scenario 2 m³ - Numero di depositi (QGIS 2.18.15)

6.3 Statistiche dei risultati in prossimità dei collettori

Terminata la simulazione delle traiettorie con foresta, si è ritenuto necessario operare un'ulteriore analisi inserendo delle barriere di calcolo virtuali in punti scelti sul versante, al fine di ricavare i parametri interessati per la progettazione di un'opera in grado di proteggere la viabilità provinciale.

Queste barriere fungono da collettori in modo tale da garantire una stima della distribuzione statistica dei parametri caratteristici dei blocchi che, al loro passaggio, vengono intercettati dal collettore: energie cinetiche, velocità, altezze di rimbalzo e numero di blocchi.

Lo step necessario a garantire la raccolta dei dati da parte del collettore è quello di inserimento del valore nullo, nelle celle di appartenenza, agli attributi "net_energy" e "net_height"; contrariamente all'attributo "net_number", in cui dovrà essere immesso invece il valore identificativo del collettore.

In questo elaborato si è scelto di assegnare alla barriera due collocazioni ipotetiche, il cui stendimento segue le curve di livello (Figura 6-11).

La scelta della collocazione sul versante è stata valutata sulla base di due criteri principali:

- Energie cinetiche minori;
- Facilità d'installazione.

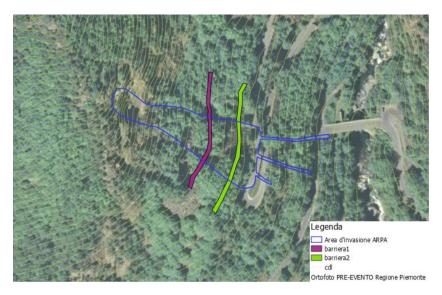


Figura 6–11. Posizionamento collettori (QGIS 2.18.15)

6.3.1 Analisi con collettore in posizione 1

La posizione del collettore 1 (Figura 6-12), è stata valutata tenendo conto delle aree in cui la simulazione del moto dei blocchi ha evidenziato uno sviluppo di energie cinetiche minori.

La barriera è stata collocata a 38 m circa dalla S.P. 169, a quota +30 m rispetto ad essa.

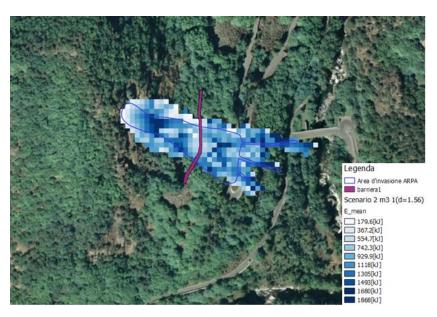


Figura 6–12. Scenario 2 m³ - Ipotesi barriera 1 (QGIS 2.18.15)

Avviata la simulazione, Rockyfor3D ha restituito un logfile in cui vengono indicati i valori caratteristici di ogni singolo blocco che oltrepassa il collettore.

Attraverso un foglio di calcolo Excel, per ogni parametro, sono stati definiti il valore massimo e minimo e successivamente è stata effettuata una divisione in classi al fine di costruire le frequenze cumulate e le frequenze assolute di ciascuno di essi.

In particolare le velocità dei blocchi in corrispondenza del collettore 1, partono da un minimo di 0,7 m/s arrivando ad un massimo di 25,5 m/s. Si è deciso di suddividere la velocità in 26 classi con passo di 1 m/s.

Attraverso la funzione di frequenza cumulata è stato ottenuto il grafico in Figura 6-13, dove si evince che al 95° percentile, valore indicato dalle linee guida ETAG per la progettazione di una barriera paramassi, corrisponde una velocità di 19,7 m/s.

Ciò significa il 95% delle traiettorie simulate possiede velocità inferiore a quel valore, attraversando il collettore, mentre al 100% si raggiungono i 25,5 m/s.

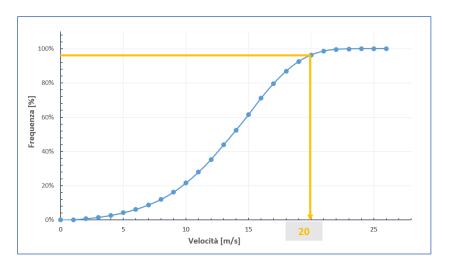


Figura 6–13. Scenario 2 m³ - Cumulata di frequenza delle velocità (barriera1)

In Figura 6-14 viene rappresentata la frequenza assoluta delle velocità dei blocchi individuate dal collettore.

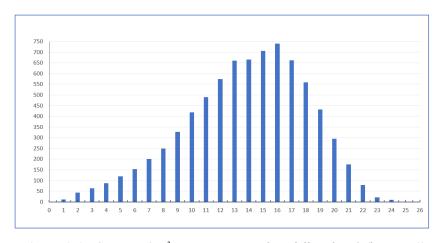


Figura 6–14. Scenario 2 m³ - Frequenza assoluta delle velocità (barriera1)

Per ottenere la frequenza cumulata dell'energia cinetica rappresentata in Figura 6-15, si sono suddivisi i valori dell'energia cinetica in 24 classi con passo di 100 kJ, riscontrando un valore minimo di 1,6 kJ ed massimo di 2290,1 kJ.

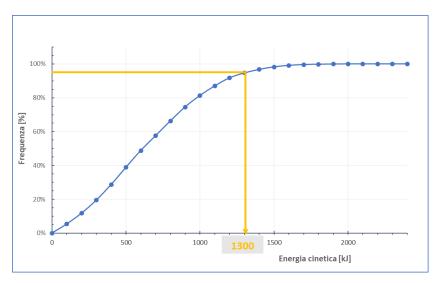


Figura 6–15. Scenario 2 m³ - Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera1)

Al 95° percentile corrisponde un'energia cinetica di 1300 kJ.

In Figura 6-16 viene rappresentata la frequenza assoluta delle energie cinetiche dei blocchi individuate dal collettore.

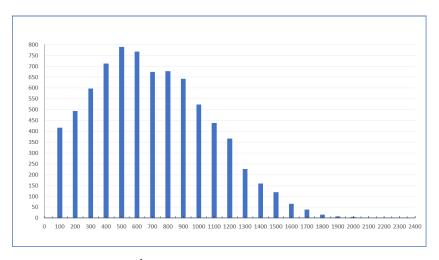


Figura 6–16. Scenario 2 m³ - Frequenza assoluta delle energie cinetiche (barriera1)

La frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo (Figura 6-17) è stata costruita su valori di altezze che vanno da 0,78 m a 2,3 m, dividendo il range di valori in 7 classi con passo di 0,4 m.

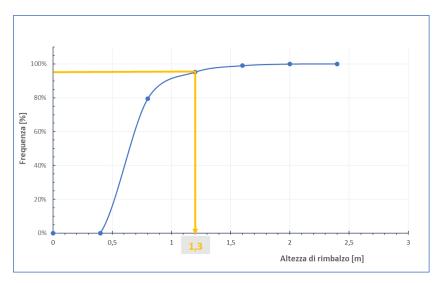


Figura 6–17. Scenario 2 m³ - Frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo

Il valore minimo è pari al raggio del blocco, il che presuppone che il masso stia seguendo un moto di scivolamento e/o rotolamento verso valle.

Dalla frequenza cumulata si evince che l'altezza corrispondente al 95° percentile è pari a 1,3 m. Depurando tale valore da quello del raggio del blocco, si ottiene un'altezza di rimbalzo di 0,52 m.

In Figura 6-18 è stata graficata la frequenza assoluta delle altezze di rimbalzo dei blocchi individuate dal collettore, in cui è preponderante il valore 0,78 m. Ciò significa che la maggior parte dei massi arriva al collettore quasi a contatto con il pendio.

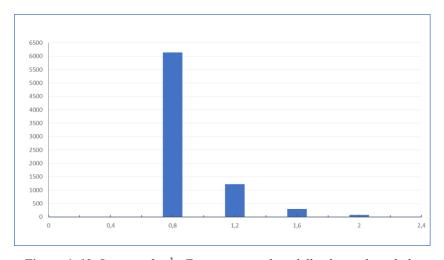


Figura 6–18. Scenario 2 m³ - Frequenza assoluta delle altezze di rimbalzo

6.3.2 Analisi con collettore in posizione 2

Per il secondo scenario (Figura 6-19), la posizione 2 è stata valutata tenendo conto della vicinanza alla S.P. 170 che permette una più facile installazione di un'opera di protezione nonostante le enrgie cinetiche siano maggiori rispetto allo scenario 1.

La barriera è stata collocata a 14 m circa dalla S.P. 169, a quota +12,5 m rispetto ad essa.

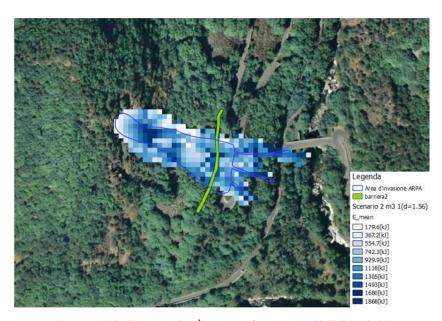


Figura 6–19. Scenario 2 m³ - Ipotesi barriera 2 (QGIS 2.18.15)

Come per lo scenario 1, è stata eseguita la medesima procedura su foglio di calcolo Excel per lo scenario 2.

Nello specifico, dalla Figura 6-20 si evince che le velocità dei blocchi partono da un minimo di 1,4 m/s arrivando ad un massimo di 32,3 m/s. Si è deciso di suddividere la velocità in 22 classi con passo di 1,5 m/s.

Attraverso la funzione di frequenza cumulata è stato ottenuto il grafico in Figura 6-20, dove si evince che al 95° percentile corrisponde una velocità estremamente elevata pari a 29 m/s.

Ciò significa che il 95% delle traiettorie possiede velocità inferiore a quel valore, mentre al 100% si raggiungono i 32,3 m/s.

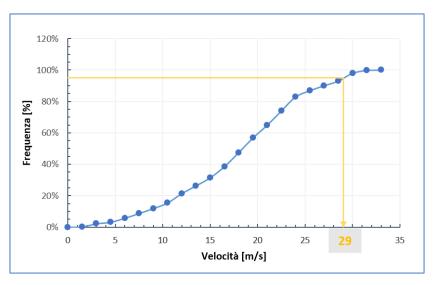


Figura 6–20. Scenario 2 m³ - Frequenza cumulata delle velocità (barriera 2)

In Figura 6-21 viene rappresentata la frequenza assoluta delle velocità dei blocchi individuate dal secondo collettore.

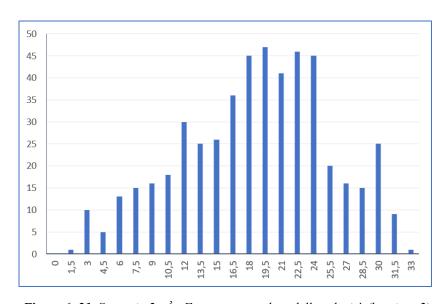


Figura 6–21. Scenario 2 m³ - Frequenza assoluta delle velocità (barriera 2)

Per ottenere la frequenza cumulata in Figura 6-22, si sono suddivisi i valori dell'energia cinetica in 21 classi con passo di 150 kJ, riscontrando un valore minimo di 4,3 kJ ed massimo di 3057,5 kJ.

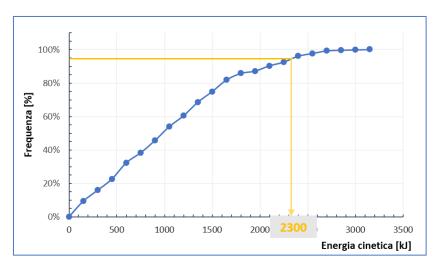


Figura 6–22. Scenario 2 m³ - Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera 2)

Al 95° percentile corrisponde un'energia cinetica di 2300 kJ.

In Figura 6-23 viene rappresentata la frequenza assoluta delle energie cinetiche dei blocchi individuate dal collettore.

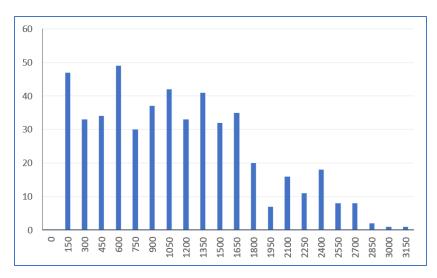


Figura 6–23. Scenario 2 m³ - Frequenza assoluta delle energie cinetiche (barriera 2)

La frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo (Figura 6-24) è stata costruita su valori che vanno da 0,78 m a 3,4 m, dividendo i dati in 5 classi con passo di 1 m.

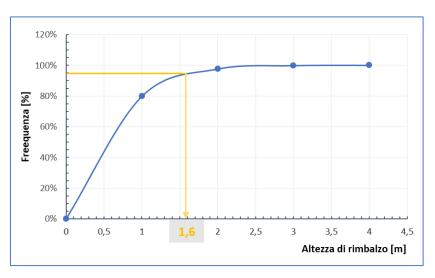


Figura 6–24. Scenario 2 m³ - Frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo (barriera 2)

Il valore minimo è pari al raggio del blocco (0,78 m), il che presuppone che il masso stia seguendo un moto di scivolamento e/o rotolamento verso valle.

Dalla frequenza cumulata si evince che l'altezza corrispondente al 95° percentile è pari a 1,6 m. Depurando tale valore da quello del raggio del blocco, si ottiene un'altezza di rimbalzo di 0,82 m.

In Figura 6-25 è stata graficata la frequenza assoluta delle altezze di rimbalzo dei blocchi individuate dal collettore, in cui è preponderante il valore 1 m. Ciò significa che i blocchi arrivano al collettore effettuando piccoli rimbalzi.

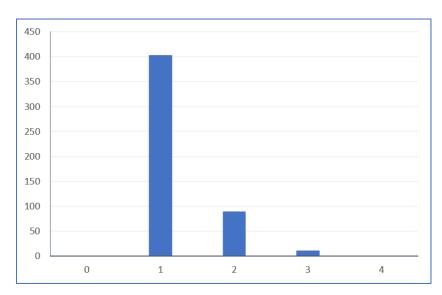


Figura 6–25. Scenario 2 m³ - Frequenza assoluta delle altezze di rimbalzo (barriera 2)

6.4 Confronto con codice di calcolo RotomapGIS

Questo lavoro di tesi si è prefissato due obiettivi: l'uno di ricostruire l'evento del 16 Marzo 2011 in back-analysis, l'altro di stilare punti di forza e di debolezza del codice Rockyfor3D paragonando i risultati ottenuti ad un altro codice di calcolo conosciuto come RotomapGIS. (Scioldo, 1991)

RotomapGIS è un software tridimensionale basato su metodo non probabilistico e "lumped mass" che non prevede il calcolo diretto dell'effetto della vegetazione ma lo assume indirettamente attraverso i coefficient di restituzione energetica del tipo di suolo.

Il confronto è stato realizzato tramite gli studi sviluppati in un antecedente lavoro di tesi (Mininno, 2013) sul medesimo evento di crollo in roccia.

Una prima comparazione è stata effettuata sui risultati dell'area d'invasione e sui valori delle energie cinetiche (Figura 6-26), in termini di valori massimi.

Con RotomapGIS viene restituito un raster sulle energie cinetiche massime per unità di massa: energia specifica, misurata in J/kg. Su Rockyfor3D l'unità di misura è il kJ, cioè energia cinetica. Si ricorda che occorre effettuare una conversione per passare da J/kg a kJ ed utilizzare il raster di Rockyfor3D che corrisponde al 99° percentile dell'energia poichè il codice non fornisce risultati in termini di energia cinetica massima.

