



Politecnico di Torino

Corso Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Studio di sistemazione di un'area montana soggetta a instabilità di versante in Valsesia (VC): Analisi di propagazione del fenomeno franoso, modellazione e verifiche del rilevato paramassi a valle del pendio e valutazione del piano di risistemazione del pendio.

RELATORI: MONICA BARBERO, MARTA CASTELLI

RELATORE ESTERNO: GIOVANNI CAVAGNINO

CANDIDATO: ANTONIO VICARI

ANNO ACCADEMICO 2019/2020

Sommario

1.	CROLLI IN ROCCIA	14
1.1	Classificazione e descrizione dei fenomeni franosi.....	14
1.1.1	Cause e descrizione dei crolli in roccia.....	16
1.2	Analisi dinamica del moto.....	18
1.2.1	Interazione blocco pendio	19
1.2.2	Effetti della forma del blocco.....	23
2.	METODI DI ANALISI DELLA CADUTA MASSI.....	25
2.1	Modelli empirici	26
2.1.1	Metodo Geomorfologico.....	27
2.1.2	Metodo Geometrico	27
2.2	Modelli Numerici	29
2.3	Modelli Analitici	30
2.3.1	Metodo Lumped Mass	30
2.3.2	Metodo “rigid body”	32
2.3.3	Metodo “ibrido”	33
3.	CASO STUDIO	34
3.1	Inquadramento geografico.....	34
3.2	Inquadramento Geomorfologico	37
3.3	Fenomeni franosi in Valsesia	37
3.3.1	Crolli nella zona della Miniera “Kreas”, Località “Merletti”	38
3.4	Analisi del caso studio.....	39
4.	ANALISI DI PROPAGAZIONE DELLA CADUTA MASSI.....	45
4.1	Software RockyFor3D.....	45
4.1.1	Dati raster di Input	46
4.1.2	Richiami teorici del software RockyFor3D	50

4.1.3	Dati Raster di Output	56
4.2	Fase preliminare in ambiente GIS	58
4.3	Simulazione del Crollo tramite il Software Rockyfor3D	68
4.3.1	Area di invasione.....	69
4.3.2	Velocità	71
4.3.3	Altezze di rimbalzo	72
4.3.4	Energie cinetiche.....	72
4.4	Conclusioni sull'analisi di propagazione.....	73
5.	MODELLAZIONE E VERIFICHE DEL RILEVATO PARAMASSI.....	74
5.1	Introduzione e geometria del rilevato.....	74
5.2	Modellazione dello scenario per la validazione del modello	78
5.2.1	Modellazione dei blocchi impattanti sul rilevato.....	81
5.3	Back-analysis e validazione del modello	82
5.4	Stabilità globale del rilevato paramassi.....	89
5.5	Analisi di stabilità del rilevato a seguito di ulteriori impatti.....	91
5.5.1	Parametri di Input del modello con blocco pari a 2.4 m ³	92
5.5.2	Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 0°95	
5.5.3	Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	97
5.5.4	Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	100
5.5.5	Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m ³ ed angolo di impatto verticale	102
5.5.6	Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m ³ ed angolo di impatto orizzontale	105

5.5.7	Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 13 °	108
5.5.8	Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 24 °	110
5.5.9	Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m ³ ed angolo di impatto del blocco verticale	113
5.6	Considerazioni sulla modellazione e verifiche del rilevato paramassi.....	115
6.	INTERVENTO DI RIPROFILATURA DELLA SCARPATA.....	117
6.1	Creazione del modello su QGis.....	117
6.2	Analisi di propagazione su RockyFor3D e commenti sui risultati finali ..	120
7.	CONCLUSIONI.....	125
	Bibliografia	128

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1	Sintesi della rappresentazione dei fenomeni franosi (Scavia 2015).....	16
Figura 1-2	Possibili cause d'innescio di un fenomeno di caduta massi (Volkvein, 2011)	17
Figura 1-3	Aree principali del corpo frana.....	17
Figura 1-4	Descrizione del moto del blocco	18
Figura 1-5	Percorso dei blocchi lungo un pendio caratterizzato da detrito (Giani, 1992)	24
Figura 2-1	Schema semplificato del Metodo Geometrico (Pirulli,2018).....	27

Figura 2-2 Relazione tra il volume ed il rapporto H/L (Scheidegger, 1973; Corominas, 1996; Legros, 2002;)	28
Figura 2-3 Modelli 2D e 3D a confronto (Barbero,2018)	32
Figura 3-1 Limiti Geografici della Valsesia (Immagine Satellitare di Google Earth)	34
Figura 3-2 Inquadramento geografico area di interesse e Miniere di Kreas (Google Earth, 2018)	36
Figura 3-3 Percentuale di tipologie franose in Valsesia (Arpa Piemonte 2005)	38
Figura 3-4 Estratto da BDTRE_2018 della Regione Piemonte Comune di Alagna Valsesia (VC), Scala 1:10000	39
Figura 3-5 Foto scattata dal personale del Politecnico durante un'ispezione in sito	40
Figura 3-6 Foto scattata dal personale del Politecnico durante un'ispezione in sito	40
Figura 3-7 Foto scattata dal personale del Politecnico durante un'ispezione in sito	41
Figura 3-8 Zona del crollo e Rilevato Paramassi con la presenza dei due blocchi. Immagine Satellitare Google Earth (2016)	42
Figura 3-9 Curve di livello ricavate da Drone 1:10000 (cortesia dott. Cavagnino)	42
Figura 3-10 Blocco di 508 m ³ conficcato sulla testa del rilevato	43
Figura 3-11 Blocco di 1000 m ³ con la presenza di un altro masso poggiato su di esso	43
Figura 3-12 Visione laterale di uno dei monoliti conficcati sul rilevato	44
Figura 4-1 Diagramma di flusso del software (Dorren, 2014)	46
Figura 4-2 Rappresentazione del meccanismo di rimbalzo (Dorren, 2014)	51
Figura 4-3 Dimostrazione grafica dell' algoritmo di calcolo della direzione di caduta dopo un rimbalzo. (Dorren 2014)	55
Figura 4-4 Passaggio dalla traiettoria 3D ai dati raster di Output	56
Figura 4-5 Interfaccia comando "Aggiungi Layer WMS"	59
Figura 4-6 Ortofoto AGEA 2015, Zona della miniera di Kreas	60
Figura 4-7 DTM HILLSHADE 2011 , zona Miniera di Kreas	60

Figura 4-8 Rappresentazione in bianco della zona di distacco	63
Figura 4-9 Foto da Drone dell'area di distacco (Foto fornita dal Dott. Cavagnino e dalla Regione Piemonte).....	63
Figura 4-10 Zona di detrito	64
Figura 4-11 Immagine LIDAR dell'area di distacco (cortesia Dott. Cavagnino e Regione Piemonte).....	64
Figura 4-12 Zona a granulometria eterogena	65
Figura 4-13 Zona alternata dalla presenza di massi e vegetazione	65
Figura 4-14 Zona caratterizzata dalla sola presenza della Vegetazione	66
Figura 4-15 Valori suggeriti da Rockyfor3D (Dorrem,2014).....	67
Figura 4-16 Output del Software RockyFor3D.....	69
Figura 4-17 Rappresentazione dell'area di invasione simulata	70
Figura 4-18 Immagine in ambiente CAD	71
Figura 4-19 Andamento delle velocità.....	71
Figura 4-20 Altezze di rimbalzo	72
Figura 4-21 Andamento dell'energia cinetica lungo il pendio	73
Figura 5-1 Foto del rilevato paramassi con un blocco di grandi dimensioni conficcato in testa	74
Figura 5-2 Geometria del Rilevato Riprodotta su RS3	75
Figura 5-3 Modello completo del Rilevato con rinforzo in Pietra.....	76
Figura 5-4 Blocco 2 Improntato sul rilevato	77
Figura 5-5 Blocco 1 improntato sul rilevato	77
Figura 5-6 File DXF della zona di interesse del rilevato (Cavagnino, 20018)	77
Figura 5-7 Discretizzazione del modello con elementi tetragonali in ambiente RS3	79
Figura 5-8 Condizioni al contorno del modello tridimensionale	80
Figura 5-9 File .dwg della zona di interesse, (Geologo Cavagnino).....	80

Figura 5-10 Modello su RS3 con l'applicazione dei carichi dovuti all'impatto dei blocchi.....	82
Figura 5-11 Spostamenti dovuti all'impatto dei due blocchi.....	83
Figura 5-12 Grafico dei rockfill Barton (2008).....	85
Figura 5-13 Andamento degli spostamenti nel rilevato	86
Figura 5-15 Grafico dell'andamento degli spostamenti	87
Figura 5-14 Installazione della query sulla testa del rilevato.....	87
Figura 5-16 Andamento degli spostamenti in prossimità del blocco con un volume pari a 504 m ³	88
Figura 5-17 Andamento degli spostamenti in prossimità del blocco con un volume pari a 1006.5 m ³	88
Figura 5-18 Situazione attuale del rilevato con i due blocchi poggianti sulla testa dell'opera	90
Figura 5-19 Valutazione del Coefficiente di sicurezza dell'opera nelle reali condizioni in sito.....	91
Figura 5-20 Collettore in prossimità dei due blocchi.....	93
Figura 5-21 Grafico della cumulata di frequenza	94
Figura 5-22 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 0°	95
Figura 5-23 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 0°	95
Figura 5-24 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 0°	96
Figura 5-25 Max Shear strain condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 0°	97
Figura 5-26 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	97
Figura 5-27 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	98
Figura 5-28 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°.....	99

Figura 5-29 Max Shear strain condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	99
Figura 5-30 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	100
Figura 5-31 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	100
Figura 5-32 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	101
Figura 5-33 Max Shear strain condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	102
Figura 5-34 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto verticale	102
Figura 5-35 Scenario del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto verticale	103
Figura 5-36 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto verticale.....	104
Figura 5-37 Max Shear strain condizioni del blocco di 2.4 m ³ ed angolo di impatto verticale.....	104
Figura 5-38 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto orizzontale	105
Figura 5-39 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto orizzontale	106
Figura 5-40 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto orizzontale.....	107
Figura 5-41 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto orizzontale.....	107
Figura 5-42 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	108
Figura 5-43 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	108
Figura 5-44 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	109
Figura 5-45 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 13°	110
Figura 5-46 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	110
Figura 5-47 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	111

Figura 5-48 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°.....	112
Figura 5-49 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto pari a 24°	112
Figura 5-50 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto verticale.....	113
Figura 5-51 Scenario del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto verticale.....	113
Figura 5-52 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto verticale.....	114
Figura 5-53 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto verticale.....	115
Figura 6-1 Planimetria del versante (cortesia dott,Cavagnino).....	118
Figura 6-2 Sezioni del versante (cortesia dott. Cavagnino).....	118
Figura 6-3 Modello con aree di intervento a quota omogenea a quota omogenea in ambiente Gis.....	119
Figura 6-4 Zona di deposito dei blocchi senza l'intervento di risistemazione del pendio.	120
Figura 6-5 Zona di deposito dei blocchi con l'intervento di risistemazione del pendio	121
Figura 6-6 Valori delle velocità raggiunte dai blocchi lungo il versante.....	122
Figura 6-7 Valori dell'energia cinetica dei blocchi lungo il versante.	122
Figura 6-8 Carichi in direzioni orizzontale dovuti all'impatto di un blocco avente volumetria pari a 8 m ³ a seguito dell'intervento di riprofilatura.....	123
Figura 6-9 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento con blocco di 8 m ³ ed angolo di impatto orizzontale, a seguito dell'intervento di riprofilatura.....	124
Figura 7-1 Zona di deposito dei blocchi con l'intervento di risistemazione del pendio (rappresentate le zone a quota omogenea)	127

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1-1 Classificazione di Varnes (1978).....	14
Tabella 1-2 Coefficienti di Restituzione (Pfeiffer e Bowen, 1989)	22
Tabella 1-3 Coefficienti di restituzione (Richards, 1988).....	22
Tabella 1-4 Coefficienti di restituzione, Rocscience (2000).....	23
Tabella 4-1 Elenco e descrizione dei raster richiesti da RockyFor3D (Dorren,2014)49	
Tabella 4-2 Tipi di suolo e valori Rn definiti dal manuale d'uso di Rockyfor3D (Dorren, 2014).....	50
Tabella 4-3 Probabilità degli intervalli dell'angolo di deviazione del blocco dopo il rimbalzo, in funzione di tre velocità utilizzate dal software (Dorre, 2014).....	55
Tabella 4-4 Tabella degli attributi dello shapefile della zona di interesse.....	62
Tabella 5-1 Caratteristiche principali dei rilevati con anima in pietra (D. Peila et al (2009)).....	76
Tabella 5-2 Caratteristiche geometriche dei due blocchi presenti sul rilevato	78
Tabella 5-3 Valori delle forze dei blocchi impattanti sul rilevato	81
Tabella 5-4 Parametri di resistenza meccanica dei materiali che costituiscono il rilevato paramassi.....	84
Tabella 5-5 Parametri di resistenza pubblicati da D.Peila, et al(2007).....	84
Tabella 5-6 Valori utilizzati per la stabilità del rilevato con un blocco avente una volumetria pari a 2.4 m ³	92
Tabella 5-7 Parametri di input del collettore installato.....	93
Tabella 5-8 Valori utilizzati per la stabilità del rilevato con un blocco avente una volumetria pari a 8 m ³	105
Tabella 6-1 Valori utilizzati per la stabilità del rilevato con un blocco avente una volumetria pari a 8 m ³ , a seguito dell'intervento di riprofilatura.....	123

INTRODUZIONE

Il seguente elaborato è dedicato allo studio dell'effetto dei crolli in roccia in una zona alpina e all'individuazione di azioni per la messa in sicurezza degli elementi a rischio. L'analisi è svolta con particolare riferimento ad un interessante caso studio in Valsesia (provincia di Vercelli). Si tratta di un'area adiacente ad una cava di estrazione ormai inattiva, che dal 2016 è stata ampiamente interessata da numerosi crolli in roccia. In particolare, le elevate velocità raggiunte dai blocchi in movimento e la particolare morfologia del pendio, hanno favorito la propagazione dei blocchi per grandi distanze. L'opera di difesa costruita a valle ha subito l'urto di numerosi blocchi anche di grandi dimensioni che hanno messo a rischio la funzionalità dell'opera. Anche la strada a valle del pendio ha subito l'impatto di alcuni blocchi, portando le autorità locali a chiudere per alcuni periodi l'infrastruttura. Si è reso così necessario uno studio approfondito del sito, al fine di prevedere la possibilità di caduta di ulteriori blocchi, l'efficacia dell'opera di difesa esistente in termini di sicurezza e individuare un nuovo intervento lungo il versante che metta in sicurezza l'intera area. Queste attività sono sviluppate nella presente tesi.

L'elaborato è organizzato in 6 capitoli:

- I capitoli 1 e 2 hanno l'obiettivo di descrivere e classificare i fenomeni franosi, trattando in particolare l'evento di interesse, ovvero i crolli in roccia.
- Il capitolo 3 servirà per un inquadramento del sito di studio dal punto di vista morfologico, geologico ed idrogeologico, elencando gli eventi franosi degli ultimi anni.
- Il capitolo 4 riporterà una breve parte introduttiva sull'utilizzo del software Rockyfor3D per le analisi traiettografiche tridimensionali e, successivamente, saranno effettuate le analisi di propagazione della caduta dei massi che saranno confrontate con la situazione attuale in sito.
- Il capitolo 5 prevederà la valutazione del grado di stabilità dell'opera di difesa esistente a valle del pendio, nella condizione attuale e considerando uno scenario futuro in cui si verifichi l'impatto di ulteriori blocchi. Questa sarà condotta utilizzando un approccio numerico agli elementi finiti.

- Il capitolo 6 valuterà l'efficacia di un intervento di riprofilatura del pendio per garantire la sicurezza e l'accessibilità della strada a valle del rilevato paramassi.

1. CROLLI IN ROCCIA

I crolli in roccia sono dei fenomeni diffusi in tutta la Penisola Italiana . Per questo motivo è necessario uno studio approfondito e dettagliato del fenomeno, in modo da prevedere le traiettorie dei blocchi e la progettazione di interventi atti alla salvaguardia del territorio, dei beni e delle vite umane.

Si chiamano “crolli in roccia” quei fenomeni di caduta lapidea con dimensione compresa tra 0.02 m³ e 5 m³ che muovendosi sul versante possono raggiungere velocità di 30m/s. L’instabilità è dovuta a **cause predisponenti** ,come la natura geomorfologica del versante (orientazione delle discontinuità) e/o fenomeni di erosione al piede e/o la presenza di acqua all’interno delle discontinuità, e **cause scatenanti**, come le infiltrazioni d’acqua nelle discontinuità e/o cicli di gelo disgelo o azioni eccezionali come il sisma e/o lo scalzamento al piede. Nel corso degli anni, si è provveduto alla stesura di sistemi di classificazione franosi in modo da uniformare i casi su tutto il territorio e semplificare le procedure di valutazione del rischio.

1.1 Classificazione e descrizione dei fenomeni franosi

Il sistema di classificazione più noto è la classificazione di Varnes (1978). Essa fa uso di una tabella contenente la **tipologia di movimento** ed il **tipo di materiale**. Il nome del singolo evento è la combinazione del tipo di movimento e della tipologia di materiale. È importante notare che non tutte le combinazioni hanno le stesse probabilità di accadimento dato che alcune tipologie sono più ricorrenti.

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominantly 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
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow (deep creep)	Earth flow (deep creep)

Tabella 1-1 Classificazione di Varnes (1978)

Varnes distingue 6 classi di movimento:

- Crollo (falls): i versanti interessati sono pareti di roccia pseudoverticale da cui si distacca una massa o dei blocchi;
- Ribaltamento (topples): il materiale che si distacca effettua una rotazione attorno al punto di rotazione O. In questo caso le discontinuità generano delle colonne snelle e i blocchi ruotano attorno al punto O dato che la risultante delle forze dei blocchi cade al di fuori della base d'appoggio
- Scivolamento (slides): avviene uno scorrimento di masse di terreno o roccia lungo una superficie curvilinea, con concavità rivolta verso l'alto.
- Espansione laterale: sono delle frane particolari in cui non è presente né una superficie di scorrimento né una zona di deformazione plastica ben definita. Questo fenomeno si genera, solitamente, lì dove una massa rocciosa rigida e fratturata giace su materiale a minore resistenza e molto deformabile
- Colate (debris): le colate avvengono in ammassi rocciosi o terreno sciolto con movimenti simili a quelli di un fluido viscoso.

Le tipologie di materiale coinvolto sono 3:

- Bedrock: il materiale coinvolto è una roccia
- Debris: il materiale coinvolto è un detrito
- Earth: il materiale coinvolto è la terra, intesa come conglomerati di terreni a grana fine o grossa.

In *Figura 1-1* sono rappresentati i principali movimenti franosi descritti precedentemente.

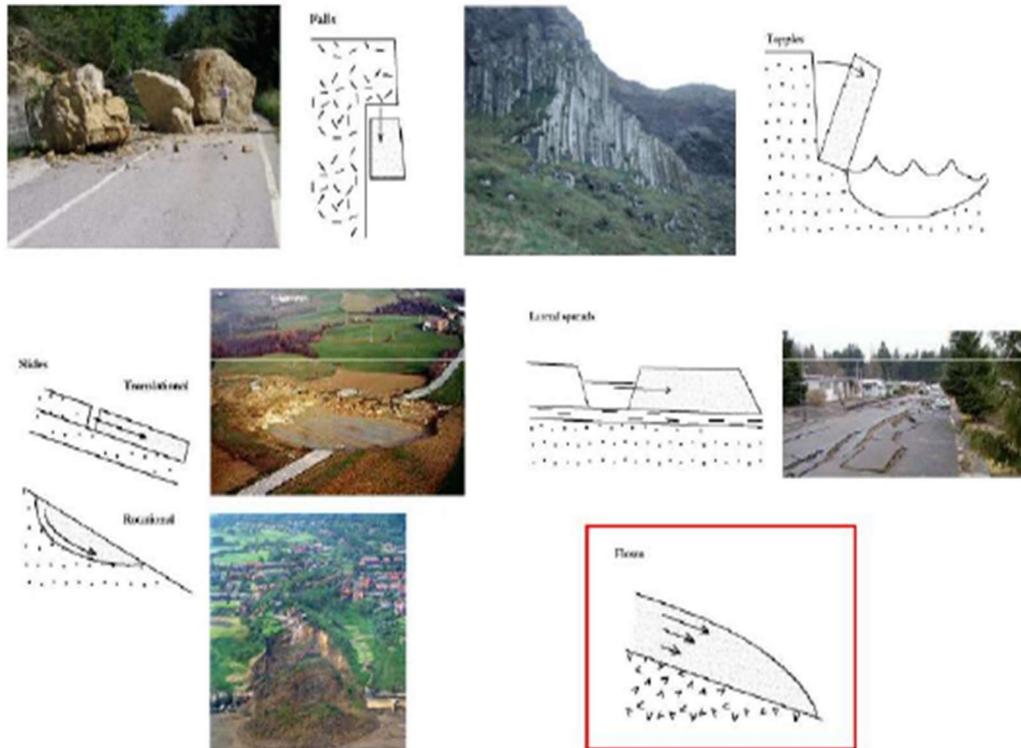


Figura 1-1 Sintesi della rappresentazione dei fenomeni franosi (Scavia 2015)

1.1.1 Cause e descrizione dei crolli in roccia

Nel caso studio in questione il fenomeno che interessa il versante è il crollo in roccia. L'innesco è determinato da una rottura per taglio o per trazione lungo i piani di discontinuità. Il cinematico dei blocchi è molto complesso. Esso prevede un ribaltamento o scivolamento con un successivo volo ed impatto contro il versante. Le velocità del fenomeno sono elevate (tra i 150-200 km/h) e di conseguenza anche le energie cinetiche.

Le principali cause predisponenti dei crolli in roccia sono legate alla morfologia del versante, in particolar modo alla presenza di pareti in roccia pseudo-verticali. A ciò si aggiunge anche l'erosione al piede del pendio che, diminuendo l'area di base del blocco, fa sì che la risultante delle forze agenti cada al di fuori della base. Le principali

cause scatenanti, invece, sono legate ai singoli eventi che hanno un tempo di ritorno T: tra questi possono essere citati le azioni sismiche, i cicli di gelo e disgelo, l'infiltrazione d'acqua nelle discontinuità che esercita una pressione diminuendo drasticamente il fattore di sicurezza FS, la presenza di radici ed infine cause di natura antropica come delle vibrazioni indotte dal passaggio di mezzi.