Il valore sulla massima energia cinetica specifica restituito da RotomapGIS è pari a 1500 J/kg ed è questo il valore che è stato convertito in kJ con la [Equazione(6.1)]:

$$E_{max}[J] = E_{max,um} \left[\frac{J}{kg} \right] \cdot \gamma \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot V[m^3]$$
(6.1)

Dove:

- E_{max} = energia cinetica massima [J];
- E_{max,um} = energia cinetica massima per unità di massa [J/kg];
- γ = densità dei blocchi misurata in [kg/m³];

- $V = \text{volume dei blocchi } [m^3].$

Inserendo i valori numerici e moltiplicando per 10⁻³, si ottiene il risultato in kJ:

$$E_{max}[kJ] = 1500 \left[\frac{J}{kg} \right] \cdot 2500 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 2[m^3] \cdot 10^{-3} = 7500 \left[kJ \right]$$
 (6.2)

Il valore di 7500 kJ è quello corrispondente agli studi effettuati con RotomapGIS (Mininno, 2013), valore piuttosto elevato. L'energia cinetica massima ottenuta al 99° percentile su Rockyfor3D, risulta essere pari a circa 5000 kJ per cui vi è una differenza di circa 2500 kJ.

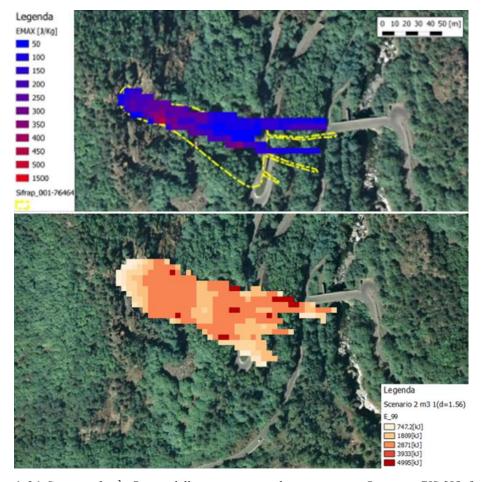


Figura 6–26. Scenario 2 m³ - Raster delle energie cinetiche massime con Rotomap GIS [J/kg] in alto (Mininno, 2013) e delle energie cinetiche al 99° percentile con Rockyfor3D in basso

Nonostante si riscontrino valori di energia cinetica più elevati con RotomapGIS, si denota una corrispondenza delle aree ad intensità energetica maggiore, seppur risultino

poco più estese con Rockyfor3D. In particolare, nella zona al piede della parete rocciosa da cui ha avuto origine il crollo, sotto la nicchia di distacco e nella regione centrale della zona di trasporto precedente la viabilità provinciale 170.

I risultati forniti da Rockyfor3D sembrano essere più realistici, ottenendo un andamento delle energie cinetiche più conforme ad un evento di crollo con una volumetria di 2 m³. Una maggiore precisione può essere dovuta al fatto che i parametri settati in ingresso hanno un significato fisico tale per cui si ha diretta interazione su tipo di suolo e vegetazione.

Considerazioni analoghe possono esser fatte sulle velocità anche se RotomapGIS non restituisce un raster di questo parametro ma questo può essere comunque confrontato, per valori massimi, grazie alla relazione:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \tag{6.3}$$

Dove:

- m = massa [kg];
- v = velocità [m/s].

Eseguendo la formula inversa della relazione (6.3) si ottiene:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}} \tag{6.4}$$

Essendo:

$$m = \gamma \cdot V = 2500 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 2[m^3] = 5000 \ kg$$
 (6.5)

Utilizzando il dato massimo della velocità su RotomapGIS si ha:

$$v = \sqrt{\frac{2.7500 \cdot 10^3 [J]}{5000[kg]}} = 54.7 \left[\frac{m}{s} \right]$$
 (6.6)

In Figura 6-8 si evince che su Rockyfor3D la velocità massima simulata dai blocchi in discesa è pari a 36,9 m/s, dato nettamente inferiore e più realistico.

Un'altro termine di paragone è rappresentato dalla riproduzione dell'area di invasione. L'analisi svolta con Rockyfor3D rappresenta in modo più fedele l'area definita dal rapporto di evento di ARPA Piemonte. RotomapGIS invece non considera tutte le probabili traiettorie dei blocchi durante il moto a causa della metodologia deterministica su cui si basa il codice stesso, per questo motivo in Figura 6-26 si nota come la parte in basso del profilo disegnato da ARPA Piemonte non venga proprio attraversata dai massi nella simulazione effettuata da Mininno, 2013.

La Figura 6-27 propone la distribuzione dei depositi. Dai raster di RotomapGIS si denota che il numero maggiore di massi si arresta proprio nell'area definita dalla nicchia di distacco e solo alcuni blocchi si fermano lungo il versante nella discesa verso valle. Nello specifico, durante la discesa, si ha una distribuzione con maggiore frequenza nella parte centrale della zona di trasporto con pochi massi che proseguono arrestandosi sulla strada ed alcuni, isolati, prima del ponte.

Su Rockyfor3D si ha corrispondenza sulla distribuzione degli arresti per quanto riguarda la zona centrale del corpo di frana mentre al di sotto della nicchia di distacco vengono evidenziati blocchi solo in due celle.

I massi presentano una frequenza di arresti abbastanza fitta lungo tutto il versante, altri invadono la S.P. 170, ed alcuni altri giungono nelle zone di arresto evidenziate nel rapporto di ARPA Piemonte, superandole di poco.

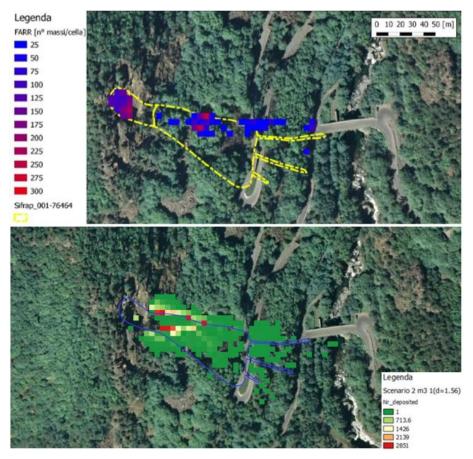


Figura 6–27. Scenario 2 m³ - Distribuzione dei depositi con RotomapGIS in alto (MIninno, 2013) e con Rockyfor3D in basso

Effettuando una sovrapposizione del raster dei depositi con l'ortofoto post-evento della Regione Piemonte risalente al 2012 (Figura 6-28), è visibilmente constatabile che il risultato fornito da Rockyfor3D approssimi in modo migliore i segni di dissesto sul suolo a seguito dell'evento franoso.

Questa differenza è dovuta probabilmente all'approccio cinetico che utilizzano i codici: in un codice di calcolo lumped mass come RotomapGIS, l'area d'invasione non è influenzata dalla massa, mentre utilizzando un approccio rigid body (Rockyfor3D), avviene il contrario: scenari a diversa volumetria avranno diverso comportamento.



Figura 6–28. Scenario 2 m³ - Confronto tra segni di dissesto su Ortofoto 2012 e distribuzione dei depositi su Rockyfor3D (QGIS 2.18.15)

6.5 Considerazioni sul confrono dei risultati dati dai codici di calcolo

Le disomogeneità dei risultati dati dai due software sono da attribuire essenzialmente alla metodologia su cui si basano le analisi.

Studi precedenti (Camorani, 2015) dimostrano che per analisi di eventi a grande volumetria, RotomapGIS non sia indicato, ma anche nel corso di questo elaborato è stato valutato che anche per blocchi di media pezzatura (volume pari a 2 m³), il programma risulta approssimare la propagazione del crollo in modo meno preciso di Rockyfor3D.

Questo perché il metodo deterministico di RotomapGIS, non considera tutte le possibili traiettorie, ed essendo inoltre "lumped mass", gli effetti che le dimensioni e la forma dei blocchi hanno sul moto vengono ignorate. Come descritto nel <u>Capitolo 1</u> (¶1.1.3, ¶1.1.4) forma e dimensioni dei massi in caduta sono in grado di influenzare la traiettoria e di creare, in relazione alla massa, delle dispersioni di energia.

RotomapGIS risulta di più facile utilizzo in quanto richiede un numero minore di tarature poichè minori sono i parametri d'ingresso dell'analisi. Ad esempio, il ruolo

costituito dalla vegetazione viene tenuto in conto in modo indiretto, attraverso i coefficienti di restituzione associati al tipo di suolo (¶1.1.2, Tabelle 1-2, 1-3, 1-4) che non hanno riscontro misurabile.

Al contrario Rockyfor3D è un metodo "rigid body" e probabilistico che include l'effetto della foresta, la cui definizione può avvenire in modo semplice tramite osservazione di foto aeree.

Il metodo "rigid body" unito all'analisi probabilistica consente di non tralasciare gli effetti dati da forma e dimensioni dei blocchi e di simulare tutte le possibili traiettorie che possono compiere i blocchi durante la discesa verso valle, in funzione della distribuzione statistica dei parametri di ingresso.

La Tabella 6-1 riassume le principali differenze appena descritte.

Tabella 6-1. Metologia dei codici a confronto

Rockyfor3D®Ecorisq	RotomapGIS®Geo&Soft
Rigid Body	Lumped Mass
Probabilistico	Deterministico
Effetto Vegetazione diretto	Effetto Vegetazione indiretto
Rimbalzi	Rolamenti/Scivolamenti

7. Scenari a differente volumetria

Dal rapporto di ARPA Piemonte si evince che, nell'evento del 16 marzo 2011, il volume totale coinvolto nel crollo è stato di circa alcune migliaia di metri cubi. I blocchi si sono frammentati con diverse pezzature, di cui la media è stata di 2 m³, come detto nel <u>Capitolo 5</u>.

Poichè sono stati registrati anche blocchi di volumetria pari a 1 m³ e alcune decine di metri cubi, si è deciso di condurre l'analisi di propagazione del crollo a diversi scenari, oltre quello già descritto, con blocchi di volume pari a: 0,25 m³, 1 m³ e 10 m³, con lo scopo di valutare la pericolosità in termini di area di invasione.

7.1 Scenario 1 – blocco da 0,25 m³

La simulazione dello scenario 1 prende in considerazione blocchi di piccola volumetria $(V = 0.25 \text{ m}^3)$, modellati con forma sferica di raggio r = 0.39 m.

La ricostruzione in back-analysis dell'evento, mostra che l'area di invasione non ha un'estensione elevata e ciò è dovuto principalmente alla pezzatura ridotta dei blocchi e alla presenza di ostacoli lungo il pendio (scabrezza del suolo, vegetazione).

Analizzando il raster delle energie cinetiche medie (Figura 7-1), si nota che l'intensità maggiore che sviluppa il fenomeno, presente solo in pochissime aree di ridotta superficie, è pari a 295 kJ, mentre analizzando il raster delle zone di arresto (Figura 7-2), si nota che la maggior parte delle traiettorie si concentrano nella parte alta del versante arrestandosi in gran numero, mentre alcuni blocchi isolati proseguono verso valle fermandosi subito dopo la viabilità provinciale.

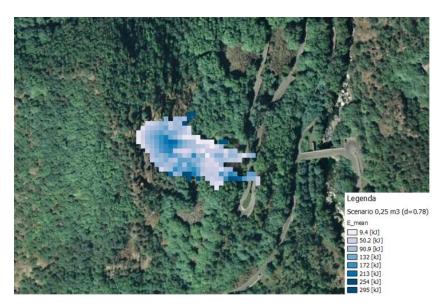


Figura 7–1. Scenario 0,25 m³-Raster dell'energia cinetica media (QGIS 2.18.15)



Figura 7–2. Scenario 0,25 m³-Raster del numero di depositi (QGIS 2.18.15)

L'effetto complessivo è quello di un crollo caratterizzato da energie cinetiche massime (99° percentile) piuttosto settoriali, di intensità pari a 500 kJ, e riscontrabili in prossimità della zona centrale di trasporto e nella zona terminale di una delle due diramazioni che seguono i blocchi durante il moto verso valle (Figura 7-3).



Figura 7–3. Scenario 0,25 m³- Raster dell'energia al 99° percentile (QGIS 2.18.15)

L'andamento delle velocità massime (Figura 7-4) segue quello delle energie cinetiche al 99° percentile, raggiungendo negli stessi settori le velocità più elevate con picchi di 36,1 m/s che decrescono fino ai punti di arresto.

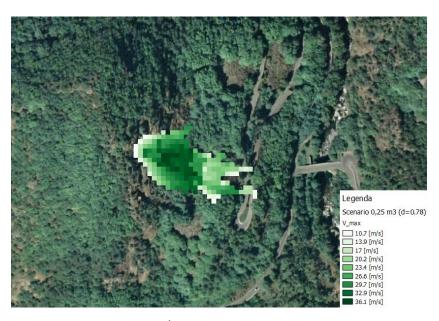


Figura 7–4. Scenario 0,25 m³ - Raster della velocità massima (QGIS 2.18.15)

In Figura 7-5 si evidenzia che la maggior parte delle altezze di rimbalzo si assesta attorno i 0,39 m, superato il primo settore al di sotto della parete da cui ha origine il disatcco, in cui si hanno rimbalzi di circa 1,32 m.

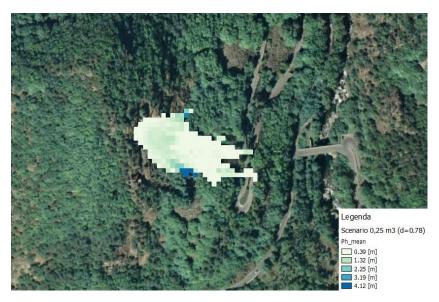


Figura 7–5. Scenario 0,25 m³-Raster delle altezze medie di rimbalzo (QGIS 2.18.15)

Altezze di 0,39 m fanno supporre che, in quelle regioni, il moto del blocco sia quello di rotoscivolamento; essendo 0,39 m il raggio del blocco stesso.

7.1.1 Risultati delle analisi con collettore

Anche per lo scenario da 0,25 m³ sono state inserite nelle analisi due barriere di calcolo virtuali, poichè il crollo ha interessato la viabilità, è necessario per questa ragione raccogliere maggiori informazioni riguardo i dati di velocità, energia cinetica e altezza di rimbalzo coinvolti durante il crollo.

I collettori sono stati locati nelle stesse posizioni dello scenario da 2 m³ (¶6.3).

In corrispondenza della barriera in posizione 1 si sono ottenute le frequenze cumulate di velocità, energia cinetica ed altezza di rimbalzo in Figura 7-6, Figura 7-7 e Figura 7-8.

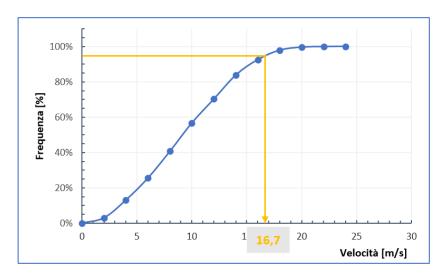


Figura 7–6. Scenario 0,25 m³- Frequenza cumulata delle velocità (barriera 1)

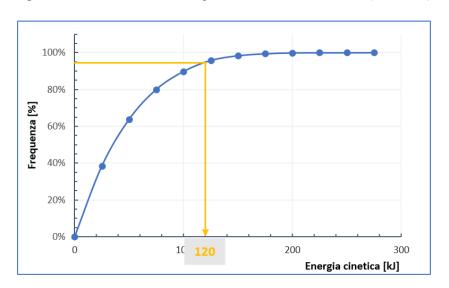


Figura 7–7. Scenario 0,25 m³-Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera 1)

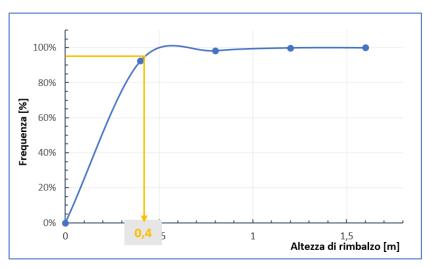


Figura 7–8. Scenario 0,25 m³- Frequenza cumulata delle eltezze di rimbalzo (barriera 1)

Questi grafici mostrano come, in corrispondenza del collettore 1, al frattile per 95% vi siano velocità ed energie cinetiche contenute ed un moto del blocco che corrisponde a quello di rotoscivolamento, essendo la cumulata delle altezze di rimbalzo pari a 0,39 m e quindi altezza corrispondente al raggio del blocco.