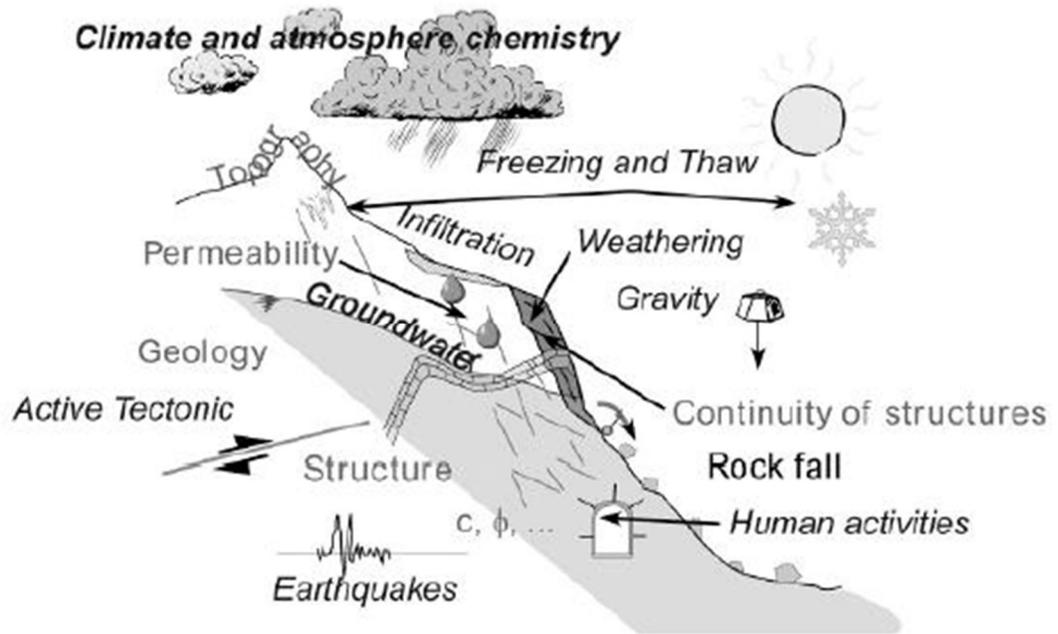


Figura 1-2 Possibili cause d'innescio di un fenomeno di caduta massi (Volkvein, 2011)

È possibile distinguere tre aree in cui si manifesta il fenomeno e sono rappresentate in *Figura 1-2*

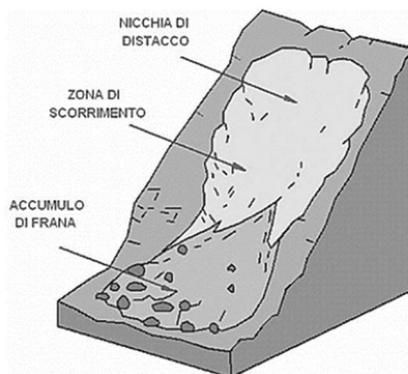


Figura 1-3 Aree principali del corpo frana

- La zona di innesco che viene rappresentata dalla nicchia di distacco
- Zona di trasporto e zona di deposito
- Zona di arresto, in cui si arrestano gran parte dei blocchi.

1.2 Analisi dinamica del moto

Per poter prevedere la propagazione dei blocchi lungo il versante interessato da instabilità e stimare le energie in gioco, è necessario lo studio della dinamica dei blocchi, ovvero l'evoluzione del moto nel tempo e nello spazio. Ogni qualvolta il blocco si muove liberamente nell'aria il cinematismo può essere di **caduta libera** o **caduta a gittata**. Nel primo caso il distacco della massa instabile è dovuto alla forza di gravità, mentre nel secondo caso la velocità iniziale è diversa da 0 dato che sul blocco agiscono delle sollecitazioni.

Viene analizzato adesso il modo di **caduta a gittata**. Il masso, una volta staccatosi dal versante, segue una traiettoria parabolica e le componenti della velocità nella direzione orizzontale e verticale sono entrambe diverse da zero (*Figura 1-4*)

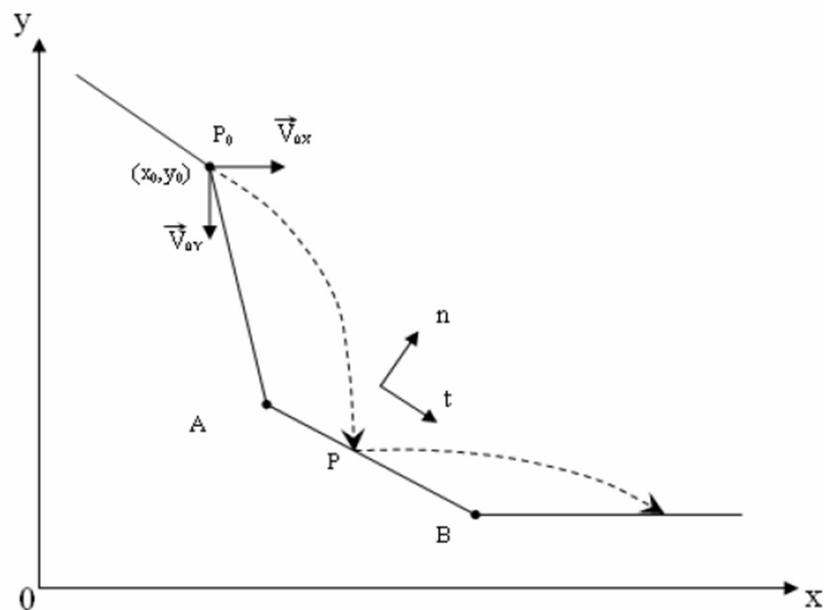


Figura 1-4 Descrizione del moto del blocco

Di conseguenza si hanno le seguenti condizioni iniziali:

- Posizione iniziale del blocco (x_0, y_0)
- Velocità iniziale del blocco (v_{0x}, v_{0y})

Dalle condizioni iniziali è possibile ricavare le equazioni del moto:

$$x = v_{0x} \cdot t + x_0$$
$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{0y} \cdot t + y_0$$

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

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

Un blocco soggetto alla **caduta libera** invece può raggiungere delle velocità comprese tra i 20 m/s e 40 m/s. La caduta è causata soltanto dalla gravità, per cui non sono presenti azioni tali da imporre una velocità iniziale non nulla. La velocità di caduta libera è strettamente collegata all'altezza iniziale in cui è collocato del blocco.

1.2.1 Interazione blocco pendio

L'interazione blocco pendio è un aspetto fondamentale durante lo studio dell'analisi di propagazione dato che da essa dipendono le quantità finali come velocità, altezze ed energie. Durante il contatto con il pendio, il blocco subisce un urto anelastico con conseguente perdita di energia che dipende da:

- Peso, forma, geometria e resistenza del blocco in esame.
- Topografia del pendio

- Natura e caratteristiche meccaniche dei materiali a contatto

I fenomeni di interazione blocco-pendio sono molteplici e sono classificabili come:

- Scivolamento
- Ribaltamento
- Impatto
- Frantumazione del blocco
- Arresto

Lo *scivolamento* è caratterizzato da una velocità angolare nulla ed una velocità traslazionale dipendente dall'attrito dinamico tra il blocco ed il pendio e dall'inclinazione del piano. La velocità traslazionale risulta maggiore rispetto a quella registrata nel caso del rotolamento ma si ha maggiore perdita di energia.

Nel caso del *rotolamento* il blocco possiede sia velocità angolare che velocità traslazionale, che progressivamente si riduce. Dal punto di vista cinetico, si può considerare come uno scorrimento lungo la superficie del pendio intorno al baricentro del blocco. Nel corso del tempo sono stati valutati alcuni parametri che influenzano la dinamica del moto di rotolamento e sono stati inseriti all'interno di un'equazione formulata da Paiola (1978), Bassatococco e Silvano (1985) i quali considerano il blocco a contatto con il pendio come un blocco rigido.

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

In cui i parametri:

- β è l'inclinazione del pendio
- δ_r =angolo di attrito dinamico di rotolamento
- s rappresenta la lunghezza del segmento
- α fattore in funzione della forma del blocco
- v_0 è la velocità del masso calcolata come velocità normale attraverso le componenti orizzontali e verticale

Nel caso della *rototraslazione* si ha la combinazione tra il rotolamento e lo scivolamento. Risulta interessante conoscere la velocità di cui è dotato di un blocco soggetto ad un moto rototraslativo che percorre un rettilineo di pendio. Tra le varie formule empiriche proposte si trova quella di Hoek (1987):

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot s \cdot g \cdot K}$$

Dove:

- V_0 è la velocità iniziale di discesa
- S è la distanza percorsa
- g è l'accelerazione di gravità
- K rappresenta la costante definita secondo la pendenza del versante θ e l'angolo di attrito del materiale a contatto φ

Dall'equazione di Hoek si può notare che la dimensione del blocco non è tenuta in conto e per tanto rappresenta una semplificazione del problema. Essa risulta accettabile in quanto la forma del blocco, durante l'impatto del pendio, varia istante per istante a causa delle continue rotture o a causa degli smussamenti degli spigoli. Risulta pertanto difficile definire, all'interno di una modellazione del fenomeno di caduta, la forma precisa del blocco.

Il *rimbalzo* è la fase transitoria di impatto del blocco sul pendio. In questa fase le componenti sono influenzate dalla pendenza locale e dalle caratteristiche del materiale. Affinchè si possa conoscere il comportamento del blocco in questa fase è necessario conoscere la forma del medesimo prima e dopo l'impatto ed il coefficiente di restituzione R espresso come:

$$R = \frac{v'}{v}$$

Ovvero il rapporto tra la velocità del blocco dopo il rimbalzo e la velocità del blocco prima del rimbalzo. In termini energetici, il coefficiente di restituzione definisce la perdita di energia cinetica che avviene durante l'impatto con il pendio. E' utile considerare due coefficienti omologhi di restituzione, r_n ed r_t , rispettivamente in direzione normale e tangenziale al piano di impatto. In assenza di valori certi, si può

far riferimento ai valori proposti in letteratura in base alla natura del materiale considerato (Tabella 1-2. 1-3, 1-4).

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 1-2 Coefficienti di Restituzione (Pfeiffer e Bowen, 1989)

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

Tabella 1-3 Coefficienti di restituzione (Richards, 1988)

Materiale	R_a	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

Tabella 1-4 Coefficienti di restituzione, Rocscience (2000)

Infine, *all'arresto* del blocco corrisponde la totale dissipazione dell'energia cinetica. Questa fase è influenzata dalla velocità, la dimensione e la forma del blocco, dalla tipologia del suolo e la vegetazione presente sul versante. Durante la fase di moto si ha una distribuzione dei frammenti di roccia, le cui energie cinetiche variano in funzione della loro dimensione. Di fatto, saranno i frammenti di piccole dimensioni ad arrestare il loro moto per primi a causa dell'annullamento dell'energia cinetica.

1.2.2 Effetti della forma del blocco

La forma e la resistenza del blocco sono due aspetti fondamentali durante l'impatto del blocco contro il pendio. Infatti, se il tipo di roccia costituente il blocco è tenero, durante la caduta e la collisione con il pendio, avviene una smussatura degli spigoli degli spigoli. Mentre, se il blocco è caratterizzato dalla presenza di piani di scistosità (come avviene ad esempio in alcune tipologie di rocce) la rottura avviene lungo codesti piani.

A tal proposito è importante la relazione tra la forma del blocco e la scabrezza della superficie del versante. La scabrezza del terreno induce un incremento del numero dei rimbalzi e dell'altezza riducendo così la velocità e, come conseguenza, l'energia di impatto. La scabrezza è valutata come la massima altezza di un ostacolo che potrebbe

incontrare il blocco in caduta durante il suo tragitto. Per tanto, una volta individuato il volume del blocco, diventa opportuno rapportarlo con la scabrezza. Dal rapporto possono essere identificati diversi scenari (Figura 1-5):

- Se la massa in caduta ha un volume maggiore a quello dei detriti individuati sul pendio allora vi è una maggior perdita di energia durante l'impatto ed il blocco tende a rotolare;
- Se il blocco a un volume minore o uguale a quello dei detriti presenti sul pendio, si instaura un meccanismo di rimbalzi consecutivi



Figura 1-5 Percorso dei blocchi lungo un pendio caratterizzato da detrito (Giani, 1992)

2. METODI DI ANALISI DELLA CADUTA MASSI

L'analisi di propagazione della caduta massi è necessaria per la valutazione della pericolosità (H) e del rischio (R). Queste attività consentono di suddividere il territorio in classi a diversa pericolosità e rischio e, di pianificare le azioni che mirano a mitigare il rischio e a salvaguardare la vita delle persone e dei beni. La valutazione della pericolosità è basata su:

- Previsione tipologica
- Previsione spaziale
- Previsione temporale
- Previsione dell'evoluzione
- Previsione dell'intensità

L'obiettivo della *previsione tipologica* è quello di identificare la tipologia di frana che può verificarsi nell'area in esame attraverso l'utilizzo di carte geologiche o di monitoraggio e sondaggi. Come citato nel *Capitolo I*, esistono dei sistemi di classificazione come quello di Varnes che prevedono, tenendo in conto la natura del materiale e la morfologia del versante, che tipo di frana può attivarsi. Questa fase risulta importante perché da essa dipendono le scelte dei metodi di analisi.

La *previsione spaziale* consiste nell'individuare le zone potenzialmente instabili attraverso l'ausilio di tecniche e strumenti adatti a definire un adeguato modello di innesco. La localizzazione avviene attraverso l'osservazione di eventuali **segni di dissesto** presenti sul versante (come fratture nel terreno, lesioni di edifici), **foto aeree e indagini storiche**. Una volta individuato l'area potenzialmente instabile si procede con la valutazione del volume del materiale coinvolto. La superficie è ricavata, ad esempio, attraverso l'ausilio di Modelli Digitali del Terreno (DTM) o Modelli Di Elevazione del Terreno (DEM). Lo spessore è invece calcolato con delle indagini in situ, come indagine geofisiche.

La *previsione spaziale* analizza quindi i possibili fenomeni di innesco, d'altra parte però in essa manca l'informazione temporale che è invece fornita dalla *previsione temporale*. Essa è la previsione di quando può avvenire un determinato fenomeno

franso in un determinato contesto spaziale. Questo tipo di previsione non definisce l'istante di tempo al quale avviene il distacco bensì la probabilità di occorrenza P di un evento di intensità I nell'intervallo di tempo di 1 anno. A tal fine è necessario calcolare il periodo di ritorno T espresso come:

$$T = \frac{1}{P}$$

Lo scopo e l'obiettivo di questo studio è la *previsione dell'evoluzione*, ovvero la previsione della distanza di propagazione e di espansione laterale del fenomeno franso. Una volta individuati i principali parametri dell'evoluzione come distanza percorsa, traiettorie, altezze di rimbalzo e depositi dei blocchi è possibile progettare un'opera di mitigazione che riduca gli effetti dell'evento franso sul territorio. Per poter effettuare queste previsioni è necessario poter costruire dei modelli di analisi. La validazione del modello avviene attraverso la simulazione di eventi realmente accaduti; la verifica può ritenersi soddisfatta nel momento in cui il modello e gli eventi reali sono più prossimi tra loro.

I metodi di analisi traiettografica disponibili bidimensionali (2D) o tridimensionale (3D) sono suddivisi in:

- Modelli empirici;
- Modelli analitici;
- Modelli numerici

2.1 Modelli empirici

I modelli empirici sono dei metodi semplificativi che consentono di stimare rapidamente le aree di invasione in modo approssimato ed in particolare sono utilizzati per grandi aree. La stima dei parametri è affetta da notevole incertezza dato che è basata su serie storiche e quindi su eventi già avvenuti.

2.1.1 Metodo Geomorfologico

Il metodo geomorfologico prevede di esaminare l'area di interesse mediante sopralluoghi. Riprese aeree, fotografie satellitari e cartografia tecnica. Ad esempio, qualora l'attenzione fosse focalizzata sul fenomeno di caduta massi, il rilievo restituirebbe la presenza di blocchi ottenendo così un'indicazione attuale sulla distanza massima raggiunta dai blocchi. Ovviamente questo metodo ha dei vantaggi, come la semplicità di applicazione e la rapidità, ma anche degli svantaggi dato che i risultati ottenuti si riferiscono solo ed esclusivamente al sito specifico ed inoltre vi è l'assunzione implicita che l'evento critico sia già avvenuto.

2.1.2 Metodo Geometrico

Il metodo geometrico è un metodo basato sul rilievo di eventi già verificati nella storia. E' caratterizzato da un database di eventi contenente la posizione, la data e la fonte da cui l'informazione è tratta, una stima del volume coinvolto, l'origine e i parametri L , H ed α che rappresentano rispettivamente la distanza punto prossimale-punto distale che è la massima distanza percorsa dal blocco, la distanza nel piano verticale ed infine l'angolo della congiungente punto prossimale-distale rispetto all'orizzontale, corrispondente al rapporto tra la massima elongazione e la massima altezza di caduta. Quest'ultimo parametri viene anche chiamato **travel angle** (Figura 2-1).

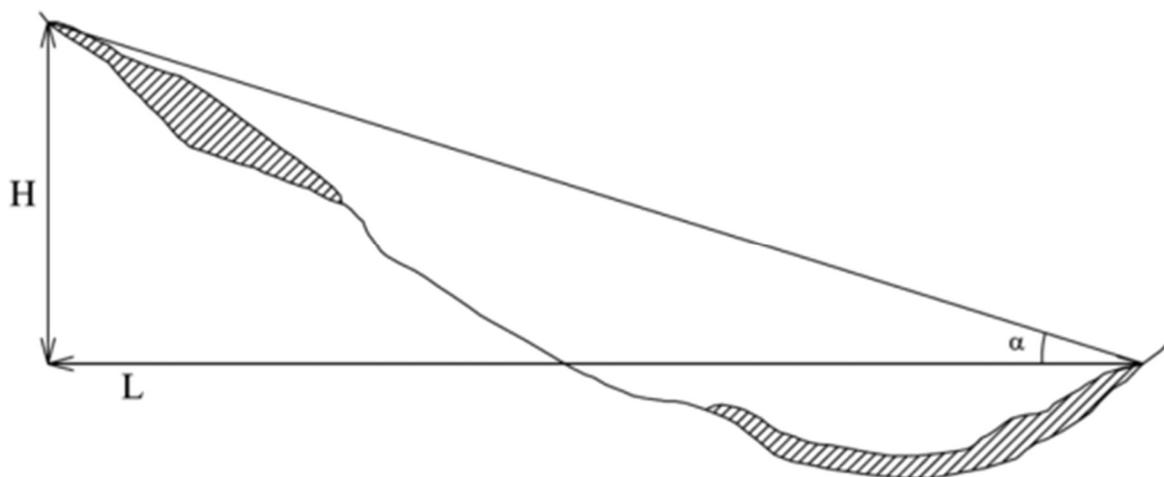


Figura 2-1 Schema semplificato del Metodo Geometrico (Pirulli,2018)

In una zona circoscritta soggetta periodicamente a eventi in cui si assume che sia coinvolto un materiale con le stesse caratteristiche, per ogni evento passato un rilievo fornisce una stima del volume, della massima elongazione e dell'altezza di caduta. A partire da questi dati si definiscono l'evoluzione e la distanza di arrivo. In che modo?

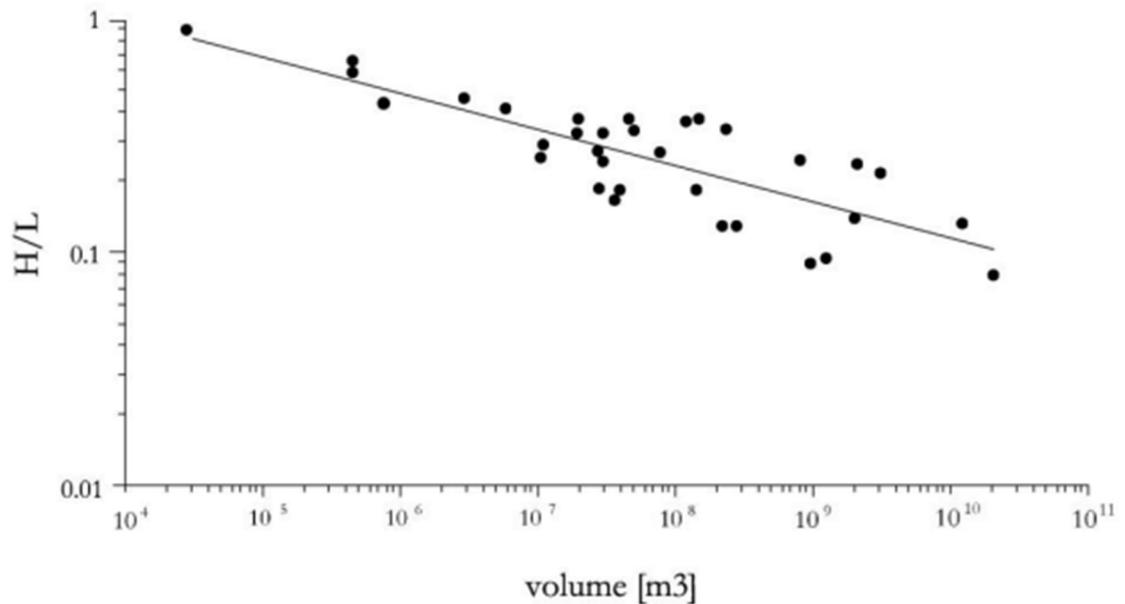


Figura 2-2 Relazione tra il volume ed il rapporto H/L (Scheidegger, 1973; Corominas, 1996; Legros, 2002;)

I dati disponibili degli eventi passati sono riportati in un grafico come quello mostrato in *Figura2-2*, dando luogo ad una nuvola di punto che sarà interpolata mediante una retta avente equazione:

$$\log \frac{H}{L} = a \log V + b$$

In cui **a** rappresenta il coefficiente angolare della retta e **b** l'intercetta. Tale equazione riflette l'evoluzione dell'evento in esame e dipende dalle caratteristiche dell'evento stesso.

Quando si analizza un potenziale evento, l'incognita è la massima elongazione L , mentre il parametro H è valutato in base al fondovalle. Avendo disponibile il dato relativo al volume e conoscendo la legge che lo lega ad H/L , posso ricavare l'elongazione massima L dato che il parametro H è noto. Essendo un metodo semplificato, l'equazione è valida solo per un certo tipo di fenomeno con un certo tipo di materiale poiché i parametri a e b dipendono del fenomeno considerato. Dunque, per poter applicare il suddetto metodo, è necessario che i fenomeni abbiano caratteristiche simili.

In conclusione, i metodi empirici sono intuitivi e semplici da utilizzare ma hanno dei limiti come l'applicabilità limitata ed inoltre considerano la propagazione soltanto lungo una sezione, trascurando quella laterale. Per tali motivi sono spesso considerati come metodi preliminari.

2.2 Modelli Numerici

L'analisi con i metodi numerici prevede il ricorso ad un modello, cioè ad una semplificazione della realtà. La massa eterogenea può essere schematizzata secondo due metodi:

- Metodo del discontinuo: si modellano le singole particelle, preoccupandosi di definire la forma, la dimensione dell'elemento rappresentativo ed il numero di particelle. Tra questi metodi rientra il *Discontinuous Deformation Analysis- DDA* che viene utilizzato in fase di distacco ed in fase di evoluzione. Esso è basato sulla risoluzione di un sistema lineare di equazioni di equilibrio con la minimizzazione dell'energia complessiva. Le incognite del problema sono gli spostamenti e quindi le deformazioni. Un altro metodo che fa parte di questa categoria è il *DEM* ovvero il *Distinct Element Method* che permette di simulare il contatto tra le particelle e la loro interazione.
- Metodo del continuo equivalente: tale metodo non prevede la modellazione della particella, bensì di valutare la propagazione di una massa continua che si deforma. La risoluzione del problema prevede la risoluzione di un sistema costituito da equazioni di conservazioni della massa, equazioni della

conservazione della quantità di moto ed equazioni della conservazione della massa. Questo metodo è utilizzato per lo studio di colate detritiche.