In corrispondenza del collettore 2, in prossimità della viabilità provincial, si riscontrano le frequenze cumulate graficate in Figura 7-9, Figura 7-10 e Figura 7-11, rispettivamente inerenti a velocità, energia cinetica ed altezza di rimbalzo.

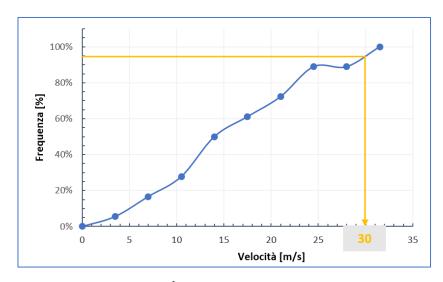


Figura 7–9. Scenario 0,25 m³ - Frequenza cumulate delle velocità (barriera 2)

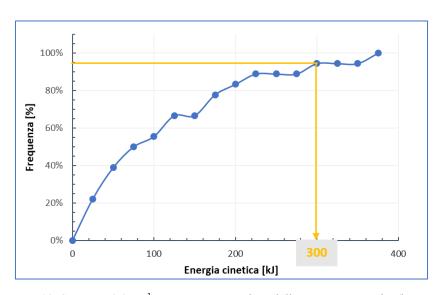


Figura 7–10. Scenario 0,25 m³⁻ Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera 2)

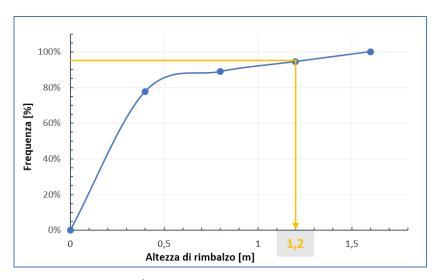


Figura 7–11. Scenario 0,25 m³ · Frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo (barriera 2)

In questo caso si sono ottenuti valori delle tre grandezze molto maggiori di quelli ottenuti in prossimità del collettore in posizione 1. Come era già stato mostrato con lo scenario da 2 m³.

Se mentre la Figura 7-8 mostra un frattile del 95% che corrisponde ad un rotoscivolamento, in questo caso in Figura 7-11 si ha invece un vero e proprio rimbalzo da 1,2 m. Depurato questo valore dalla misura del raggio del blocco pari a 0,39 m, si ottiene un'altezza di rimbalzo di 0,81 m.

Le frequenze assolute, per entrambi i collettori, sono consultabili in Allegato A4.

7.2Scenario 2 – blocco da 1 m³

La simulazione dello scenario 2 prende in considerazione blocchi di media volumetria $(V = 1 \text{ m}^3)$, modellati con forma sferica di raggio r = 0.62 m.

La ricostruzione in back-analysis dell'evento, mostra che l'area di invasione approssima molto bene quella individuata da ARPA Piemonte.

Analizzando il raster delle energie cinetiche medie (Figura 7-12), si nota che l'intensità maggiore che sviluppa il fenomeno, presente solo in pochissime aree di ridotta

superficie, è pari a 882 kJ e che la maggior parte delle traiettorie investe il versante fino al raggiungimento della strada per poi invaderla con un certo numero di blocchi. Altri blocchi proseguono più avanti verso valle arrestandosi nella porzione di versante tra la S.P. 169 e la S.P. 170; solo uno di essi si ferma proprio sulla S.P. 170 (Figura 7-13).

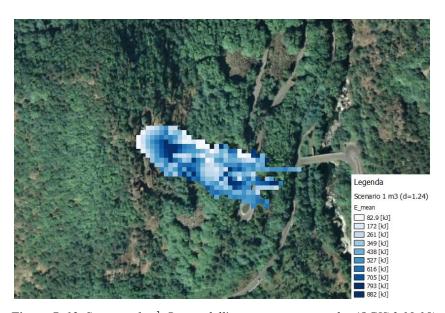


Figura 7–12. Scenario 1 m³-Raster dell'energia cinetica media (QGIS 2.18.15)



Figura 7–13. Scenario 1 m³-Raster della distribuzione dei depositi

L'effetto complessivo è quello di un crollo caratterizzato da energie cinetiche massime (99° percentile) piuttosto settoriali, di intensità massima pari a circa 1500 kJ, e riscontrabili in prossimità di due aree facenti parte della zona di trasporto e nella zona terminale di due delle diramazioni che seguono i blocchi durante il moto verso valle. Solo poche regioni, di ridottissime dimensioni, sviluppano l'energia cinetica massima registrata nella simulazione, il cui valore sfiora i 2000 kJ (Figura 7-14).



Figura 7–14. Scenario 1 m³-Raster delle energie cinetiche al 99° percentile

L'andamento delle velocità (Figura 7-15) segue quello delle energie cinetiche al 99° percentile, raggiungendo negli stessi settori le velocità più elevate con pochi picchi di 37,1 m/s che si trovano nella parte alta della zona di trasporto. Le velocità poi decrescono durante il moto fino ai punti di arresto.

In Figura 7-16 si evidenzia che la maggior parte delle altezze di rimbalzo si assesta attorno i 0,62 m, superato il primo settore al di sotto della parete da cui ha origine il distacco, in cui si hanno rimbalzi di circa 0,8 m. Le altezze più elevate, tra 1,2 m e 1,4 m, si registrano in pochi punti localizzati ai margini laterali della propagazione.

Si può verificare che nelle aree dove si riscontra il valore più basso, il blocco segue un moto di rotoscivolamento.

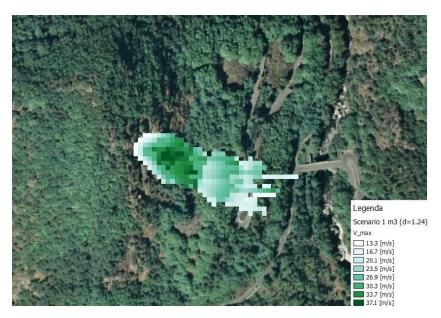


Figura 7–15. Scenario 1 m³-Raster delle velocità

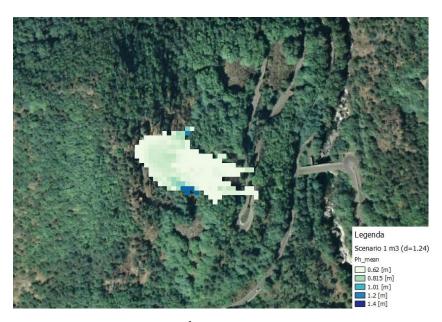


Figura 7–16. Scenario 1 m³-Raster delle altezze medie di rimbalzo

7.2.1 Risultati delle analisi con collettore

Anche per lo scenario da 1 m³ sono state inserite nelle analisi due barriere di calcolo virtuali, poichè il crollo ha interessato la viabilità; è necessario per questa ragione raccogliere maggiori informazioni riguardo i dati di velocità, energia cinetica e altezza di rimbalzo.

I collettori sono stati locati nelle stesse posizioni dello scenario da 2 m 3 ($\P6.3$).

In corrispondenza della barriera in posizione 1 si sono ottenute le frequenze cumulate di velocità, energia cinetica ed altezza di rimbalzo in Figura 7-17, Figura 7-18 e Figura 7-19.

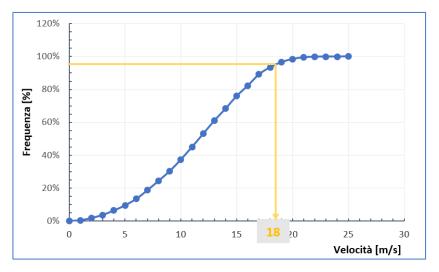


Figura 7–17. Scenario 1 m³ - Frequenza cumulata delle velocità (barriera 1)

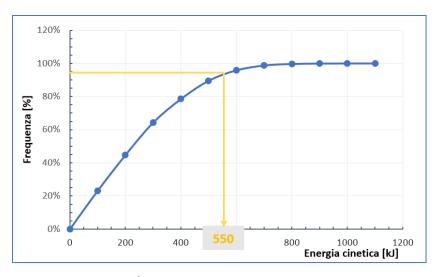
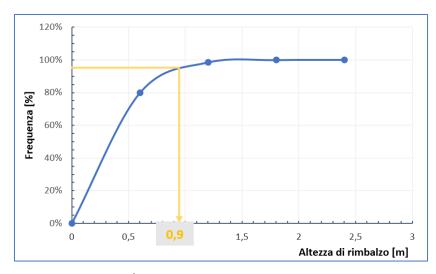


Figura 7–18. Scenario 1 m³-Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera 1)



 $\it Figura~7-19.~Scenario~1~m^3$ - $\it Frequenza~cumulata~delle~altezze~di~rimbalzo~(barriera~1)$

Questi grafici mostrano come, in corrispondenza del collettore 1, al frattile del 95% vi siano velocità ed energie cinetiche elevate ma realistiche per un blocco di tali dimensioni ed un moto del blocco che corrisponde a rotoscivomalemto o piccoli rimbalzi.

In corrispondenza del collettore 2, in prossimità della viabilità provinciale, si riscontrano le frequenze cumulate graficate in Figura 7-20, Figura 7-21 e Figura 7-22, rispettivamente inerenti a velocità, energia cinetica ed altezza di rimbalzo.

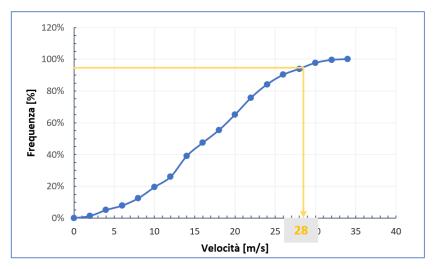


Figura 7–20. Scenario 1 m³ - Frequenza cumulata delle velocità (barriera 2)

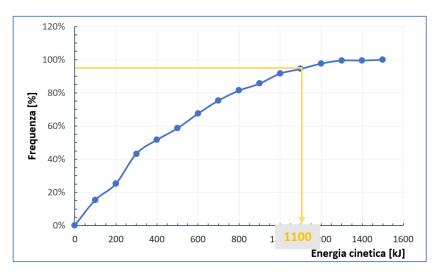


Figura 7–21. Scenario 1 m³ - Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera 2)

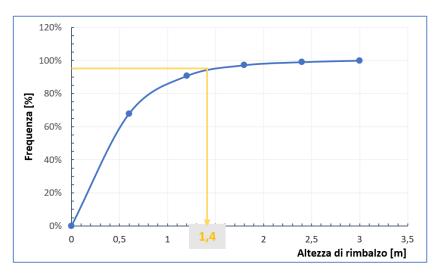


Figura 7–22. Scenario 1 m³ - Frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo (barriera 2)

In questo caso si sono ottenuti valori dei tre parametri molto più elevati di quelli avuti in prossimità del collettore in posizione 1. Così come era già stato mostrato con lo scenario da 2 m³.

Le frequenze assolute, per entrambi i collettori, sono consultabili in Allegato 4.

7.3 Scenario 3 – blocco da 10 m³

La simulazione dello scenario 3 prende in considerazione blocchi di grande volumetria $(V = 10 \text{ m}^3)$, modellati con forma sferica di raggio r = 1,33 m.

La ricostruzione in back-analysis, mostra che l'area di invasione dell'evento del 16 marzo 2011 individuata da ARPA Piemonte, viene sovrastata con l'avanzamento di blocchi fino il ponte Rabbioso.

Analizzando il raster delle energie cinetiche medie (Figura 7-23), si nota che l'intensità maggiore che sviluppa il fenomeno, presente solo in pochissime aree di ridotta superficie, è pari a 12500 kJ, intensità estremamente elevate, e che tutte le traiettorie investono il versante fino al raggiungimento del ponte Rabbioso e del Torrente Germanasca.

In Figura 7-24 è visibile la distribuzione degli accumuli di frana. Il numero maggiore si arresta nella regione alto-centrale della zona di trasporto ma un gran numero di blocchi prosegue la discesa arrestandosi in modo omogeneo lungo il versante fino la S.P. 170. Al di là di questa strada alcuni blocchi si distribuiscono al piede del versante raggiungendo il letto del torrente ed il ponte.

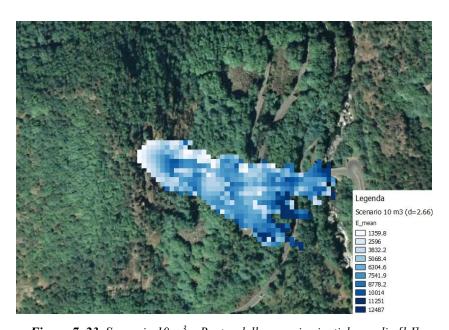


Figura 7–23. Scenario 10 m³ – Raster delle energie cinetiche medie [kJ]



Figura 7–24. Scenario 10 m³ - Raster della distribuzione dei depositi

L'effetto complessivo è quello di un crollo caratterizzato da energie cinetiche massime (99° percentile) di intensità pari a circa 16000 kJ, e riscontrabili per quasi la totalità della propagazione, ad eccezione della zona in prossimità della nicchia di distacco, una piccola regione centrale della zona di trasporto e ridotte porzioni localizzate dalla parte bassa ai piedi del versante. Solo poche aree di ridotte dimensioni sviluppano l'energia cinetica massima registrata nella simulazione, il cui valore sfiora i 20000 kJ. Queste aree si distribuiscono ai margini del corpo di frana. (Figura 7-25)

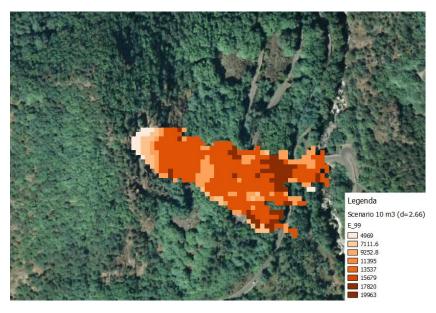


Figura 7–25. Scenario 10 m³ - Raster delle energie cinetiche al 99° percentile [kJ]

L'andamento delle velocità massime (Figura 7-26) segue quello delle energie cinetiche al 99° percentile, raggiungendo nelle stesse aree le velocità più elevate con pochi picchi di 38,1 m/s che si trovano nella parte alta della zona di trasporto, al di sotto della parete rocciosa da cui ha origine il crollo e in una piccola area sulla destra prima di giungere al ponte. Ad eccezione di questa zona, dopo la prima area a massima velocità, si ha che l'intensità di questo parametro risulta piuttosto varia nel moto verso valle.

In Figura 7-27 si evidenzia che la maggior parte delle altezze di rimbalzo si assesta attorno 1,33 m. Rimbalzi di circa 2,3 m si riscontrano al di sotto della nicchia di distacco, nella parte centrale della zona di trasporto e nelle zone terminali delle tre diramazioni. Le altezze più elevate, tra 4,4 m e 5,4 m, si registrano in pochi punti localizzati; in particolare nella diramazione che seguono i blocchi che impattano su ponte Rabbioso.

Si può verificare che nelle aree dove si riscontra il valore più basso, il blocco segue un moto di rotoscivolamento.



Figura 7–26. Scenario 10 m³ - Raster delle velocità massime [m/s]

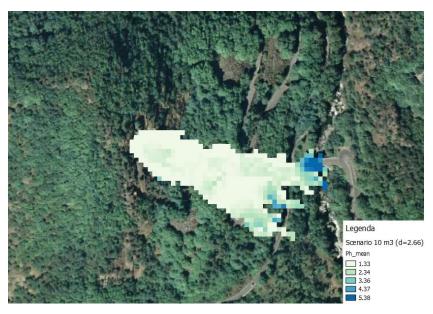


Figura 7–27. Scenario 10 m³ - Raster delle altezze medie di rimbalzo [m]

7.3.1 Risultati delle analisi con collettore

Anche per lo scenario da 10 m³ sono state inserite nelle analisi due barriere di calcolo virtuali, poichè il crollo ha interessato la viabilità, è necessario per questa ragione raccogliere maggiori informazioni riguardo i dati di velocità, energia cinetica e altezza di rimbalzo coinvolti durante il crollo.