2.3 Modelli Analitici

I modelli analitici prevedono la definizione della geometria del versante e l'assegnazione dei parametri geomeccanici che costituiscono il pendio e le masse instabili e si possono suddividere in diverse categorie dipendenti dalla bidimensionalità o tridimensionalità del problema e dall'approccio di tipo deterministico o probabilistico. Nel primo, durante l'analisi, non vi è la possibilità di controllare la variazione dei parametri che rimangono fissi a meno che non venga considerato un intervallo di valori prefissati che hanno la medesima probabilità di occorrenza. Nel modello analitico probabilistico invece, ad ogni parametro in input viene assegnata una distribuzione statistica. Per tanto, in quest'ultimo caso, ogni traiettoria ricavata avrà una probabilità di accadimento.

2.3.1 Metodo Lumped Mass

Il metodo Lumped Mass idealizza il moto della massa come quello relativo allo spostamento di un punto corrispondente al baricentro: noto il baricentro nella posizione di innesco e nel deposito, l'analisi segue solo l'evoluzione del baricentro, prendendo l'informazione volumetrica; la traiettoria è quindi indipendente dalla massa del blocco. L'evoluzione del punto è trattata secondo un'analisi energetica dalla quale sarà possibile ricavare il punto finale di arresto, inoltre viene trascurata la resistenza dell'aria.

La *definizione del profilo del versante* bidimensionale avviene attraverso l'estrapolazione da una serie di dati storici o da sezioni di un DTM. Da queste sezioni si ricavano dei segmenti che verranno poi inseriti nell'analisi. Al pendio successivamente assegnate le caratteristiche meccaniche ottenute mediante delle analisi o sondaggi. In un'analisi 3D il profilo viene definito mediante l'utilizzo di modelli digitali del terreno DTM o DEM.

Successivamente si procede alla *definizione della nicchia di distacco* che, pur essendo molto difficile da individuare, può essere identificata attraverso l'utilizzo di carte storiche o facendo riferimento ad eventi passati. In un modello bidimensionale (ad esempio su RocFall) la nicchia di distacco è definita da dei segmenti mentre in ambiente 3D sono costruite delle superfici (ad esempio su GIS). Dalle nicchie di distacco si dirameranno le varie traiettorie alle quali verranno assegnati dei parametri probabilistici, utili a definire l'aleatorietà del problema.

La *dimensione del blocco* è simulata con una geometria approssimata mediante figure solide semplici (cilindro, sfere, cubi). Così come per la nicchia di distacco, anche per la valutazione della dimensione del blocco si procede facendo riferimento ad eventi storici e/o osservando ed misurando i blocchi presenti al disotto della nicchia di distacco. Un altro metodo è rappresentato dai rilievi delle discontinuità dell'ammasso roccioso e dalle zone potenzialmente instabili. Durante l'analisi di propagazione è fondamentale effettuare una distribuzione statistica delle masse in gioco, essendo la dimensione (e quindi la massa) un valore affetto da incertezza.

Successivamente si sceglie la *velocità* con cui il volume si stacca. Risulta, quindi, fondamentale distinguere due casi: a) velocità iniziale diversa da zero b) velocità iniziale nulla. Nel primo caso, qualora il blocco avesse un valore non nullo, si deve procedere valutando le cause scatenanti che imprimono al blocco un valore di velocità iniziale diverso da zero, inoltre deve essere valutata anche la tipologia di cinematismo. Successivamente si stimano le componenti della velocità nelle 3 direzioni. La velocità con cui il blocco impatta condiziona la dissipazione energetica, dalla quale dipenderà la velocità post impatto.

Quest'ultima dipende, in particolare, dai *parametri di restituzione dei materiali costituente il versante*. Essi vengono tarati attraverso delle back-analysis partendo da dei valori ricavabili in letteratura (assegnati ad una tipologia di materiale) che verranno aggiornati per ogni analisi. I parametri, come i coefficienti di restituzione, saranno approvati nel momento in cui il software riproduca la situazione reale in sito.

Lo step successivo consiste nell'assegnazione dei *parametri di resistenza* del versante, come angolo di attrito e scabrezza della superficie del pendio. Infine viene valutato il

numero di simulazioni. La normativa consiglia di effettuare un minimo di 1000 simulazioni.

Un software utilizzato per la simulazione dell'analisi di propagazione è Rocfall (Rocscience). Esso prevede un'analisi bidimensionale seguendo i passaggi definiti precedentemente. Tuttavia, avvolte, sono preferiti dei modelli 3D dato che tengono in conto l'effetto dell'espansione laterale, cioè la deviazione della traiettoria dalla direzione di massima pendenza. Alcuni studi indicano una dispersione laterale pari al 20% della lunghezza su pendii uniformi. Su pendii irregolari tali dispersione può essere anche molto maggiore (*Figura 2-3*).

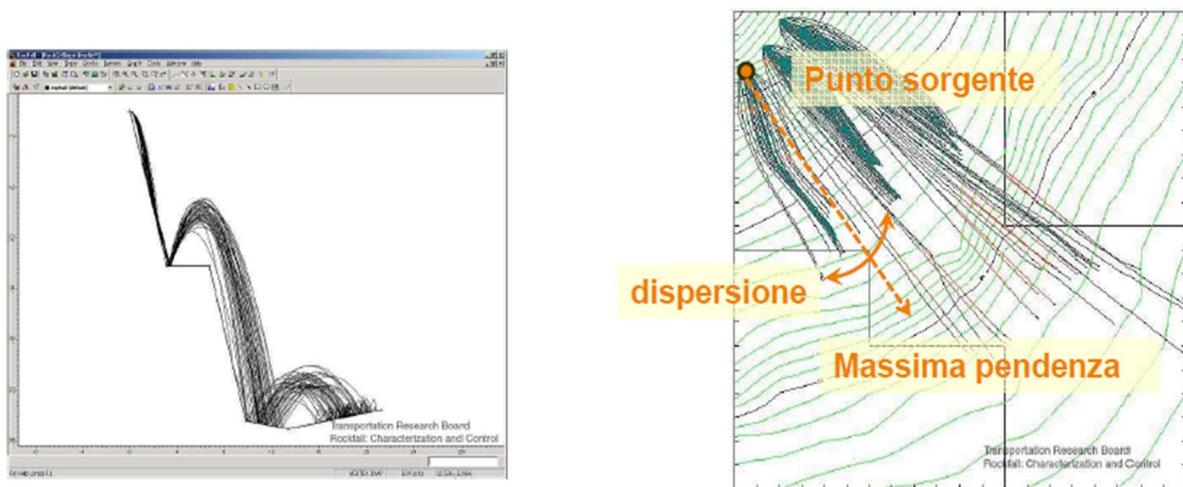


Figura 2-3 Modelli 2D e 3D a confronto (Barbero,2018)

2.3.2 Metodo “rigid body”

Nel metodo “rigid body” il blocco è simulato tramite la definizione della massa, dimensioni e forme semplificate. Tali parametri vengono scelti nella fase preliminare dell'analisi. Durante le fasi del moto, il blocco impatta sul versante cambiando la sua forma e la sua geometria. Le fasi di analisi del metodo “rigid body” sono simili a quelle seguite nel *paragrafo 2.3.1*. A differenza del metodo “lumped mass”, nel metodo

“rigid body” sono tenuti in conto anche i coefficienti che tengono conto della variazione della componente tangenziale della velocità.

2.3.3 Metodo “ibrido”

Il metodo “ibrido” è una sintesi dei metodi rappresentati precedentemente. Esso si basa sul metodo *lumped mass* per simulare la fase di caduta libera e il metodo del *blocco rigido* per simulare le fasi di moto lungo il versante, l’impatto e il rimbalzo.

I risultati forniti dai tre metodi danno delle informazioni sulle possibili zone di accumulo e deposito del materiale. Vengono anche forniti i parametri delle velocità, altezze di rimbalzo ed energie cinetiche che potranno essere utilizzati successivamente per la progettazione e le verifiche di opere geotecniche, o semplicemente per individuare le zone a rischio.

3. CASO STUDIO

3.1 Inquadramento geografico

L'area oggetto di studio si trova nel comune di Vercelli (VC), a Nord della Regione Piemonte ed ai confini con la Regione Valle D'Aosta. Il sito è ubicato nel cuore della Valsesia, una valle alpina della provincia di Vercelli che prende il nome dal fiume Sesia. L'estensione della Valle è di circa 763 km² ed un'altitudine che varia tra i 250 m s.l.m ed 4554 m s.l.m. I principali torrenti della Valle confluiscono nel corso d'acqua principale Sesia che ha un bacino idrografico pari a 3037.6 km² . La Valsesia si estende dal Monte Rosa fino a Romagnano Sesia e comprende diverse valli; quella principale è la Val Grande che ha come confini geografici il comune abitato di Alagna Valsesia.



Figura 3-1 Limiti Geografici della Valsesia (Immagine Satellitare di Google Earth)

All'interno del Comune di Alagna Valsesia vi è una miniera ormai dismessa chiamata "Miniera di Kreas". Sul sito Web del comune di Alagna Valsesia vi è una breve descrizione della Miniera:

“ Il caseggiato detto Fabbrica di San Lorenzo è quanto rimane dei tre Fabbricati che componevano il “quaeriere dell’oro”, denominato “Kreas” nel tardo Ottocento. Il vasto complesso per la raffinazione dell’oro fu edificato nel corso del Settecento nei pressi della “Cava Vecchia”, già conosciuta e sfruttata nel secolo precedente. Qui il minerale aurifero, proveniente dalle miniere di Mus, Jazza del vallone delle Pisse, veniva macinato, separato con il mercurio, quindi rifuso più volte per eliminare le scorie. Nei primi anni del Novecento, ogni ventiquattro ore, venivano depurate circa cinquanta tonnellate di minerale dalle quali si ricavava poco meno di un chilogrammo d’oro. Ogni galleria possedeva un nome identificativo mentre Kreas indica il toponimo del luogo dove erano numerose altre gallerie. Qui si sviluppava il più importante filone minerario dei giacimenti di Alagna. Fu nel 1752 che i giacimenti auriferi di Alagna vennero inclusi in un piano di coltivazione delle Regie finanze dei Savoia dal cavaliere Nicolis de Robilant di ritorno dalla Germania dove, nelle miniere e fonderie della Savoia e delle Boemia, aveva acquistato l’esperienza necessaria. Si trattava di gestione diretta da parte dello Stato e questo durò fino al 1771, anno nel quale “...le tre miniere aurifere di Alagna dette di S. Maria di Stofful, Cava Vecchia e Borso...” furono concesse via via a vari privati, i quali proseguirono le attività sino al 1890, quando fece la sua apparizione la società inglese “Monte Rosa Gold Mining Company Limited”. Ma anche questa, sia per i mezzi usati sia per mancanza di capitali, dovette cessare la sua attività pochi anni dopo e decise nel 1905 di cedere i diritti di sfruttamento ad un’altra società, “THE NEW MONTE ROSA GOLD MINING COMPANY LIMITED”, che riprese i lavori all’inizio del 1906 sotto la direzione dell’ingegnere Pietro Catzigera. La sua compagnia nello sfruttare le miniere, adottò nuovi sistemi di trattamento del minerale, anzitutto applicando metallurgicamente il principio della galvanoplastica. La direzione dell’ing. Catzigera ebbe grande importanza sociale ed economica. Infatti il giovane direttore aveva stabilito che ogni operaio prima di essere assunto venisse sottoposto, a spese della società, ad una accurata visita medica successivamente ripetuta ogni mese. Nel 1938 la miniera passò

sotto l' AMMI - Azienda Minerali Metallici Italiani, ma non fu eseguito nessun lavoro. Negli anni del dopoguerra trovarono lavoro solo 5-6 operai; nel 1956 la nuova società "Gold Mining Monte Rosa" presentò faraonici progetti, ma nel '58 dichiarò fallimento e la miniera d'oro chiuse definitivamente." (Sito WEB Comune di Alagna,2019).



Figura 3-2 Inquadramento geografico area di interesse e Miniere di Kreas (Google Earth, 2018)

Nella *Figura 3-2* è rappresentata all'interno della circonferenza, l'area instabile, che sarà l'oggetto di studio della seguente trattazione, e le strutture della Miniera di Kreas.

3.2 Inquadramento Geomorfológico

Il territorio è caratterizzato dalla presenza contemporanea di valli e piccole pianure alluvionali. La Valsesia è costituita prevalentemente da rocce che si trovavano sul margine africano (Alpi Meridionali e dominio Austroalpino); le rocce provenienti dall'oceano si incontrano ad Alagna; le rocce che si trovavano sul margine europeo costituiscono il massiccio del Monte Rosa. In Valsesia le Alpi meridionali mostrano una sezione quasi completa di crosta continentale prealpina, ruotata di 90° e riesumata durante l'orogenesi alpina, in modo tale da esporre livelli crostali progressivamente più profondi. L'ulteriore sollevamento tettonico di tutta l'area alpina determinò una regressione marina con migrazione progressiva della linea di costa verso SE. L'area divenne dapprima un ambiente lagunare e poi una pianura alluvionale solcata da corsi d'acqua, i cui carichi sedimentari, costituiti da ghiaie grossolane, andavano a formare un grosso ventaglio a debole pendenza.

La Valsesia insieme a tutta l'area alpina fu interessata da diverse avanzate dei ghiacciai durante tutto il Pleistocene. I corsi d'acqua, alimentati dalla fusione dei ghiacciai, trasportarono verso il fondo valle della valle grandi quantità di materiale detritico, dando origine alle maggiori conoidi alluvionali che raccordano le valli tributarie a quella principale. Tra i caratteri geomorfologici presenti nel territorio in esame prevalgono quelli legati all'azione di modellamento esercitato dai ghiacciai durante le glaciazioni pleistoceniche. In riferimento alla normativa geologica allegata al Piano Regolatore Generale di Alagna, l'area interessata ricade nella classe di pericolosità 3, comprendendo aree con condizioni fisiche sfavorevoli legate alle precarie condizioni di stabilità. (Arpa Piemonte 2005)

3.3 Fenomeni franosi in Valsesia

La Valsesia, a causa delle avverse condizioni climatiche e della morfologia caratterizzata dalla diffusione di zone acclivi, è soggetta periodicamente a fenomeni di instabilità quali frane da crollo e/o da ribaltamento. Seguono i fenomeni franosi per

colamento rapido anche a causa della saturazione e successiva fluidificazione della copertura superficiale.

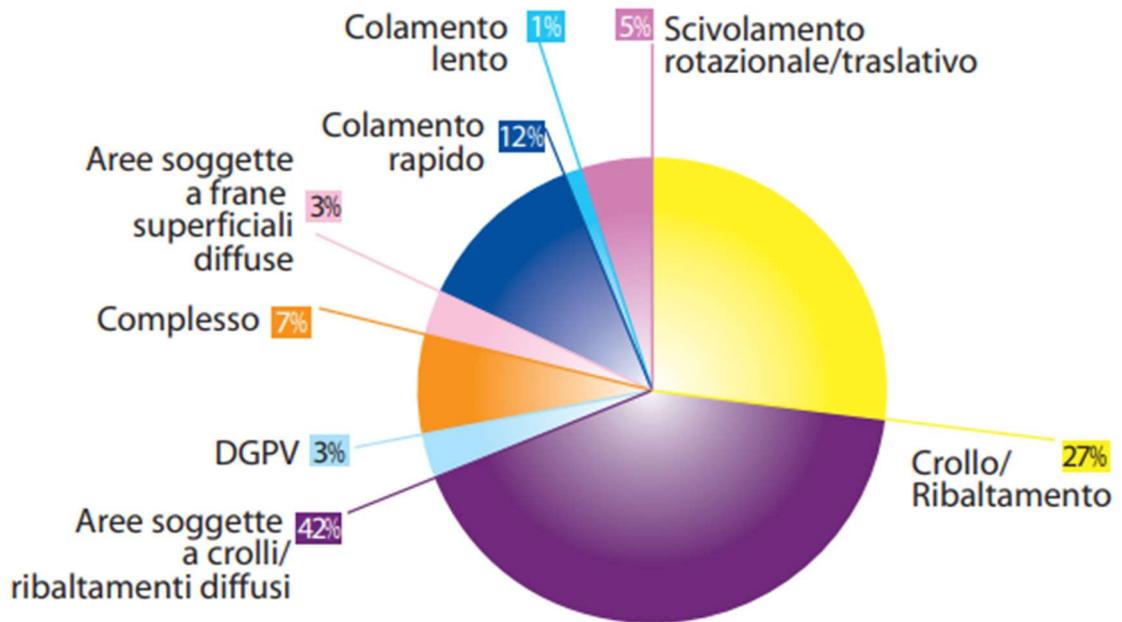


Figura 3-3 Percentuale di tipologie franose in Valsesia (Arpa Piemonte 2005)

Dalla *Figura 3-3* si può notare come il fenomeno più diffuso sia il crollo/ribaltamento con il 42% degli eventi di instabilità in Valsesia. Si può affermare che la zona in questione sia stata periodicamente soggetta ad eventi alluvionali anche di grave entità. Da un'analisi storica relativa ai dissesti nel bacino del Sesia si rileva che i periodi in cui avvengono fenomeni di instabilità sono concentrati in estate ed autunno. Luglio ed Agosto sono dei mesi con un elevato tasso di precipitazione anche di breve durata ma con forte intensità che possono dare origine a processi torrentizi e frane superficiali.

3.3.1 Crolli nella zona della Miniera "Kreas", Località "Merletti"

A partire da Marzo 2016 si sono registrati dei crolli in roccia nella zona della Miniera di "Kreas", in particolare nella Località "Merletti" (*Figura 3-4*), ad ovest del fiume Sesia. Le cause scatenanti dei fenomeni d'instabilità sono state la presenza di acqua all'interno delle discontinuità che ha esercitato delle pressioni non trascurabili e/o i

continui cicli di gelo-disgelo che hanno incrementato la probabilità di distacco dei blocchi in roccia. A ciò si aggiungono anche le cause predisponenti come l'acclività del versante.

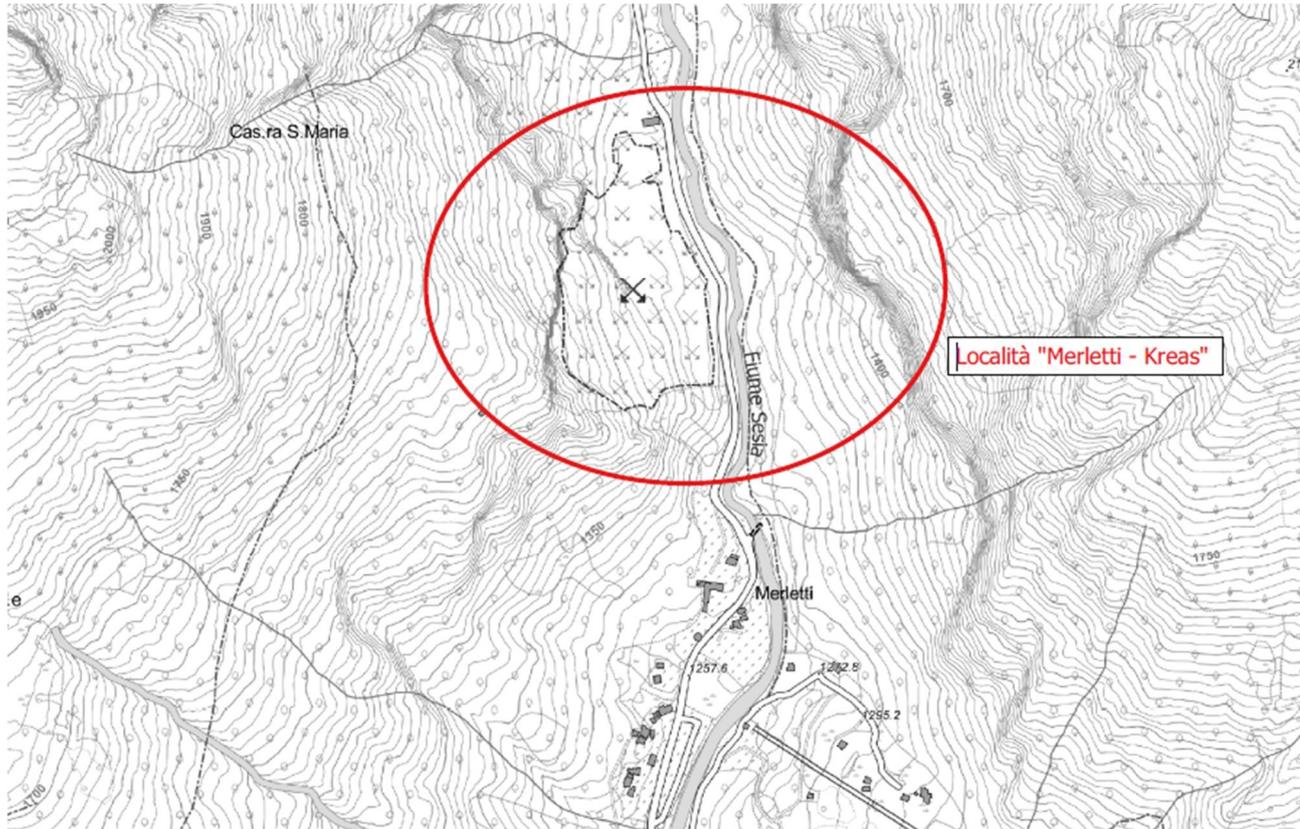


Figura 3-4 Estratto da BDTRE_2018 della Regione Piemonte Comune di Alagna Valsesia (VC), Scala 1:10000

3.4 Analisi del caso studio

I crolli in roccia nella zona “Merletti” della miniera d’oro di Kreas hanno creato disservizi come la chiusura della strada sottostante. I numerosi blocchi, infatti, hanno invaso l’infrastruttura costringendo le autorità locali a deviare il percorso rendendo inaccessibile la zona. Come si può notare dalle *Figura 3-5* e *Figura 3-6* alcuni blocchi, rimbalzando sulla pavimentazione stradale, hanno invaso anche l’alveo del Fiume Sesia. In particolare la presenza dei blocchi sul ciglio della pavimentazione stradale ha reso difficoltoso l’utilizzo della medesima.



Figura 3-5 Foto scattata dal personale del Politecnico durante un'ispezione in sito.



Figura 3-6 Foto scattata dal personale del Politecnico durante un'ispezione in sito.

Come si può notare dalla *Figura 3-7* i volumi dei blocchi coinvolti nei crolli sono variabili. Dalle ispezioni della Regione Piemonte e dei tecnici coinvolti, si sono ricavati dei volumi che raggiungono volumi pari a 1000 m^3 (come ad esempio il blocco in alto a sinistra della *Figura 3-6*).