I collettori sono stati locati nelle stesse posizioni dello scenario da 2 m³ (¶6.3).

In corrispondenza della barriera in posizione 1 si sono ottenute le frequenze cumulate di velocità, energia cinetica ed altezza di rimbalzo in Figura 7-28, Figura 7-29 e Figura 7-30.

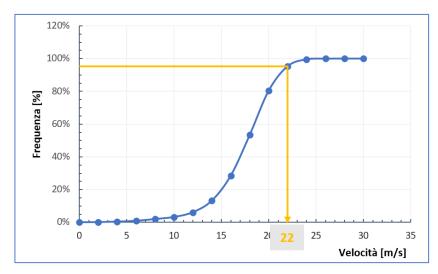


Figura 7–28. Scenario 10 m³ - Frequenza cumulata delle velocità (barriera 1)

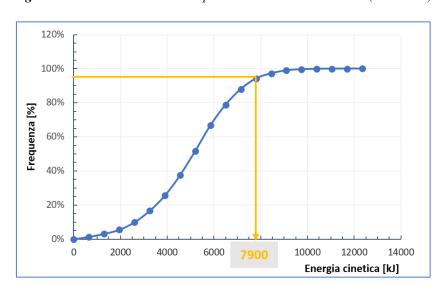


Figura 7–29. Scenario 10 m³ - Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera 1)

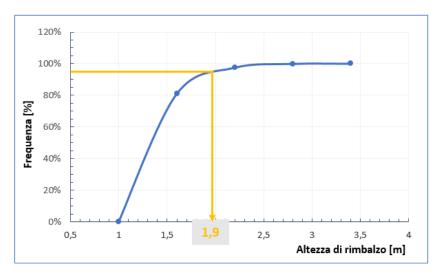


Figura 7–30. Scenario 10 m³ - Frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo

Questi grafici mostrano come, in corrispondenza del collettore 1, al frattile del 95% vi siano velocità ed energie cinetiche molto elevate ma realistiche per un blocco di tali dimesioni ed un moto del blocco che corrisponde a quello di rotoscivolamento o piccolo rimbalzi, essendo la cumulate delle altezze di rimbalzo pari a 1,9 m e quindi altezza di poco maggiore del raggio del blocco.

In corrispondenza del collettore 2, in prossimità della viabilità provinciale, si riscontrano le frequenze cumulate graficate in Figura 7-31, Figura 7-32 e Figura 7-33, rispettivamente inerenti a velocità, energia cinetica ed altezza di rimbalzo.

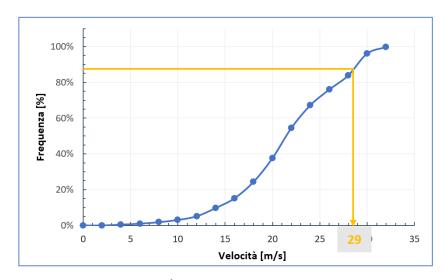


Figura 7–31. Scenario 10 m³ - Frequenza cumulata delle velocità (barriera 2)

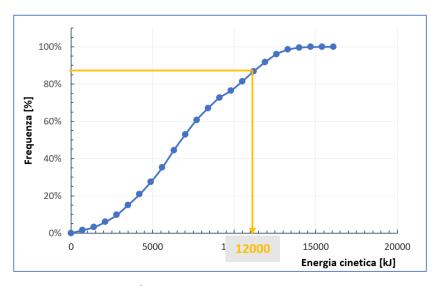


Figura 7–32. Scenario 10 m³ - Frequenza cumulata delle energie cinetiche (barriera 2)

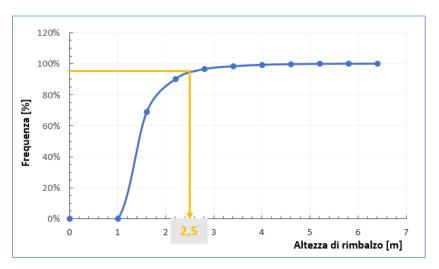


Figura 7–33. Scenario 10 m³ - Frequenza cumulata delle altezze di rimbalzo (barriera 2)

In questo caso si sono ottenuti valori dei tre parametri molto più grandi di quelli avuti in prossimità del collettore in posizione 1. Così come era già stato mostrato con lo scenario da 2 m³.

Le frequenze assolute, per entrambi i collettori, sono consultabili in Allegato A4.

7.4Confronto dei risultati ottenuti per i vari scenari

Un opportuno confronto può essere effettuato paragonando i risultati delle diverse volumetrie in termini di frequenza cumulata delle energie cinetiche e distribuzione dei depositi/punti di arresto.

Si è deciso di rappresentare solo le frequenze cumulate delle energie cinetiche in corrispondenza della barriera in posizione 1 (Figura 7-34) poichè gli andamenti in corrispondenza della barriera 2 portano alle stesse conclusioni.

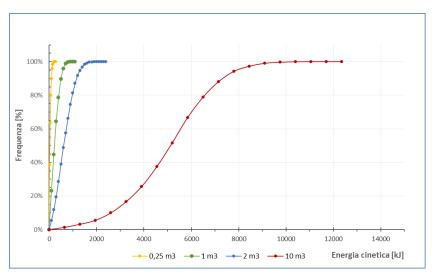


Figura 7–34. Confronto delle frequenze cumulate delle energie cinetiche tra le varie classi volumetriche (barriera 1)

In Figura 7-34 è evidente come ad un aumento di volumetria del blocco segue un aumento dell'energia cinetica. In particolare al frattile del 95% corrispondono traiettorie con energie cinetiche inferiori a 120 kJ, 550 kJ, 1300 kJ e 7900 kJ rispettivamente per le classi volumetriche da 0,25 m³, 1 m³, 2 m³ e 10 m³. Le curve appaiono con la classica forma di una frequenza cumulate ed hanno andamento continuo, grazie al gran numero di traiettorie individuate in prossimità del collettore, mentre con il passaggio da una volumetria più piccola ad una più grande le curve divengono man mano meno ripide.

Il confronto delle frequenze cumulate in corrispondenza della barriera 2 può essere consultato in <u>Allegato A4</u>.

Per quanto riguarda la distribuzione dei blocchi durante il moto lungo il versante, in Figura 7-35 si evidenzia come si incrementi l'area degli arresti con l'aumento del volume. In particolare in Figura 7-36 si nota che blocchi a volumetria maggiore arrivano più lontano mentre massi a minor volume compiono percorsi più brevi.

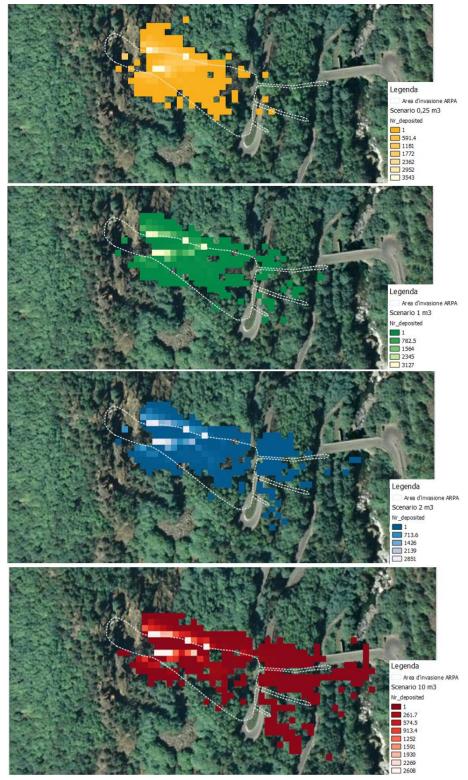


Figura 7–35. Confronto della distribuzione dei depositi e dei punti di arresto per le varie classi volumetriche

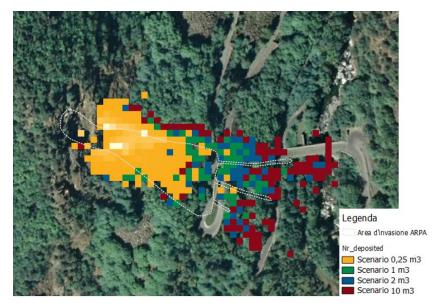


Figura 7–36. Sovrapposizione delle distribuzioni dei depositi

Un ultimo confronto può essere effettuato paragonando per le varie classi volumetriche i risultati al 95° percentile di energia cinetica, velocità ed altezza di rimbalzo in corrispondenza dei collettori 1 e 2.

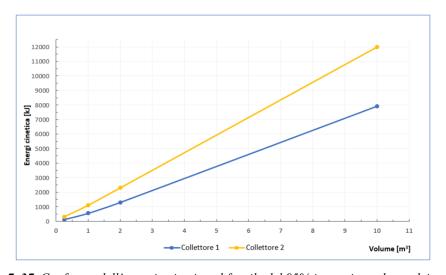


Figura 7–37. Confronto dell'energia cinetica al frattile del 95% in corrispondenza dei collettori

In Figura 7-37 si evidenza un andamento dell'energia cinetica crescente quasi linearmente, per entrambi collettori. Mentre per la velocità (Figura 7-38) il parametro segue piccoli aumenti per volumi ridotti in prossimità del collettore 1 e piccolo decremento in corrispondenza del collettore 2. Per volumi tra 2 m³ e 10 m³ si ha invece un comportamento quasi costante.

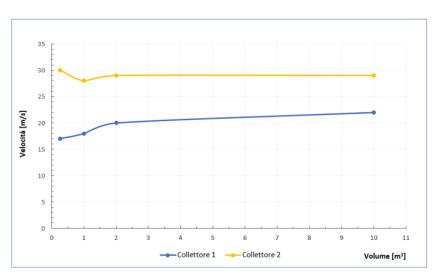


Figura 7-38. Confronto della velocità al frattile del 95% in corrispondenza dei collettori

Per quanto riguarda il paragone tra le altezze di rimbalzo (Figura 7-39), i valori graficati sono stati depurati della misura del raggio del blocco per tutti i volumi. In questo modo i dati letti corrispondono all'effettivo valore del rimbalzo.

Ai due collettori si ottiene un comportamento nettamente diverso: al collettore 1 si evince che man mano che aumenta la volumetria, aumentano anche le altezze di rimbalzo. In particolare, per un volume da 0,25 m³ i blocchi arrivano al collettore con moto di rotolamento. Al collettore 2, per piccoli volumi si ha quasi un andamento costante delle altezze, che poi aumentano notevolmente superati i 2 m³.

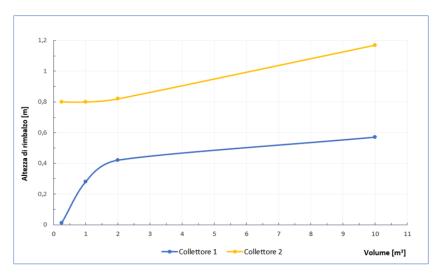


Figura 7–39. Confronto dell'altezza ri rimbalzo al frattile del 95% in corrispondenza dei collettori

8. Proposta di intervento

Gli interventi atti alla protezione da un evento di caduta massi consentono al fenomeno stesso di verificarsi ma di controllarne la dinamica; il loro scopo è quello di arrestare la caduta dei blocchi, o in alcuni casi di rallentarla, durante il suo moto a valle, prima che impatti un elemento a rischio (infrastrutture viarie, abitazioni, vite umane, etc).

«La scelta del tipo di opera di sostegno deve essere effettuata in base alle dimensioni e alle esigenze di funzionamento dell'opera, alle caratteristiche meccaniche dei terreni in sede e di riporto, al regime delle pressioni interstiziali, all'interazione con i manufatti circostanti, alle condizioni generali di stabilità del sito.» (NTC, 2018)

Questi interventi si differenziano sostanzialmente in base all'entità di assorbimento energetico che posso garantire. Si distinguono in:

- Barriere paramassi a rete;
- Reti in aderenza;
- Rilevati paramassi;
- Gallerie paramassi.

In questo elaborato ci si è soffermati sulle barriere paramassi a rete in quanto si è ritenuto essere l'unico intervento fattibile per il contesto topografico del caso di studio.

8.1 Cenni sulle barriere paramassi a rete

Le barriere paramassi a rete sono strutture di facile installazione che nel corso del tempo si sono dimostrate efficienti e flessibili per la protezione di infrastrutture viarie. I livelli energetici standard di applicazione vanno da 100kJ a 8000kJ.

Il riferimento europeo per il loro utilizzo è costituito dalle linee guida ETAG027, che definisce il prodotto da costruzione e ne regola le prestazioni attraverso dei requisiti essenziali che devono essere rispettati per renderne conforme l'utilizzo.

Il prodotto da costruzione è definito "kit" e consiste di diverse componenti che sono immesse sul mercato con una marcatura CE comune, montate nelle opere, a costituire un "sistema assemblato". Le barriere paramassi devono consistere di uno o più moduli funzionali identici in sequenza, che permettano di adeguare la lunghezza di una barriera alla parete inclinata e alla struttura da proteggere. Ogni modulo di funzionamento deve:

- prevedere la agevole sostituzione di ogni componente e permettere la sostituzione di ogni elemento danneggiato;
- prevedere l'agevole montaggio della struttura a terra e una semplice costruzione in loco.

Il contenuto minimo del kit cui ETAG fa riferimento è di 3 moduli funzionali (3FM). 3FM significa 3 campi di strutture a rete e 4 montanti. L'interasse dei montanti non è prestabilito, e deve essere deciso dal produttore.

Una barriera paramassi è composta da:

- una struttura di intercettazione, che ha la funzione di sostenere l'impatto diretto del blocco, deformandosi in modo elastico e/o plastico, e di trasmettere le tensioni alle strutture di connessione e di supporto e alle fondazioni;
- una struttura di supporto, che ha la funzione di mantenere tesa la struttura di intercettazione, per sua natura non rigida. Può essere collegata alla struttura di intercettazione direttamente o attraverso una struttura di connessione;
- elementi di connessione, che hanno la funzione di trasmettere le tensioni alle fondazioni. Per consentirne la deformazione possono essere installati meccanismi che permettano un allungamento graduale.

Le fondazioni non sono considerate parte del kit. Il progetto delle fondazioni è responsabilità del progettista, che è tenuto ad attenersi alle disposizioni di legge nazionali.

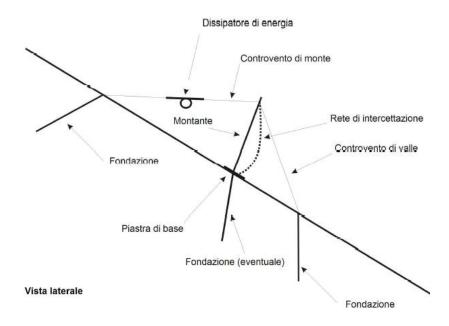


Figura 8-1. Schema laterale barriera paramassi a rete, vista laterale (ETAG027,2008)

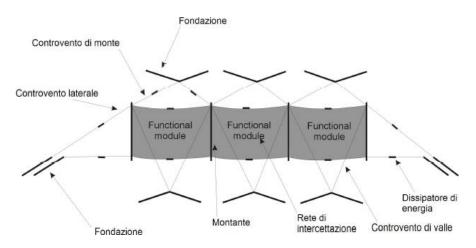


Figura 8–2. Schema frontale barriera paramassi a rete (ETAG027, 2008)

L'ETAG027 stabilisce le metodologie di prova di collaudo e dei metodi di verifica per assicurare che tutti gli elementi garantiscano la sua "fit for use" attraverso:

- Identificazione di tutti i componenti del sistema assemblato;
- Identificazione delle caratteristiche che devono essere certificate;
- Definizione dei metodi di verifica e valutazione;
- Definizione di valori soglia che devono essere rispettati per motivi tecnici;
- Prove di identificazione dei componenti della barriera;

Approvazione del Controllo di Produzione in Fabbrica (CPF).