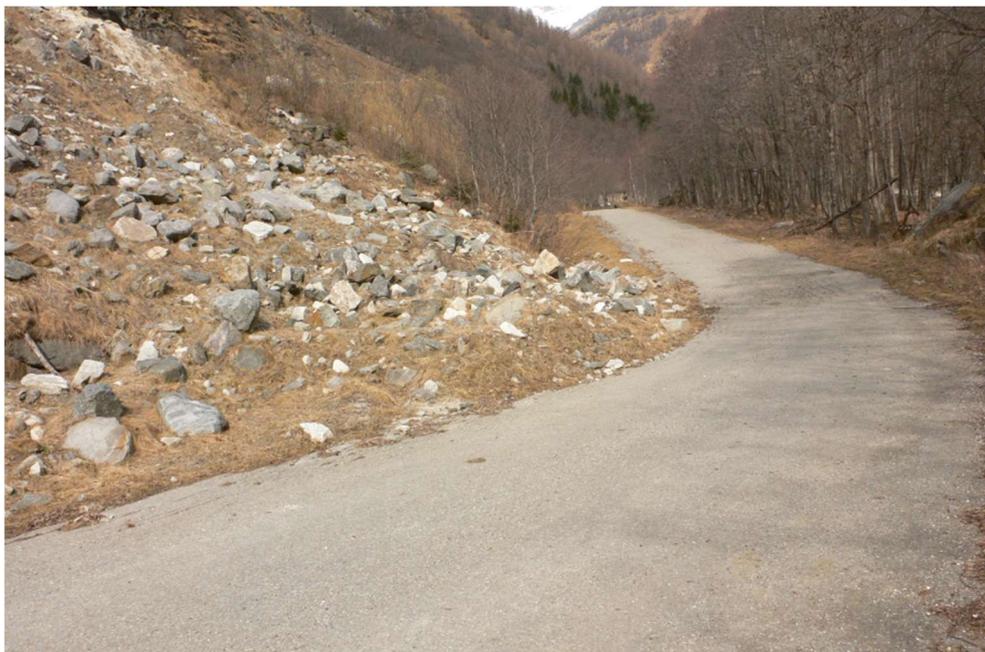


Figura 3-7 Foto scattata dal personale del Politecnico durante un'ispezione in sito.

A valle del versante interessato dalla caduta dei blocchi è stato costruito, non recentemente, un *rilevato paramassi* che ha il ruolo di difendere la strada sottostante. Esso è costituito da un'anima in pietra e da un rivestimento in terreno battuto; durante i crolli avvenuti nel tempo l'opera ha subito degli impatti molto violenti. In particolare, due monoliti aventi volumi rispettivamente di 1000 m^3 e 504 m^3 si sono arrestati in testa producendo degli affondamenti non trascurabili. Nella *Figura 3-8* è evidenziata in rosso l'estensione del rilevato con i due monoliti conficcati in testa. A monte del rilevato vi è una zona di accumulo in cui si sono depositati numerosi blocchi provocando, in qualche modo, una barriera nei confronti della caduta di ulteriori massi. Dalla *Figura 3-9* si possono ricavare le distribuzioni dei volumi, i limiti del corpo frana (in azzurro) e le fratture rilevate (in rosso).



Figura 3-8 Zona del crollo e Rilevato Paramassi con la presenza dei due blocchi. Immagine Satellitare Google Earth (2016)

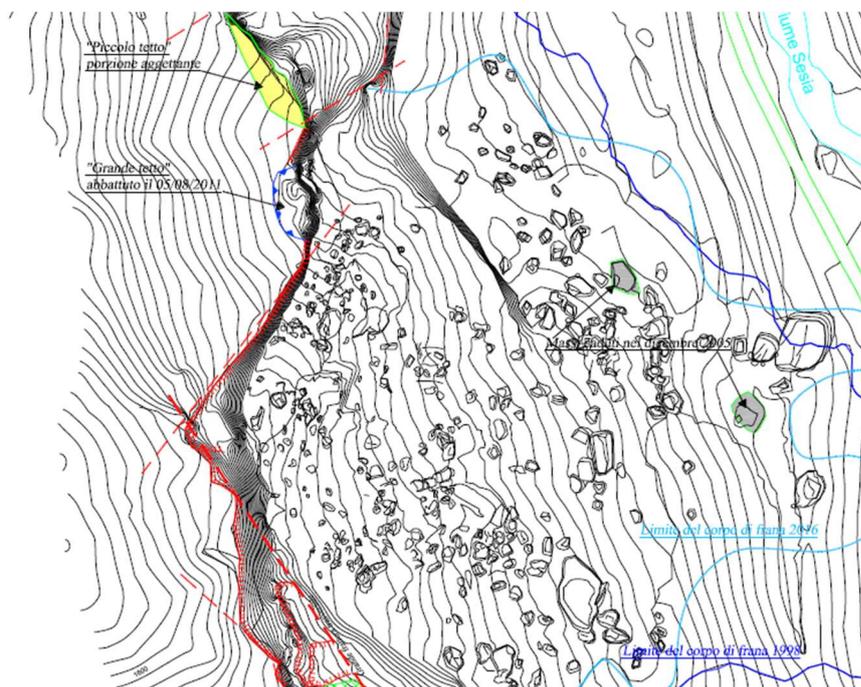


Figura 3-9 Curve di livello ricavate da Drone 1:10000 (cortesia dott. Cavagnino)

Nelle *Figure 3-10* e *Figura 3-11* si possono notare i due blocchi conficcati nella testa del rilevato. La forza impattante ha provocato il collasso locale della testa del rilevato con delle profondità di infissione rispettivamente di 3.5 metri e 2.8 metri circa.



Figura 3-10 Blocco di 508 m³ conficcato sulla testa del rilevato.



Figura 3-11 Blocco di 1000 m³ con la presenza di un altro masso poggiato su di esso.



Figura 3-12 Visione laterale di uno dei monoliti conficcati sul rilevato

Lo studio della stabilità di questo sito è svolto con le seguenti principali finalità:

- Prevedere le aree di invasione, le energie e le altezze di rimbalzo in gioco e le posizioni di arresto di ulteriori crolli in roccia, mediante un'analisi di propagazione. Essa è tarata mediante una back analysis, riproducendo la situazione attuale in sito. L'analisi è condotta in ambiente GIS utilizzando un software 3D che implementa l'approccio stocastico, chiamato RockyFor3D (Dorren, 2014).
- Analizzare la condizione di stabilità del rilevato paramassi esistente, per due condizioni: 1) situazione attuale, facendo riferimento anche alla configurazione dei due monoliti conficcati in testa al rilevato 2) impatto di ulteriori blocchi sui monoliti conficcati sul rilevato. L'analisi è eseguita mediante approccio numerico, utilizzando un programma tridimensione agli elementi finiti RS3 di Rocscience (Rocscience Inc. 1989-2002)
- Verificare l'efficacia di un intervento di risistemazione della scarpata.

4. ANALISI DI PROPAGAZIONE DELLA CADUTA MASSI

L'obiettivo dell'analisi di propagazione della caduta massi, come è stato accennato nel paragrafo 3.4, è quello di prevedere e calcolare le traiettorie dei volumi coinvolti nell'instabilità, le loro distanze di arresto, le altezze di rimbalzo, le velocità ed i depositi dei blocchi lungo tutto il versante. Affinché i risultati possano essere attendibili ed affinché si possa riprodurre la situazione attuale del sito, è necessario procedere attraverso una back analysis.

4.1 Software RockyFor3D

Il software RockyFor3D-Ecorisq (Dorren, 2014) è un modello tridimensionale, utilizzato perché risulta più conveniente utilizzare dei codici di calcolo con approccio 3D al fine di ottenere dei modelli robusti di simulazione che rispecchino un buon livello di previsione.

Rockyfor3D è un modello di simulazione che calcola la traiettoria di caduta nelle tre dimensioni (3D) per i singoli blocchi rocciosi (massi). Il modello, basato sulla realtà fisica, 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, date le incertezze connesse alla determinazione dei parametri come i coefficienti di scabrezza, questi sono determinati in maniera stocastica, facendoli variare entro un intervallo di valori accettabili. Rockyfor3D può essere usato per simulazioni di caduta di massi su scala regionale, su scala locale e di versante. Il software è stato sviluppato in linguaggio Matlab dal 1998, inizialmente sulla base di lavoro di ricerca sulla caduta di massi. Dalla versione 5.0 in poi, il codice del programma è stato scritto in C.

Le simulazioni delle traiettorie di caduta massi sono effettuate attraverso l'utilizzo di un vettore che memorizza i valori tridimensionali (di posizione e velocità), attraverso il calcolo di una sequenza cadute libere del grave, mediante il calcolo delle equazioni

di tipo parabolico e di caduta libera in aria e di rimbalzi sulla superficie del pendio, nonché, se richiesto, urti contro gli alberi (Figura 4-1). Il rotolamento viene rappresentato con una sequenza di rimbalzi a piccola distanza, mentre lo scivolamento (inteso come slittamento) dei massi non è modellato.

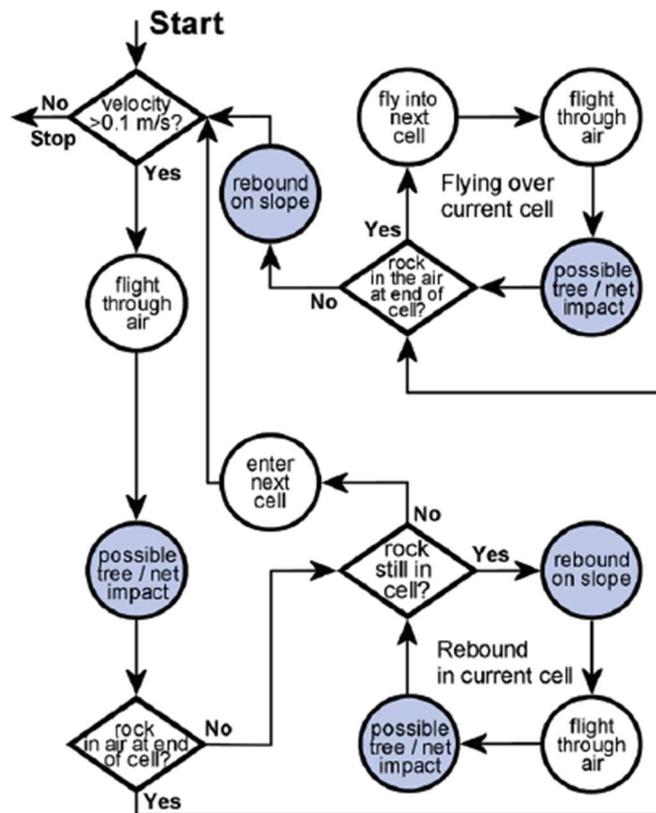


Figura 4-1 Diagramma di flusso del software (Dorren, 2014)

4.1.1 Dati raster di Input

I dati d'ingresso richiesti consistono in un set di raster ASCII in formato ESRI che definiscono la topografia e le caratteristiche della superficie del pendio, e un insieme di parametri che definiscono le condizioni di distacco. Aumentando le dimensioni delle celle (espresse in Pixel) diminuiscono le precisioni spaziali delle mappe e l'accuratezza dei risultati e delle simulazioni. Gli autori del programma consigliano di adottare delle dimensioni delle celle comprese tra i (2x2)m e (10x10)m.

Nella *Tabella 4-1*, fornita dal manuale d'uso del software RockyFor3D, sono riassunte le 10 mappe raster di input. Il file raster dà informazioni sul numero di righe e di colonne che costituiscono il file (ncols e nrows), la dimensione delle celle (cellsize) o la risoluzione del raster espressa in (m), le coordinate x e y del centro della cella ed il valore che indica l'assenza di dati (NODATA_value; di default si assegna il valore -9999). I decimali sono preceduti da un punto (.).