Per permettere un uso corretto di una barriera paramassi in condizioni sicure ed affidabili l'utilizzatore deve conoscere:

- L'energia che la barriera può assorbire in condizioni di sicurezza ed il comportamento durante l'impatto (per esempio energia e altezza residua);
- Il massimo spostamento verso valle della struttura durante l'impatto;
- I carichi agenti sulle fondazioni e sugli elementi strutturali durante l'impatto.

Perché i sistemi assemblati godano della conformità d'uso devono passare due verifiche a differenti livelli energetici:

- SEL (Livello di Energia di Servizio): l'energia cinetica di un blocco omogeneo e regolare che impatta la rete della barriera considerata;
- MEL (Livello Massimo di Energia): l'energia cinetica di un blocco omogeneo e regolare che impatta la barriera considerata, con:

$$MEL = 3 \cdot SEL \tag{8.1}$$

Sulla base dei due livelli energetici SEL e MEL si classificano le barriere paramassi a rete (Tabella 8-1):

Tabella 8-1. Classificazione barriere paramassi

ENERGY LEVEL CLASSIFICATION	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

8.2 Linee guida progettuali

Per progettare una barriera paramassi a rete, la norma stabilisce di definire 5 parametri di progetto:

 Velocità di progetto: è definita come la velocità corrispondente al frattile del 95% delle velocità calcolate (v_t) tramite simulazioni di propagazione, moltiplicata per un fattore di sicurezza γ_F. La velocità di progetto si esprime:

$$v_p = v_t \cdot \gamma_F \tag{8.2}$$

Con:

- γ_F = fattore di sicurezza, valutabile come:

$$\gamma_F = \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp} \tag{8.3}$$

Dove:

- γ_{Tr} = coefficiente di attendibilità dei calcoli delle traiettorie che vale:
 - γ_{Tr} =1,02 per calcoli bidimensionali o tridimensionali calibrati sulla base di una back-analysis;
 - $\gamma_{Tr} = 1,1$ per calcoli bidimensionali basati solo su coefficienti di restituzione derivati da informazioni bibliografiche.
- γ_{Dp} = coefficiente di attendibilità della discretizzazione del pendio che vale:
 - γ_{Dp} =1,02 per pendii discretizzati con una buona precisione sulla base
 di un rilievo topografico effettuato in modo accurato;
 - $\gamma_{Dp} = 1,1$ per pendii con grado di descretizzazione medio-bassa.
- Massa del blocco di progetto: è la massa calcolata come:

$$m_p = (Vol_b \cdot \gamma) \cdot \gamma_m \tag{8.4}$$

Dove:

- $-\gamma$ = peso per unità di volume della roccia in posto;
- Vol_b = volume del blocco di progetto;
- γ_m = fattore di sicurezza espresso come:

$$\gamma_m = V_{vol,F1} \cdot \gamma_{\gamma} \tag{8.5}$$

Con:

- γ_{γ} = coefficiente legato alla valutazione del peso dell'unità di volume della roccia (assunto generalmente pari a 1,0);
- γ_{vol,F1} =coefficiente per la precisione del rilievo volumetrico del "blocco di progetto", scelto pari a:
 - $\gamma_{\text{vol},F1} = 1,02$ per rilievi accurati della parete rocciosa;
 - $\gamma v_{ol,F1} = 1,1$ in assenza di rilievi finalizzati al progetto.
- Energia cinetica di progetto: è l'energia del blocco di progetto che si muove alla velocità di progetto calcolata:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v_p^2 \tag{8.6}$$

Altezza d'intercettazione di progetto: altezza di passaggio dei blocchi rispetto
 al pendio corrispondente al frattile del 95% delle possibili traiettorie (h_t):

$$h_p = h_t \cdot \gamma_F \tag{8.7}$$

Data l'altezza di intercettazione di progetto si deve poi addizionare un franco di sicurezza (f) che avrà come minimo valore diametro medio del blocco (Figura 8-3).





Figura 8-3. Schema dell'altezza di intercettazione di progetto (Barbero, 2016)

 Deformata massima di progetto: è il valore massimo calcolato per la barriera scelta da catalogo. Si definisce come:

$$d_A = d_{max,MEL} \cdot \gamma_D \tag{8.8}$$

Dove:

- d_{max,MEL} = valore della deformata della barriera definito durante la prova in vera grandezza (crash test) a livello energeticoMEL;
- $-\gamma_D$ = fattore di sicurezza che tiene conto delle condizioni di impatto e vale:
 - $\gamma_D = 1,3$ nel caso sia disponibile solo il valore misurato nella prova sperimentale al livello energetico MEL;
 - $\gamma_D = 1,5$ nel caso le campate di estremità fossero comprese nell'area delle possibili traiettorie o la barriera avesse meno di tre moduli funzionali;
 - γ_D = 1,0 nel caso il progetto sia fatto considerando il livello energetico SEL.

Calcolati i parametri di progetto si potrà valutare se progettare tenendo in considerazione il livello MEL o il livello SEL:

«Se sono possibili eventi ripetuti e distinti nel tempo ad alti livelli energetici, si potrà considerare di installare più allineamenti subparalleli di barriere e la progettazione, sotto queste ipotesi di partenza, deve fare riferimento al livello energetico MEL, al quale andrà applicato un adeguato fattore di sicurezza. Il livello energetico SEL consente invece di verificare che il sistema di intercettazione sia in grado di intervenire efficacemente anche per controllare eventi di minore entità rispetto a quelli indotti dal blocco di progetto, ma con maggior frequenza di accadimento, senza che sia necessario realizzare, tra un evento e l'altro, importanti interventi di ripristino o di manutenzione.» (Barbero, 2015)

Scelto il livello energetico di progettazione e scelta la barriera paramassi da catalogo, i valori di progetto di energia, altezza di intercettazione e massima deformazione dovranno essere verificati.

L'energia dissipabile in condizioni di sicurezza dalla barriera deve essere superiore all'energia di progetto cioè all'energia del blocco di progetto che si muove alla velocità calcolata, come:

$$E_p - \frac{E_{BTE}}{\gamma_E} \le 0 \tag{8.9}$$

Dove:

- E_{BTE} = energia dissipabile così come desumibile dal Benestare Tecnico
 Europeo ovvero dalla certificazione delle prove al vero;
- γ_E = fattore di sicurezza da applicare al livello energetico MEL:
 - γ_E =1,2 nel caso sia disponibile solo il valore energetico dedotto dalle prove sperimentali in vera grandezza e certificati nel BTE;
 - $\gamma_E = 1$ in caso di verifica effettuata al livello SEL.

L'altezza di intercettazione (h_i) , definita come l'altezza della barriera misurata ortogonalmente alla pendenza media del pendio nella zona di montaggio depurata del

franco superiore della barriera, definito dal produttore, deve essere superiore all'altezza di progetto cioè all'altezza calcolata di passaggio dei blocchi (h_D):

$$h_p - h_i \le 0 \tag{8.10}$$

La massima deformata della barriera quando sottoposta ad un urto con livello energetico MEL moltiplicata per un fattore di sicurezza (d_A) , deve essere inferiore alla distanza di progetto tra l'opera (eventualmente) da proteggere e la barriera (d_p) :

$$d_p - d_A \ge 0 \tag{8.11}$$

8.3 Scelta della barriera paramassi

Nel <u>Capitolo 6</u> (¶6.3) sono state avviate due distinte simulazioni con collettore, individuando, per ciascuna barriera virtuale, il numero dei blocchi che lo oltrepassano e le rispettive energie cinetiche, velocità e altezze di rimbalzo.

Al fine di individuare la scelta più opportuna di posizionamento della barriera, non solo da un punto di vista energetico ma anche economico e di sicurezza, sono state scelte, e successivamente dimensionate, due barriere a differente capacità di assorbimento energetico, a seconda della richiesta dell'analisi.

8.4 Dimensionamento e verifica delle fondazioni

Il "kit" della barriera paramassi, descritto nel ¶7.1, viene messo in commercio con dimensioni standard di pannelli e montanti. Le opzioni standard fornite con il "kit" sono progettate sulla base di assunzioni di carattere generale; mentre le caratteristiche della fondazione (lunghezza e diametro di perforazione), possono essere modificate e progettate secondo necessità specifiche.

La fondazione è costituita da tiranti di ancoraggio permanenti, cioè "elementi strutturali opportunamente collegati al terreno o alla roccia, in grado di sostenere forze di trazione". (NTC, 2018)

Il dimensionamento dei tiranti, in questo elaborato, è stato eseguito con il metodo di Bustamante e Doix del 1985.

Questo metodo prevede di calcolare:

- La sezione dell'armatura del tirante (S_d): il calcolo della sezione dell'armatura viene eseguito dal progettista sulla base del massimo tiro atteso alla fondazione. Tale valore è fornito dal produttore;
- La lunghezza libera del tirante (L_L): per una barriera paramassi, l'ancoraggio è cementato per tutta la lunghezza, quindi non si prevede una lunghezza libera.
- La lunghezza del bulbo di ancoraggio (L_s): il bulbo di ancoraggio deve garantire che non si verifichino due tipi di rottura: lo sfilamento dell'armatura dalla malta cementizia e lo sfilamento della fondazione dal terreno. Solitamente non si procede alla prima verifica, perchè le miscele cementizie adottate per l'esecuzione del bulbo offrono una resistenza al contatto con l'acciaio intorno ai 2 MPa, incrementata dalla scabrezza dei fili e delle eventuali barre ad aderenza migliorata (<u>Bustamante e Doix, 1985</u>); mentre per la verifica dello sfilamento della fondazione dal terreno si procede attraverso la [Equazione (8.14)].

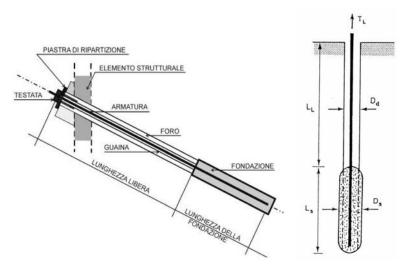


Figura 8-4. Schemi di tirante di ancoraggio (www.ingegneri.cc, 2012; Barbero, 2015)

In Figura 8-4 sono rappresentate le schematizzazioni di un tirante e le relative componenti, il cui valore si ottiene come segue:

- D_D = diametro di perforazione, definito nella scheda tecnica dal produttore;
- D_S = diametro del bulbo di ancoraggio così calcolato:

$$D_S = D_D \cdot \alpha \tag{8.12}$$

Il coefficiente α è un parametro legato alle caratteristiche del materiale ed al tipo di iniezione della malta.

In questo elaborato è stato individuato il valore caratteristico di α dall'incrocio tra la roccia alterata o frammentata e l'iniezione IGU (Injection Globale Unique). (Tabella 8-2)

Tabella 8–2. Valori caratteristici di α (Bustamanate e Doix, 1985)

SOLS	Coeffi	cient α .	Quantité minimale de coulis conseillée V _i		
3013	IRS*	IGU**			
Grave Grave sableuse Sable graveleux Sable grossier Sable moyen Sable fin Sable limoneux	1.8 1.6 à 1.8 1.5 a 1.6 7.4 à 1.5 1.4 à 1.5 1.4 à 1.5 1.4 à 1.5	1.3 à 1.4 1.2 à 1.4 1.2 à 1.3 1.1 à 1.2 1.1 à 1.2 1.1 à 1.2 1.1 à 1.2	1.5 V; 1.5 V; 1.5 V; 1.5 V; 1.5 V; 1.5 V; 1.5 d 2 V; pour IRS {1.5 d 2 V; pour IGU		
Limon Argile	1,4 à 1,6 1,8 à 2	1,1 à 1,2 1,2	\ 2 \ V, pour IRS \ \ 1.5 \ V, pour IGU \ \ 2.5 \ \ \ 3 \ V, pour IGU \ \ 1.5 \ \ \ 2 \ V, pour IGU		
Marne Marno-calcaire Craie altérée ou fragmentée	1,8 1,8 1,8	1,1 à 1,2 1,1 à 1,2 1,1 à 1,2	1.5 à 2 V, pour couche compacte 2 à 6 V, ou plus, si couche fracturée		
Rocher altéré ou fragmenté	1,2	1,1	1,1 à 1,5 V, si couche finement fissurée 2 ou plus si couche fracturée		

L_S = lunghezza del bulbo di ancoraggio valutata come:

$$T_L = \pi \cdot D_S \cdot L_S \cdot q_S \longrightarrow L_S = \frac{T_L}{\pi \cdot D_S \cdot q_S}$$
 (8.13)

Dove:

- T_L = massima azione di progetto a cui è soggetto il tirante, definito sulla scheda tecnica dal produttore, sulla base del crash test in vera grandezza;
- q_S = resistenza attritiva sulla superficie laterale del bulbo, legata al tipo di materiale e alla sua pressione interna e alla tipologia di iniezione.
 È valutata, dopo aver scelto il tipo di abaco da utilizzare (Tabella 8-3), in modo grafico (Figura 8-5).

In questo elaborato è stato utilizzato R2, (roccia alterata o frammentata, iniezione IGU) (Tabella 8-3); si è assunto p_i = 3 MPa, ottenendo q_s = 0,36 MPa dal grafico in Figura 8-5.

Tabella 8–3. Scelta dell'abaco in base al materiale (Bustamante e Doix, 1985)

	Mode d'injection				
SOLS	IRS*	IGU**			
Grave Grave sableuse Sable graveleux Sable grossier Sable moyen Sable fin Sable limoneux	SG.1	SG.2			
Limon Argile	AL.1	AL.2			
Marne Marno-calcaire Craie altérée ou fragmentée	MC.1	MC.2			
Rocher altéré ou fragmenté	≽ R.1	≽ R.2			
• : avec $p_i \geqslant p_i$ • • : avec 0,5 $p_i < p_i < p_i$					

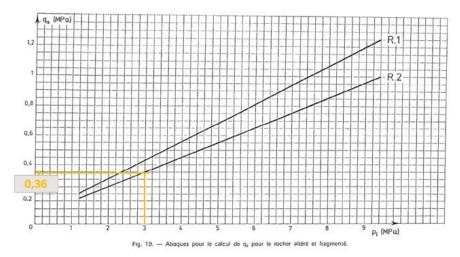


Figura 8–5. Grafico per la valutazione di qs in ammassi rocciosi (Bustamanate e Doix, 1985)

Determinata la lunghezza di ancoraggio, occorrerà eseguire le verifiche allo stato limite ultimo sui tiranti di ancoraggio, prescritte al Capitolo 6, ¶6.6.2 delle NTC2018 (stralcio in <u>Allegato A9</u>).

La norma prescrive che per il dimensionamento geotecnico deve essere rispettata la condizione secondo cui le azioni di progetto (E_d) devono essere inferiori, o al limite uguali, alle resistenze di progetto (R_d).

$$E_d \le R_d \tag{8.14}$$

E che « Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine. Gli stati limite ultimi dei tiranti di ancoraggio si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che li compongono.» (NTC, 2018)

Le verifiche da effettuare sono tre:

- Verifica dell'interfaccia malta-acciaio;
- Verifica dell'interfaccia malta-terreno;
- Verifica della resistenza dell'armatura.

Generalmente la prima verifica può considerarsi già soddisfatta in quanto le miscele cementizie adottate per l'esecuzione del lavoro offrono resistenze al contatto con l'acciaio abbastanza alte (circa 2 MPa).

Per quanto riguarda le verifiche dell'interfaccia malta-terreno e della resistenza dell'armatura, si segue l'approccio dato dalla combinazione A1+M1+R3, tenendo in considerazione i coefficienti parziali, definiti in color arancio, nelle Tabelle 8-4, 8-5, 7-6.

Tabella 8-4. Coefficienti parziali azioni (NTC, 2018)

		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
Azione	Effetto	Coeff. parziale $(\gamma_F \circ \gamma_E)$	EQU	A1	A2
Carichi permanenti G1	Favorevole		0,9	1,0	1,0
Cariciii permanenti G1	Sfavorevole	Y _{G1}	1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti G2	Favorevole		0,8	0,8	0,8
Cariciii permanenti G2	Sfavorevole	Y G2	1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole		0,0	0,0	0,0
AZIOIII Variabili Q	Sfavorevole	γ Qi	1,5	1,5	1,3

Tabella 8–5. Coefficienti parziali per I parametri geotecnici del terreno (NTC, 2018)

Parametro	Grandezza a cui applicare il coef.	Coeff. parziale Үм	M1	M2
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	tan φ' _k	γ _{φ'}	1,0	1,25
Coesione efficace	c' _k	γc'	1,0	1,25
Resistenza non drenata	C _{uk}	Ycu	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γγ	Υγ	1,0	1,0

Tabella 8–6. Coefficienti parziali di resistenza dell'ancoraggio (NTC, 2018)

Tipo di ancoraggio	Simbolo	Coefficiente parziale
Temporanei	Y R	1,1
Permanenti	Ϋ́R	1,2

Nello specifico, per la verifica malta-terreno si utilizza l'espressione (8.22) depurata dai coefficienti parziali, che diventa:

$$T_L \cdot \gamma_F = \frac{\pi \cdot D_S \cdot L_S \cdot q_S}{\gamma_R \cdot \xi} \tag{8.15}$$

Dove per il coefficiente ξ , fattore di correlazione della resistenza, non avendo dati certi, si utilizza il valore in Tabella 7-7, valore più sfavorevole a favore di sicurezza.

Tabella 8–7. Fattori di correlazione per derivare la resistenza da prove geotecniche in funzione del numero dei profili indagati (NTC, 2018)

Numero profili di indagine	1	2	3	4	≥5
ξ	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
ξ	1,80	1,70	1,65	1,60	1,55

La verifica malta-terreno può comunque considerarsi verificata a priori in quanto la lunghezza del bulbo di ancoraggio viene determinata sulla base della formula inversa.

La verifica di resistenza dell'armatura deve esser fatta in condizioni di sfilamento della fondazione dall'ancoraggio secondo e si esegue confrontando la massima azione di progetto E_d con la resistenza di progetto R_d , determinate rispettivamente con le relazioni:

$$E_d = T_L \cdot \gamma_F \tag{8.16}$$

$$R_d = min\left(\frac{f_{p0,1k}}{1,15}; \frac{f_{pk}}{1,35}\right) \tag{8.17}$$

Dove:

- $f_{p0,1k}$ = resistenza a snervamento dell'armatura;
- f_{pk} = resistenza a rottura.

Entrambe sono definite sulla scheda tecnica fornita dal produttore.

8.5 Barriera in posizione 1

8.5.1 Scelta della barriera

I risultati della simulazione con collettore in posizione 1 (<u>Capitolo 6</u>, <u>¶6.3.1</u>) hanno portato a costruire le cumulate di frequenza delle velocità, energie cinetiche e altezze di rimbalzo, in cui, al frattile al 95%, hanno corrisposto, rispettivamente, valori pari a 19,7 m/s (Figura 6-13), 2300 kJ (Figura 6-15) e 1,6 m (Figura 6-17).

Entrando nella Tabella 8-1 con il valore di energia cinetica restituito dall'analisi si definisce la classe energetica della barriera. Si è scelta la classe 4 (1500 kJ) per cui sono state effettuate le verifiche per una barriera con assorbimento energetico fino a 1500 kJ.

A solo titolo di esempio, si è considerata nella presente trattazione, la barriera "MAC.RO. SYSTEM -RB1500- 1500 kJ" prodotta da Officine Maccaferri Italia S.r.l. (Allegato A5).

Utilizzando le equazioni delle linee guida progettuali delle barriere paramassi ($\P 7.2$) si ottengono i seguenti dati:

- Velocità di progetto [Equazioni (8.2), (8.3)]:

$$v_p = 19.7 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 1.02 \cdot 1.1 = 22.1 \left[\frac{m}{s} \right]$$
 (8.18)

- Massa del blocco di progetto [Equazioni (8.4), (8.5)]:

$$m_p = \left(2[m^3] \cdot 2500 \left[\frac{kg}{m^3}\right]\right) \cdot 1,02 \cdot 1,0 = 5500 [kg]$$
 (8.19)

- Energia cinetica di progetto [Equazione (8.6)]:

$$E_p = \left[\frac{1}{2} \cdot 5500[kg] \cdot \left(22,1\left[\frac{m}{s}\right]\right)^2\right] \cdot 10^{-3} = 1343,54[kJ]$$
 (8.20)

- Altezza di intercettazione di progetto [Equazione (8.7)]:

$$h_p = 1.3[m] \cdot 1.02 \cdot 1.1 = 1.45[m]$$
 (8.21)

- Massima deformazione di progetto [Equazione (8.8)]:

$$d_A = 5.8[m] \cdot 1.3 = [m] \tag{8.22}$$

Si è proceduto alle verifiche sull'energia, sulla massima deformazione e sull'altezza di intercettazione utilizzando i dati della prova MEL forniti nella scheda tecnica della casa produttrice in <u>Allegato A5</u>.

Verifica dell'energia cinetica dissipabile dalla barriera in condizioni di sicurezza [Equazione (8.9)]

$$1343,54[kJ] - \frac{1637[kJ]}{1,2} < 0 \longrightarrow = -20,62 \longrightarrow verificato$$

Verifica sull'altezza di intercettazione della barriera [Equazione (8.10)]

$$1,45[m] - 4,0[m] < 0 \longrightarrow = -2,55[m] \longrightarrow verificato$$

Verifica sulla massima deformazione della barriera [Equazione (8.11)]

$$38[m] - 7.54[m] \ge 0 \longrightarrow = +30.46 = [m] \longrightarrow verificato$$

I risultati dei valori di progetto e delle verifiche sono consultabili in Allegato A7.

8.5.2 Dimensionamento dei tiranti con il metodo di Bustamante e Doix

Per la posizione 1 è stata scelta la barriera "MAC.RO. SYSTEM -RB1500- 1500 kJ" prodotta da Officine Maccaferri Italia S.r.l. (¶7.3.1, Allegato A6).

La barriera in posizione 1 è stata dimensionata per una lunghezza di 90 m, con 9 moduli funzionali di interasse pari a 10 m, sulla base delle simulazioni condotte con Rockyfor3D. Sono stati dimensionati i tiranti di monte ed i tiranti laterali, inferiori e superiori, con il metodo di Bustamante e Doix.

Ancoraggio di monte

Per gli ancoraggi di monte sono state scelte barre di acciaio precompresso a filettatura continua Diwidag Y1050H (Figura 7-6, <u>Allegato A10</u>) aventi diametro Φ = 26,5 mm, diametro di perforazione 90 mm e carico massimo di trazione registrato durante la prova MEL pari a T_L = 163,10 kN. (<u>Allegato A5</u>)

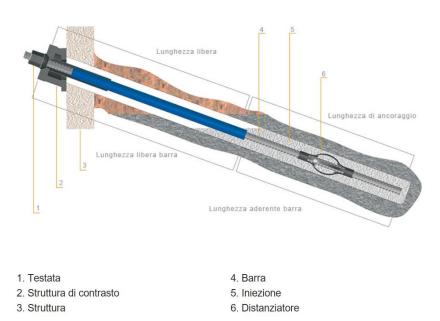


Figura 8-6. Rappresentazione del tirante Diwidag Y1050H (Diwidag System International, 2018)

Individuato il valore del diametro di perforazione, si è calcolato il diametro del bulbo di ancoraggio D_S [Equazione (8.12)]:

$$D_S = 90[mm] \cdot 1,1 = 99[mm] \tag{8.23}$$

Successivamente, è stata calcolata la lunghezza del bulbo di ancoraggio [Equazione (8.13)]:

163,10 [kN] · 1,3 =
$$\frac{\pi \cdot 99[mm] \cdot L_S \cdot 0,36[MPa]}{1,2 \cdot 1,8}$$
 da cui:

$$L_S = \frac{163,10[kN]\cdot 1,3\cdot 1,2\cdot 1,8}{\pi \cdot 99[mm]\cdot 0,36[MPa]} = 4,09[m]$$
(8.24)

Il valore di L_S è stato arrotondato a $L_S = 4.5$ m.

La verifica dell'interfaccia malta-terreno è già soddisfatta.

Per verificare la resistenza dell'acciaio sono state calcolate l'azione di progetto e la resistenza di progetto e successivamente sono stati confrontati i due valori secondo la [Equazione (8.14)].

L'azione di progetto e la resistenza di progetto derivano dalle [Equazioni (8.16), (8.17)]:

$$E_d = 163,10[kN] \cdot 1,3 = 212,03[kN]$$
 (8.25)

$$R_d = min\left(\frac{525[kN]}{1,15}; \frac{580[kN]}{1,35}\right) = 429,63 [kN]$$
(8.26)

La verifica risulta:

212,03
$$kN < 429,63 kN \longrightarrow verificata$$

Ancoraggio laterale

Gli ancoraggi laterali, inferiore e superiore, sono stati dimensionati con eguale lunghezza. Sono state scelte barre di acciaio precompresso a filettatura continua

Diwidag Y1050H (Figura 7-6, <u>Allegato A10</u>) aventi diametro Φ = 26,5 mm, diametro di perforazione 90 mm e carico massimo di trazione registrato durante la prova MEL pari a T_L = 252,60 kN. (<u>Allegato A5</u>)

Il procedimento è il medesimo dell'ancoraggio di monte.

Individuato il valore del diametro di perforazione, si è calcolato il diametro del bulbo di ancoraggio D_S [Equazione (8.12)]:

$$D_{S} = 90[mm] \cdot 1,1 = 99[mm] \tag{8.27}$$

Successivamente, è stata calcolata la lunghezza del bulbo di ancoraggio [Equazione (8.13)]:

252,60 [kN] · 1,3 =
$$\frac{\pi \cdot 99[mm] \cdot L_S \cdot 0,36[MPa]}{1,2 \cdot 1,8}$$
 da cui:

$$L_S = \frac{252,60[kN]\cdot 1,3\cdot 1,2\cdot 1,8}{\pi \cdot 99[mm]\cdot 0.36[MPa]} = 6,33[m]$$
(8.28)

Il valore di L_S è stato arrotondato a $L_S = 6.5$ m.

La verifica dell'interfaccia malta-terreno è già soddisfatta.

Per verificare la resistenza dell'acciaio sono state calcolate l'azione di progetto e la resistenza di progetto e successivamente sono stati confrontati i due valori secondo la [Equazione (8.14)].

L'azione di progetto e la resistenza di progetto derivano dalle [Equazioni (8.16), (8.17)]:

$$E_d = 252,60[kN] \cdot 1,3 = 328,38[kN] \tag{8.29}$$

$$R_d = min\left(\frac{525[kN]}{1,15}; \frac{580[kN]}{1,35}\right) = 429,63 [kN]$$
(8.30)

La verifica risulta:

$$328,38 \, kN < 429,63 \, kN \longrightarrow verificata$$

I risultati e le verifiche per il dimensionamento dei tiranti sono consultabili in Allegato

<u>A11</u>.

8.5.3 Analisi prezzi

Ai fini di offrire un parametro che possa servir da guida sulla scelta più opportuna e

conveniente del posionamento della barriera, è stata effettuata una stima dei costi per

ciascun intervento.

L'analisi è stata condotta grazie all'acquisizione dei prezzi per il "kit" standard fornito

da Officine Maccaferri S.r.l. (Allegato A13) aggiornato in base alle caratteristiche

della barriera in elevazione e per la fondazione dimensionata in questo elaborato.

Analisi prezzi in elevazione

L'analisi in elevazione è stata calcolata tenendo conto delle caratteristiche geometriche

della barriera:

- Altezza: H = 4 m;

- Lunghezza: L = 90 m;

- Interasse montanti: i = 10 m;

- Superficie: $A = 360 \text{ m}^2$.

E del plinto di fondazione:

- Altezza: h = 0.50 m;

- Base: b = 1 = 0.60 m.

Il prezzo calcolato è comprensivo della posa in opera e della manodopera. Nello

175

specifico si tiene conto di:

Tipologia di squadra per l'esecuzione dei lavori: 159,59 [€/h]

·

- Forniture a piè d'opera: 50.778[€]
- Allestimento e tracciamento della barriera: 670,28 [€]
- Formazione dei plinti di fondazione: scavo, cassero, getto e disarmo:
 1.563,98 [€]
- Posa della barriera: 21.223,51 [€]
- Mezzo di trasporto a disposizione in cantiere per la mobilità degli operai:
 511,22 [€]

Per 360 m² di barriera, il prezzo totale è 74.747 [€]; mentre il costo unitario per 1 m² è 207,63 $\left[\frac{\epsilon}{m^2}\right]$.

Aggiungendo il 15% di spese generali ed un utile d'impresa del 10%, si ottiene 262,65 $\left[\frac{\epsilon}{m^2}\right]$.

Analisi prezzi in fondazione

Per effettuare l'analisi prezzi delle fondazioni sono state utilizzate le voci dell'elenco prezzi per le lavorazioni e la fornitura, estratti da <u>www.assoroccia.net</u>.

Si tiene conto di:

- Tipo di terreno su cui si effettua la fondazione: roccia;
- Diametro di perforazione per fondazioni dei montanti: 70 mm;
- Diametro di perforazione per ancoraggi di monte e ancoraggi laterali: 90 mm;
- Numero di montanti; 10;
- Numero totale di ancoraggi di monte: 11;
- Numero totale di ancoraggi laterali: 4.

Nello specifico:

- Perforazione per ancoraggi con diametro fino a 90 mm: 116,30 $\left[\frac{\epsilon}{ml}\right]$;
- Fondazione (L = 2,5 m, D_D = 70 mm): 14.050 [€];

- Ancoraggi di monte (L = 5 m, D_D = 90 mm): 8.965 [€]
- Ancoraggi laterali (L = 6,5 m, D_D = 90 mm): 4.238 [€]

Per un totale di 27.253 $[\mbox{\ensuremath{\notin}}]$ e 73,21 $\left[\frac{\mbox{\ensuremath{\notin}}}{m^2}\right]$.

Sommando i due contributi (prezzo elevazione e prezzo fondazione) si ottiene 335,87 $\left[\frac{\epsilon}{m^2}\right]$.

A questo prezzo dovrà essere sommato il prezzo del trasporto del materiale con elicottero, poiché la posizione 1 risulta non accessibile dalla strada provinciale 169 e si trova a quota circa 955 m s.l.m.

Dal prezziario della Regione Piemonte (estratto in <u>Allegato A15</u>) l'intervento di un elicottero leggero fino a quota 1500 m s.l.m, con portata operativa di 600 kg ad ogni rotazione, si riscontra un prezzo pari a 20,31 $\left[\frac{\epsilon}{min}\right]$.

Una barriera di classe energetica 4 (1500 kJ) ha un peso di circa 5.400 kg, quindi occorreranno 18 rotazioni per compiere in andata e ritorno il trasporto completo di una barriera composta da 9 moduli funzionali.

Resta sconosciuto il tempo necessario per il trasporto poiché non si è a conoscenza della posizione da cui deve partire l'elicottero.

8.6 Barriera in posizione 2

8.6.1 Scelta della barriera

I risultati della simulazione con collettore in posizione 2 (<u>Capitolo 6</u>, <u>¶6.3.2</u>) hanno portato a costruire le cumulate di frequenza delle velocità, energie cinetiche e altezze di rimbalzo, in cui, al frattile al 95%, hanno corrisposto, rispettivamente, valori pari a 29 m/s (Figura 6-20), 2300 kJ (Figura 6-22) e 1,6 m (Figura 6-24).

Entrando nella Tabella 7-1 con il valore di energia cinetica restituito dall'analisi si definisce la classe energetica della barriera. Si è scelta la classe 6 (3000 kJ) per cui, sempre a titolo di esempio, sono state effettuate le verifiche per una barriera "MAC.RO. SYSTEM", prodotta da Officine Maccaferri Italia S.r.l., con assorbimento energetico fino a 3000 kJ.

Poiché la verifica sull'energia dissipabile della barriera non ha prodotto esito positivo, è stato necessario scegliere una barriera della classe enrgetica successiva ovvero di classe 7.

Dopo un'attenta ricerca sul mercato italiano non sono stati riscontrati prodotti di classe 7. A tal ragione si è deciso di verificare una barriera ad assorbimento di energia fino a 5000 kJ, appartenente alla classe energetica 8, nonostante si ritenga che questa classe, nel caso specifico, sia certamente sovrastimata.

La barriera scelta è la "MAC.RO. SYSTEM-RMC500/A-5000 kJ" prodotta da Officine Maccaferri Italia S.r.l. (<u>Allegato A6</u>)

Utilizzando le equazioni delle linee guida progettuali delle barriere paramassi ($\P 7.2$) si ottengono i seguenti dati:

- Velocità di progetto [Equazioni (8.2), (8.3)]:

$$v_p = 29 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 1,02 \cdot 1,1 = 32,53 \left[\frac{m}{s} \right]$$
 (8.31)

- Massa del blocco di progetto [Equazioni (8.4, 8.5)]:

$$m_p = \left(2[m^3] \cdot 2500 \left[\frac{kg}{m^3}\right]\right) \cdot 1,02 \cdot 1,0 = 5500 [kg]$$
 (8.32)

- Energia cinetica di progetto [Equazione (8.4)]:

$$E_p = \left[\frac{1}{2} \cdot 5500[kg] \cdot \left(32,53 \left[\frac{m}{s}\right]\right)^2\right] \cdot 10^{-3} = 2911,48 [kJ]$$
 (8.33)

- Altezza di intercettazione di progetto [Equazione (8.7)]:

$$h_p = 1.6[m] \cdot 1.02 \cdot 1.1 = 1.9[m]$$
 (8.34)

- Massima deformazione di progetto [Equazione (8.8)]:

$$d_A = 6,05[m] \cdot 1,3 = 7,86[m] \tag{8.35}$$

Anche in questo caso, si è proceduto alle verifiche sull'energia, sulla massima deformazione e sull'altezza di intercettazione utilizzando i dati della prova MEL forniti nella scheda tecnica della casa produttrice consulatbile in <u>Allegato A6</u>.

Verifica dell'energia cinetica dissipabile dalla barriera in condizioni di sicurezza [Equazione (8.9)]

$$2911,48[kJ] - \frac{5254[kJ]}{1,2} < 0 \longrightarrow = -1466,44[kJ] \longrightarrow verificato$$

Verifica sull'altezza di intercettazione della barriera [Equazione (8.10)]

$$1,9[m] - 5,0[m] < 0 \longrightarrow = -3,1[m] \longrightarrow verificato$$

Verifica sulla massima deformazione della barriera [Equazione (8.11)]

$$10[m] - 7.86[m] \ge 0 \longrightarrow +2.14 = [m] \longrightarrow verificato$$

La barriera da 5000 kJ adempie a tutte e tre le verifiche ma è un'opera di protezione decisamente sovrastimata. Basterebbe una barriera ad assorbimento di energia pari a 4000 kJ per soddisfare la verifica sull'energia dissipabile.

I risultati dei valori di progetto e delle verifiche sono consultabili in Allegato A8.

Determinata la lunghezza di ancoraggio, occorrerà eseguire le verifiche allo stato limite ultimo sui tiranti di ancoraggio, prescritte al Capitolo 6, ¶6.6.2 delle NTC2018 (stralcio in Allegato A9).

8.6.2 Dimensionamento dei tiranti con il metodo di Bustamante e Doix

Per la posizione 1 è stata scelta la barriera "MAC.RO. SYSTEM -RMC500/A- 5000 kJ" prodotta da Officine Maccaferri Italia S.r.l. (¶7.3.2, Allegato A6).

La barriera in posizione 1 è stata dimensionata per una lunghezza di 90 m, con 9 moduli funzionali di interasse pari a 10 m, sulla base delle simulazioni condotte con Rockyfor3D. Sono stati dimensionati i tiranti di monte ed i tiranti laterali, inferiori e superiori, con il metodo di Bustamante e Doix.

Ancoraggio di monte

Per gli ancoraggi di monte sono state scelte barre di acciaio precompresso a filettatura continua Diwidag Y1050H (Figura 8-6, <u>Allegato A10</u>) aventi diametro Φ = 26,5 mm, diametro di perforazione 90 mm e carico massimo di trazione registrato durante la prova MEL pari a T_L = 246,70 kN. (<u>Allegato A6</u>)

Individuato il valore del diametro di perforazione, si è calcolato il diametro del bulbo di ancoraggio D_S [Equazione (8.21)]:

$$D_S = 90[mm] \cdot 1,1 = 99[mm] \tag{8.36}$$

Successivamente, è stata calcolata la lunghezza del bulbo di ancoraggio [Equazione (8.24)]:

246,70 [kN] · 1,3 =
$$\frac{\pi \cdot 99[mm] \cdot L_S \cdot 0,36[MPa]}{1,2 \cdot 1,8}$$
 da cui:

$$L_S = \frac{246,70[kN]\cdot 1,3\cdot 1,2\cdot 1,8}{\pi \cdot 99[mm]\cdot 0,36[MPa]} = 6,19[m]$$
(8.37)

Il valore di L_S è stato arrotondato a $L_S = 6.5$ m.

La verifica dell'interfaccia malta-terreno è già soddisfatta.

Per verificare la resistenza dell'acciaio sono state calcolate l'azione di progetto e la resistenza di progetto e successivamente sono stati confrontati i due valori secondo la [Equazione (8.23)].

L'azione di progetto e la resistenza di progetto derivano dalle [Equazioni (8.25), (8.26)]:

$$E_d = 246,70[kN] \cdot 1,3 = 320,71[kN] \tag{8.38}$$

$$R_d = min\left(\frac{525[kN]}{1,15}; \frac{580[kN]}{1,35}\right) = 429,63 [kN]$$
(8.39)

La verifica risulta:

$$320,71 \, kN < 429,63 \, kN \longrightarrow verificata$$

Ancoraggio laterale

Gli ancoraggi laterali, inferiore e superiore, sono stati dimensionati con eguale lunghezza. Sono state scelte barre di acciaio precompresso a filettatura continua Diwidag Y1050H (Figura 8-6, <u>Allegato A10</u>) aventi diametro Φ = 32 mm, diametro di perforazione 100 mm e carico massimo di trazione registrato durante la prova MEL pari a T_L = 281,80 kN. (<u>Allegato A6</u>)

Il procedimento è il medesimo dell'ancoraggio di monte.

Individuato il valore del diametro di perforazione, si è calcolato il diametro del bulbo di ancoraggio D_S [Equazione (8.21)]:

$$D_S = 100[mm] \cdot 1,1 = 110[mm] \tag{8.40}$$

Successivamente, è stata calcolata la lunghezza del bulbo di ancoraggio [Equazione (8.24)]:

281,80 [kN] · 1,3 =
$$\frac{\pi \cdot 110[mm] \cdot L_S \cdot 0,36[MPa]}{1,2 \cdot 1,8}$$
 da cui:

$$L_S = \frac{281,80[kN]\cdot 1,3\cdot 1,2\cdot 1,8}{\pi\cdot 110[mm]\cdot 0,36[MPa]} = 6,36[m]$$
(8.41)

Il valore di L_S è stato arrotondato a $L_S = 6.5$ m.

La verifica dell'interfaccia malta-terreno è già soddisfatta.

Per verificare la resistenza dell'acciaio sono state calcolate l'azione di progetto e la resistenza di progetto e successivamente sono stati confrontati i due valori secondo la [Equazione (8.23)].

L'azione di progetto e la resistenza di progetto derivano dalle [Equazioni (8.25), (8.26)]:

$$E_d = 281,80[kN] \cdot 1,3 = 366,34[kN] \tag{8.42}$$

$$R_d = min\left(\frac{760[kN]}{1,15}; \frac{845[kN]}{1,35}\right) = 625,92[kN]$$
(8.43)

La verifica risulta:

8.6.3 Analisi prezzi

Anche nel caso dell'analisi prezzi per la barriera in posizione 2 sono stati utilizzati i prezzi per il "kit" standard fornito da Officine Maccaferri S.r.l. (Allegato A14) aggiornato in base alle caratteristiche della barriera in elevazione e per la fondazione dimensionata in questo elaborato.

Analisi prezzi in elevazione

L'analisi in elevazione è stata calcolata tenendo conto delle caratteristiche geometriche della barriera:

- Altezza: H = 5 m;

- Lunghezza: L = 90 m;

- Interasse montanti: i = 10 m;

- Superficie: $A = 450 \text{ m}^2$.

E del plinto di fondazione:

- Altezza: h = 0.50 m;

- Base: b = 1 = 0.80 m.

Il prezzo calcolato è comprensivo della posa in opera e della manodopera. Nello specifico si tiene conto di:

- Tipologia di squadra per l'esecuzione dei lavori: 159,59 [€]
- Forniture a piè d'opera: 117.558[€]
- Allestimento e tracciamento della barriera: 893,70 [€]
- Formazione dei plinti di fondazione: scavo, cassero, getto e disarmo:
 1.787.41 [€]
- Posa della barriera: 20.776,66 [€]
- Mezzo di trasporto a disposizione in cantiere per la mobilità degli operai:
 511,22 [€]

Per 450 m² di barriera, il prezzo totale è 141.527 [€]; mentre il costo unitario per 1 m² è 314,50 $\left[\frac{\epsilon}{m^2}\right]$.

Aggiungendo il 15% di spese generali ed un utile d'impresa del 10%, si ottiene 397,85 $\left[\frac{\epsilon}{m^2}\right]$.

Analisi prezzi in fondazione

Per effettuare l'analisi prezzi delle fondazioni sono state utilizzate le voci dell'elenco prezzi per le lavorazioni e la fornitura, estratti da <u>www.assoroccia.net</u>.

Si tiene conto di:

- Tipo di terreno su cui si effettua la fondazione: roccia;
- Diametro di perforazione per fondazioni dei montanti: 65 mm;
- Diametro di perforazione per ancoraggi di monte e ancoraggi laterali: 90 mm,
 100 mm;
- Numero di montanti; 10;
- Numero totale di ancoraggi di monte: 22;
- Numero totale di ancoraggi laterali: 8.

Nello specifico:

- Perforazione per ancoraggi con diametro fino a 90 mm: 116,30 $\left\lceil \frac{\epsilon}{ml} \right\rceil$;
- Perforazione per ancoraggi con diametro da 91 mm a 120 mm: 123,40 $\left[\frac{€}{ml}\right]$;
- Fondazione (L = 3 m, D_D = 65 mm): 17.400 [€];
- Ancoraggi di monte (L = 6,5 m, D_D = 90 mm): 22.908,60[€]
- Ancoraggi laterali (L = 6,5 m, D_D = 100 mm): 8.699,60 [€]

Per un totale di 49.008,20 [€] e 108,91 $\left[\frac{\epsilon}{m^2}\right]$.

Sommando i due contributi (prezzo elevazione e prezzo fondazione) si ottiene 506,76 $\left[\frac{\epsilon}{m^2}\right]$.

La posizione 2 non necessita di un trasporto con elicottero poiché è facilmnte accessibile dalla S.P. 169 e si trova a quota 933 m s.l.m., con un dislivello dal piano stradale di meno di 15 m.

Senza tener conto dell'uso dell'elicottero leggero, la differenza tra i due interventi è di 170,89 €/m².

Inoltre, è da sottolineare come questo intervento sia sovrastimato in termini di assorbimento di energia e di conseguenza dal punto di vista economico per ciò che concerne la messa in sicurezza del versante; in quanto per proteggere l'infrastruttura viaria basterebbe una barriera paramassi deformabile ad assorbimento di energia pari a 4000 kJ.

9. Osservazioni e conclusioni

Il presente elaborato di tesi presenta lo studio di un fenomeno di crollo avvenuto nel 2011, nel Comune di Perrero (TO), attraverso una modellazione traiettografica tridimensionale della dinamica dell'evento, eseguita con il codice di calcolo Rockyfor3D (Dorren, 2014).

Il crollo, che ha coinvolto una volumetria di migliaia di metri cubi, ha colpito la vibilità provincial, fino al deposito di alcuni blocchi isolati nel letto del Torrente Germanasca.

Di particolare interesse, durante l'elaborazione delle analisi, sono state le incertezze connesse alla determinazione dei parametri richiesti per l'utilizzo del software Rockyfor3D.

Trattandosi di un codice che tiene conto della presenza di ostacoli lungo il pendio e della sua copertura vegetativa, è stato necessario procedere per tentativi alla definizione dei dati relativi a questi parametri.

La motivazione è la carenza di informazioni di dettaglio riguardanti la microtopografia del versante. In particolare i valori della rugosità sono stati valutati sulla base delle osservazioni delle ortofoto e non su misure da campo, laddove i valori standard definiti sul manuale del software non sono stati sufficienti a restituire risultati traiettografici corretti.

Per caratterizzare la componente forestale, elemento innovativo nelle analisi traiettografiche, di ausilio è stato il Corine Land Cover del Piemonte ma anche in questo caso, le informazioni fornite sulla carta (Regione Piemonte, 2012), non sono state sufficienti. Per l'individuazione del diametro medio degli alberi e la densità di vegetazione, si è ricorsi inizalmente al software FINT, che mediante sottrazione di DSM e DTM, restituisce la posizione cartografica di ogni singolo albero e ne estrae anche il diametro.

A causa però della poca accuratezza del DSM nelle zone montane del Piemonte, il risultato ottenuto non è stato soddisfacente in quanto, confrontando il numero di alberi

in output e l'ortofoto, è stato riscontrato in modo nettamente visibile, un numero di alberi di gran lunga inferiore a quello reale. Perciò si è dovuto ricorrere a procedure differenti per la calibrazione di queste grandezze che hanno previsto l'utilizzo di un metodo puramente matematico per il numero di alberi per ettaro e la realizzazione di un rilievo forestale solo di alcuni alberi accessibili del versante, vicino la zona di interesse, e combinando al contempo valori definiti in lettaratura per discretizzare un parametro critico come il diametro medio degli alberi.

Un'altra grandezza affetta da incertezza è rappresentata dalla nicchia di distacco dato che le dimensioni spaziali non sono state definite nei rapporti di evento. Poichè si tratta di un parametro di difficile individuazione mediante osservazione dei segni di dissesto sul territorio, essa è stata assunta a seguito di svariati tentativi.

L'affezione d'incertezza riguarda anche il volume, e conseguentemente le dimensioni, dei blocchi in quanto Rockyfor3D non è in grado di simulare una distribuzione realistica del volume al distacco. Nello specifico, il programma è in grado di creare una variazione ma con sola distribuzione gaussiana, è per questa ragione che sono stati analizzati scenari a differente volumetria dei massi.

Nonostante le difficoltà, si è riusciti ad ottenere risultati traiettografici piuttosto vicini all'area d'invasione disegnata nei rapporti, ottenendo valori di energia cinetica abbastanza realistici per eventi delle portate volumetriche analizzate.

La bontà dei risultati è senz'altro da attribuire alla natura probabilistica del software ma d'importanza cruciale è stata la corretta assunzione degli attributi che caratterizzano il versante.

Tutte le simulazioni condotte hanno dimostrato che Rockyfor3D è molto sensibile a questi attributi ed anche solo la minima variazione di uno di essi è in grado di influenzare particolarmente i risultati.

Gli esiti ottenuti per lo scenario 1 sono stati confrontati con le simulazioni effettuate su RotomapGIS, in modo da capire quanto le dimensioni e la forma dei blocchi, nonchè la presenza della vegetazione, influenzi le traiettorie. Dal confronto è stato dimostrato

che un metodo rigid body e probabilistico come Rockyfor3D è più adatto a simulare l'evento, sia in termini di area d'invasione che di energia cinetica.

Dalle simulazioni in back-analysis degli scenari a differente volumetria, si evidenzia come anche in questa circostanza, i risultati siano coerenti per quanto riguarda energia cinetica e punti di arresto.

La natura probabilistica del software, ha permesso inoltre di costruire le curve di frequenza cumulata delle grandezze in gioco, strumento necessario secondo la normativa europea per il dimensionamento di un sistema di protezione per la messa in sicurezza del versante.

Sulla base delle cumulate di frequenza risultato dell'analisi, è stato inoltre progettato un sistema di difesa costituito da una barriera paramassi deformabilie ad assobimento di energia, per lo scenario 1 (volume dei blocchi pari a 2 m³). È stata valutata la posizione più favorevole per l'inserimento dell'intervento secondo due criteri principali: aree a minore energia cinetica e aree a più facile installazione, grazie alla vicinanza con la viabilità.

In particolare, questi criteri si traducono in fattori di tipo economico e di sicurezza delle vite umane, in quanto occorre tener presente che la zona a minor energia cinetica è localizzata in una porzione del versante che richiede l'utilizzo dell'elicottero per l'installazione dell'opera.

Ringraziamenti

Qualcuno ha detto che nella vita i giorni che contano davvero sono pochi, così pochi da potersi numerare sulla punta delle dita di una mano; tra le svariate "piccole" cose da apprezzare quotidianamente, uno di quei pochi giorni, per me, è oggi.

È inutile ribadire il concetto per cui un traguardo diviene "nostro" grazie ai sacrifici che siamo disposti a fare per raggiungerlo; è meno banale capire che la forza che mettiamo per affrontare le difficoltà, è la somma della nostra, intrinseca e violenta, più una quota che ci viene donata da qualcuno che è disposto a sostenerci, a volte anche più di quanto non riusciamo a fare noi stessi.

La mia grande fortuna è stata proprio questa: ho sempre avuto al mio fianco qualcuno che mi ha teso la mano. Ho avuto in dono pezzetti di forza, che ogni giorno hanno contribuito ad arricchire il mio cuore e fortificare la mia tenacia.

Vorrei dire, innanzitutto, grazie ai miei relatori: la Prof.ssa Marta Castelli, il Prof. Claudio Scavia e la Prof.ssa Monica Barbero, per avermi guidata e consigliata durante la stesura della tesi, e senza i quali questo lavoro non sarebbe stato così soddisfacente.

In particolare, vorrei dire grazie a Lei Prof.ssa Castelli, per avermi seguita con dedizione e profonda professionalità, per essere stata sempre disponibile ad accogliere ogni mio dubbio e ad offrirmi delle parole di conforto in momenti di difficoltà e forte stress, nonostante non competesse al suo ruolo.

La mia più profonda gratitudine va alla mia famiglia: mio padre, mia madre, mia sorella Francesca e i miei nonni. Voi avete sempre creduto in me e nelle mie capacità, siete sempre stati orgogliosi di me, fieri della mia determinazione, nonostante qualche "errore" commesso durante il percorso accademico.

Un grazie, di dimensioni che non si possono quantificare, va alla mia amica Roberta, ormai parte attiva della mia famiglia. Lei si è fatta strada nella mia vita con la bontà, unica e rara, del suo cuore. In questi anni a Torino, anni ricchi di pura ed assoluta condivisione, mi ha accettata con pregi e, soprattutto, difetti. Mi è stata vicino in ogni

occasione, anche quando starmi vicino poteva significare trascurare se stessa. È stata capace di restare anche quando il mio caratteraccio la spingeva via. Per cui grazie mia dolcissima Robi, non posso che dirti che ho una certezza che non può essere offuscata: la nostra amicizia è destinata a durare in eterno.

Grazie alla mia amica Vania, che con la sua allegria è riuscita a darmi sempre coraggio e a colorare momenti davvero buii. Mia cara Vani, tutte le volte che avevo bisogno di conforto c'era un tuo sorriso ad accogliermi, ad abbracciare le mie debolezze. Sei stata la miglior coinquilina, anche se per un breve periodo, purtroppo davvero troppo breve. Sei stata e sarai sempre parte della mia famiglia. Sei una certezza, in ogni mio giorno.

Grazie alla mia amica storica Stefania che nonostante la distanza, in questi sette anni, ha saputo tener fede al nostro legame, in modo sincero, disinteressato e non invadente. Fefi, grazie di cuore per essere rimasta sempre, anche durante i miei momenti di silenzio che assolutamente non meritavi.

Un grazie lungo dieci anni a te, Tonino. Hai sempre cercato di rasserenare il mio animo, sdrammatizzando su ogni problema e rendendolo leggero, sopportabile al mio cuore. Hai apprezzato la parte migliore di me ma oggi ti ringrazio soprattutto perchè tu hai il coraggio di scegliermi ogni giorno, nonostante la mia parte peggiore.

Grazie a tutti gli amici e a tutti i colleghi conosciuti in questi anni, con i quali abbiamo condiviso disperazioni e gioie. Ognuno di voi mi ha insegnato e lasciato qualcosa, anche chi è stato solo una breve parentesi in questo percorso.

Che oggi sia solo l'inizio di una vita in cui i sogni divengono realtà!

26.07.2018

Bibliografia

- Acosta A., Blasi C., Carranza M. L., Di martino P. Pura B., Tolve E. (2003), «Il programma CORINE Land-Cover: un esempio al IV livello per il bacino del F. Biferno (Molise)». Informatore Botanico Italiano 35, (1) 21-29.
- Agliardi F, Crosta GB (2003), High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. Int J Rock Mech Min Sci 40:455–471. doi:10.1016/S1365-1609(03)00021-2
- ARPA Piemonte (2009), Guida alla lettura della scheda Frane SIFraP Servizio Web Gis-Sistema Informativo Frane Piemonte. Torino.
- ARPA Piemonte (2004), Progetto IFFI Inventario Fenomeni Franosi in Italia, l'esperienza in Piemonte. Centro Regionale per le Ricerche Geologiche e Territoriali.
- ARPA Piemonte (2011), Rapporto dell'evento meteopluviometrico del 15 e 16 Marzo 2011, Torino.
- ARPA Piemonte (2011), Sistema Informativo Frane in Piemonte (SIFraP) Scheda riassuntiva delle informazioni relative ai dissesti di versante (ID: 001-76464-00), Torino.
- Azzoni A, Labarbera G, Zaninetti A (1995), Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. Int J Rock Mech Min Sci 32:709–724. doi:10.1016/0148-9062(95)00018-c
- Barbero M. (2015), "Opere di difesa da caduta massi". Corso di Meccanica delle Rocce. Politecnico di Torino.
- Barbero M. (2015), "Suggerimenti per il dimensionamento di tiranti di ancoraggio". Corso di Meccanica delle Rocce. Politecnico di Torino.

- Borgogno Mondino E., Fissore V., Lessio A., Motta R. (2006), «Are the New Gridded DSM/DTMs of the Piemonte Region (Italy) Proper for Forestry? A Fast and Simple Approach for a Posteriori Metric Assessment». IForest Biogeosciences and Forestry 9, n. 6: 901–9. https://doi.org/10.3832/ifor1992-009.
- Bourrier F., Dorren L., Nicot F., Berger F., Darve F. (2009), «Toward Objective Rockfall Trajectory Simulation Using a Stochastic Impact Model». Geomorphology 110, n. 3–4: 68–79. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.017.
- Bustamante M., Doix B. (1985), Une mèthode pour le calcol des tirants et des micropieux injectes. Bull. Liaison Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Camorani L. (2015), "Analisi previsionale di propagazione del fenomeno di crollo mediante approccio numerico avanzato". Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile, Politecnico di Torino.
- Castelli M., De Biagi V., Netti T. (2016), «Effect of the Number of Simulations on the Accuracy of a Rockfall Analysis». Procedia Engineering 158: 464–69. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.473.
- Castelli M., Campus S., Grisolia M., Pispiro R., Lanteri L., Barbero M. (in preparazione), «QPROTO una procedura in ambiente GIS per la stima a piccolo scala della propagazione di crolli in roccia». SANDHI EDIZIONI, Cagliari.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C. und Wu, J. J. (2002), Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39: 69-77.
- Crosta GB., Agliardi F. (2004), Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. Nat Hazards Earth Syst Sci 4:583–598. doi:10.5194/nhess-4-583-2004
- Consiglio Nazionale delle Ricerche-istituto di ricerca per la protezione idrogeologica centro di competenza del dipartimento di protezione civile presidenza del consiglio dei ministry (2011), Rapporto di evento Fenomeni franosi avvenuti in Val Germanasca (TO) il 16 marzo 2011, Torino.

- Del Maschio L., Gozza G., Piacentini D., Pizziolo M., Soldati M. (2007), «Previsione delle traiettorie di blocchi mobilizzati da frane di crollo: applicazione e confronto di modelli». Giornale di Geologia Applicata 6: 33–44.
- Dorren L.K.A., Seijmonsbergen A.C., (2003), Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. Geomorphology 56(1-2): 49-64.
- Dorren L.K.A., Berger F., (2005), Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. Tree Phys. 26: 63-71.
- Dorren L.K.A., Berger, F. und Putters, U.S. (2006), Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. Nat. Haz. Earth Syst. Sci. 6: 145-153.
- Dorren L.K.A., Simoni S. (2014), "Rockyfor3D (V5.1) rivelato Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi", Ecorisq.
- Dorren L.K.A., Zuanon N., Ginzler C., Monnet J.M. (2014), "FINT- Find Individual Tree. User manual". Ginevra, Ecorisq.
- Dorren L.K.A., Berger F., Jonsson M., Krautblatter M., Mölk M., Stoffel M., Wehrli A. (2007), «State of the Art in Rockfall Forest Interactions». Schweizerische Zeitschrift Fur Forstwesen 158, n. 6: 128–41. https://doi.org/10.3188/szf.2007.0128.
- EOTA (European Organisation for Technical Approvals) (2008), "ETAG27 GUIDA PER IL BENESTARE TECNICO EUROPEO di SISTEMI DI PROTEZIONE PARAMASSI". Brussels.
- Giardino M., Perotti L., Alberto W., Ratto S., «Multidimensional approach to natural instabilities in mountain areas: how geomorphometry can improve both hazard modeling and risk perception», s.d.

- Habib, P. (1977), Note sur le rebondissement des blocs rocheux. In: Proc. Meet. on Rockfall Dynamics and Protective Works. Bergamo, Italy. ISMES Publ. 90: pp. 123-125.
- Hoek E. (1987). Rockfall. A program in basic for the analysis of rockfall from slope. Unpublished notes, University of Toronto. Canada.
- Evans S.G., Hungr O. (1993), The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. Canadian Geotechnical Journal, 30 (4), pp. 620-636. Cited 222 times. DOI: 10.1139/t93-054
- Guzzetti F, Crosta G, Detti R, Agliardi F (2002), STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. Comput Geosci 28:1079–1093. doi:10.1016/s0098-3004(02)00025-0
- Jaboyedoff M. & Laboiuse V., (2003) Preliminary assessment of rockfall hazerd based on GIS data. ISRM 2003, Technology roadmap for rock mechanics. South Africa Institute of Mining and Metallurgy.
- Jaboyedoff M., Labiouse V. (2011). Technical note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. Nat Hazards Earth Syst Sci 11:819–828. doi:10.5194/nhess-11-819-2011
- Jonsson M.J. (2007), Energy absorption of trees in a rockfall protection forest, PhD Thesis ETHZ No. 17214: 209 S.
- Kirkby M.J., Statham I., (1975). Surface stone movement and scree formation, J. Geol. 83: 349-362.
- Leine, R. I., Schweizer A., Christen M., Glover J., Bartelt P., Gerber W. (2014), «Simulation of Rockfall Trajectories with Consideration of Rock Shape». Multibody System Dynamics 32, n. 2: 241–71. https://doi.org/10.1007/s11044-013-9393-4.

- Langping L., Hengxing Lan (2015), «Probabilistic Modeling of Rockfall Trajectories: A Review». Bulletin of Engineering Geology and the Environment 74, n. 4: 1163–76. https://doi.org/10.1007/s10064-015-0718-9.
- Lundström T., Jonsson M.J., Volkwein A., Stoffel M., (2009). Reactions and energy absorption of trees subject to rockfall: a detailed assessment using a new experimental method. Tree Phys. 29: 345-359.
- Marotto A. (2014), "Bosco e dinamica dei crolli in roccia in ambiente dolomitico: Caso studio di un versante del Monte Antelao (Vodo di Cadore, Belluno)". Tesi di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova.
- Migliazza M., Giacomini A., Giani G.P., Segalini A. (2002), «OSSERVAZIONI IN SITO ED ANALISI DI FENOMENI DI CADUTA MASSI». IARG-Incontro Annuale dei ricercatori di Geotecnica. Napoli.
- Mininno L.P. (2013), "Analisi di un fenomeno di caduta massi in Val Germanasca (Comune di Perrero) e proposta di un'opera di difesa". Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile, Politecnico di Torino.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018), «Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni». Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, supplemento n. 8: 197–99.
- Pirulli M. (2015), "Stabilità dei pendii". Corso di Stabilità dei Pendii. Politecnico di Torino.
- Pichler B., Hellmich Ch., Mang, H.A., (2005). Impact of rocks onto gravel design and evaluation of experiments. Int. J. Impact Eng. 31: 559-578.
- Pfeiffer T.J., Bowen T.D., (1989). Computer simulation of rockfalls. Bull. Ass. Eng. Geol. XXVI: 135-146.
- Regione Piemonte (2013), Piano Regolatore generale intercomunale. Relazione tecnica. Torino.

- Rondelet G. (1839), Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare. HOEPLI.
- Scavia C. (2015), "Stabilità dei versanti". Corso di Meccanica delle Rocce. Politecnico di Torino.
- Scioldo G. (1991), Rotomap: analisi statistica del rotolamento dei massi. Guida informatica ambientale, Pàtron, Milano.
- Spang M.R., Krauter E., (2001). Rock fall simulation A state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriers. Int. Conf. Landslides; Causes, Impacts and Countermeasures, 17-21 June 2001, Davos, Switzerland: pp. 607-615.
- Tresso G., Piazzi M., Riba L., Bussone M., Boccardo L. (2012), "La filiera bosco legno energia nelle Valli Chisone e Germanasca". UNCEM Piemonte.
- Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia (2012) L'ANALISI E LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI POSSIBILE PROPAGAZIONE CROLLI. Linee Guida. Provincia autonoma di Bolzano.
- Varnes D.J. (1978), Slope movement types and processes. In Schuster R.L., & Krizek R.J. (eds) landslides analysis and control.
- Wu S.S., (1984), Rockfall evaluation by computer simulation. Transportation Research Record, Transp. Res. Board, Washington, DC, Nr. 1031: pp. 1-5.
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R., (1987). Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surf. Proc. Landforms 12: 47-56.

Sitografia

www.allasiaplantmg.it

www.arpa.piemonte.it

www.assoroccia.net

www.consotec.it

www.dywit.it

www.ecorisq.org

www.ec-gis.org/clc

www.geoplanning.it

www.isprambiente.gov.it

www.maccaferri.it

www.minambiente.it

www.qgis.org

www.regione.piemonte.it

www.rocscience.com

www.sistemapiemonte.it