Nr.	Raster	Descrizione
1	dem.asc	<p>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 <i>dem.asc</i> è mostrato di seguito:</p> <pre> 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 </pre>
2	rockdensity.asc	<p>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.</p> <p>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!</p>
3	d1.asc	<p>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</p>

		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	<p>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 seguenti valori:</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 blocco senza forma/ assenza di celle sorgenti definite 1 blocco parallelepipedo (le tre dimensioni possono essere differenti tra loro) 2 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) <p>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).</p>
7	rg70.asc	<p>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 rappresentata 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).</p> <p>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.</p>

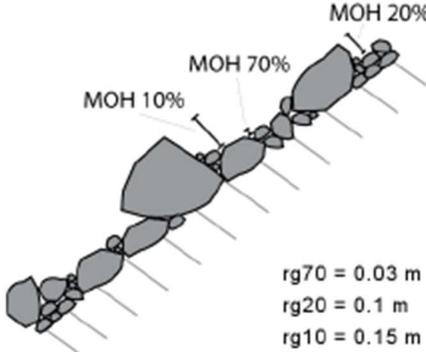
		<p>Pertanto non comporta effetti sull'altezza del terreno o sull'angolo di pendenza locale in una cella raster.</p>  <p>Figura 2. Rappresentazione dell'altezza di un ostacolo (MOH) rappresentativa per il 70%, 20% e 10% della superficie senza una zona omogenea sul pendio. Il parametro MOH deve essere misurato guardando il pendio verso valle, nella direzione di discesa del masso.</p> <p>rg70 = 0.03 m rg20 = 0.1 m rg10 = 0.15 m</p> <p>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.</p>
8	rg20.asc	<p>mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 20% da un blocco in caduta (vedi spiegazione rg70.asc);</p>
9	rg10.asc	<p>mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 10% da un blocco in caduta (vedi spiegazione rg70.asc);</p>
10	soiltype.asc	<p>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 R_n (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.</p> <p>Osservazione sul soiltype 7 (strada asfaltata) Fino ad ora non è disponibile alcun dato sperimentale riguardo l'energia assorbita dal manto stradale durante un impatto dinamico. Il valore di R_n, 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</p>

Tabella 4-1 Elenco e descrizione dei raster richiesti da RockyFor3D (Dorren,2014)

Nel software sono presenti diverse tipologie di suolo con dei coefficienti di restituzione definiti da default. Nella *Tabella 4-2* sono inseriti dei valori in funzione del tipo di terreno:

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 meteorica	0,43	0,39 - 0,47
6	Substrato roccioso	0,53	0,48 - 0,58
7	Strade asfaltate	0,35	0,32 - 0,39

Tabella 4-2 Tipi di suolo e valori R_n definiti dal manuale d'uso di Rockyfor3D (Dorren, 2014)

4.1.2 Richiami teorici del software RockyFor3D

La *forma dei blocchi* può essere definita come parametro di input del software che permette di scegliere diverse geometrie tra cui: parallelepipedo, ellissoidale, sfera o discoidale. La forma è significativa in quanto da essa dipendono i 3 diametri d1,d2,d3. Da default, Rockyfor3D utilizza sempre una forma sferica di diametro pari a :

- Il più piccolo tra i tre diametri definiti se il blocco colpisce un albero
- viene assunto un diametro maggiore, calcolato come media tra i due diametri maggiori, per calcolare le perdite di energia durante l'impatto con il terreno che ed è dato dal rapporto tra scabrezza della superficie e raggio del perimetro di impatto maggiore

Altre forme di blocco più complicate, così come gli effetti espliciti della forma del blocco sulla direzione di caduta, non sono presi in considerazione. Ciò implicherebbe un algoritmo capace di calcolare infinite traiettorie, tenendo conto di tutti gli effetti delle forma del blocco sulla tipologia di rimbalzo che avviene in realtà. 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)

La caduta con moto parabolico è calcolata da un algoritmo standard per un moto parabolico uniformemente accelerato, trovando, istante per istante, la posizione ed i valori delle velocità. Il software simula la traiettoria tridimensionale lungo i 3 assi x,y,z che rappresentano rispettivamente le direzioni: Est-Ovest, Nord-Sud e verticale. (Dorren 2014)

La velocità di un rimbalzo sulla superficie viene calcolata attraverso dieci funzioni. La velocità di ingresso sul piano orizzontale xy (V_{hor}) e sul piano verticale z (V_{vert}) sono convertite in velocità di ingresso normale V_n ed in velocità di ingresso tangenziale V_t rispetto alla pendenza locale

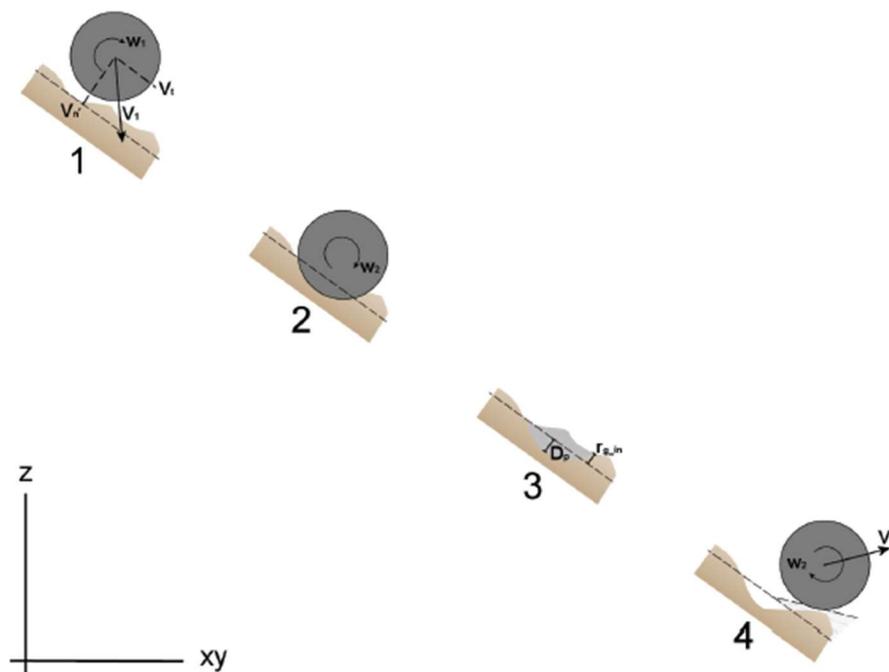


Figura 4-2 Rappresentazione del meccanismo di rimbalzo (Dorren, 2014)

La profondità di penetrazione del blocco nel punto di impatto viene calcolata sugli studi di Pichler et al..2005.

I parametri di input richiesti dal software 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 (Pitcher et al., 2005).

Dai precedenti parametri si ricava la profondità di penetrazione attraverso l'equazione

$$\frac{D_p}{d} = \frac{2}{\pi} \cdot N \cdot \ln \left[\frac{1 + \frac{l_e}{N}}{1 + \frac{4\pi}{4N}} \right] + k \quad \text{per } \frac{D_p}{d} > k$$

$$\frac{D_p}{d} = \sqrt{\frac{1 + \frac{4\pi}{4N}}{1 + \frac{l_e}{N}}} \cdot \frac{4k}{\pi} \cdot I_e \quad \text{per } \frac{D_p}{d} \leq k$$

Dove:

- I_e è il momento d'inerzia calcolato come: $I_e = \frac{Massa \cdot V^2}{R_i \cdot d^3}$
- R_i è la resistenza della penetrazione pari a $R_i = 55 \cdot 10^9 \cdot R_n^7$

Da queste equazioni il software calcola il valore massimo della profondità di penetrazione D_p , successivamente è possibile calcolare la velocità del blocco dopo il rimbalzo che dipende dal valore del coefficiente di restituzione tangenziale R_t . Dorren et al (2004) hanno dimostrato che questo parametro è funzione della composizione, delle dimensioni del materiale che ricopre la superficie e dal raggio del blocco in caduta, poiché per le rocce più grandi la rugosità superficiale effettiva è inferiore rispetto ai blocchi di dimensione inferiore (cfr. Kirkby e Statham 1975; Dorren 2003). Dorren et al (2006) hanno proposto un algoritmo per poter ricavare il parametro R_t :

$$R_t = \frac{1}{1 + \left[\frac{MOH + D_p}{R} \right]}$$

Vengono così definiti i seguenti parametri:

- MOH è l'altezza dell'ostacolo che si trova sulla superficie del pendio ed è espressa in Metri
- D_p è la profondità di penetrazione precedentemente definita, anch'essa espressa in Metri
- R è il raggio del blocco sferico equivalente [m]

Dagli studi condotti in passato si è scoperto che non è possibile misurare il MOH in dettaglio in ogni posizione del pendio. Dato che è possibile realizzare una mappa poligonale con i diametri medi del materiale che ricopre la superficie, raggruppando in sottoclassi i blocchi aventi un diametro simile, il coefficiente di restituzione R_t potrebbe essere ricavato da tali mappe. Si è deciso di mappare tre classi MOH che sono rappresentative dell'altezza media dell'ostacolo che un blocco incontra durante il 70%, 20% e 10% dei rimbalzi. Quindi, l'algoritmo di rimbalzo in Rockyfor3D sceglie il MOH sulla base delle tre classi di copertura nel poligono usando un numero casuale. Pertanto, i valori forniti dalle classi di probabilità di tre dimensioni R_{g70} , R_{g20} e R_{g10} rappresentano valori che vengono utilizzati rispettivamente nel 70%, 20% e 10% dei calcoli di rimbalzo. Il parametro R_t precedentemente ottenuto è utilizzato per calcolare la velocità tangenziale del blocco dopo il rimbalzo (V_{t2}):

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

Dove:

- V_{t1} è la componente della velocità tangenziale del blocco prima del rimbalzo
- V_{rot1} è la velocità rotazionale del blocco prima del rimbalzo
- I è il momento d'inerzia relativo alla forma del blocco

Prima del calcolo effettivo di V_{t2} , il modello varia casualmente il valore di R_t calcolato con +/- 10% per rappresentare la varianza della rugosità superficiale osservata in

natura. Lo stesso vale per il normale coefficiente di restituzione (R_n), che viene utilizzato per calcolare la componente di velocità normale del blocco dopo il rimbalzo V_{n2} dopo Pfeiffer e Bowen (1989):

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

Dove:

- V_{n1} è la componente della velocità normale del blocco prima del rimbalzo
- $\frac{abs(V_{n1})}{9}$ è il fattore che tiene conto del decremento del coefficiente di restituzione normale all'aumentare della velocità di impatto. Questo fattore rappresenta una transizione da un rimbalzo più elastico a basse velocità a un rimbalzo molto meno elastico causato da una maggiore frattura del blocco e da craterizzazione della superficie del pendio a velocità normali più elevate (Habib 1976). Pertanto, il modello prende in considerazione l'effetto dell'angolo di impatto sulla tipologia del rimbalzo (cfr. Wu 1984).

Si ricava anche la velocità rotazionale post-impatto attraverso la seguente equazione:

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

Durante i rimbalzi successivi del blocco l'angolo di inclinazione del pendio viene diminuito, la riduzione massima è fissata a 4°. Il rollio è rappresentato da una sequenza di rimbalzi a breve distanza. Quest'ultima è pari al raggio del blocco con una distanza minima assoluta di 0,2 m. Queste ultime due condizioni rappresentano solo le pendenze con una pendenza compresa tra 0° e 30°.

Successivamente si ricava la direzione di caduta del blocco che viene inizialmente calcolata mediante l'esposizione della cella sorgente. La direzione del blocco in caduta cambia a causa dei rimbalzi sulla superficie del pendio o di impatti contro gli alberi. L'angolo di deviazione dopo un rimbalzo sulla superficie del pendio è determinato dalla topografia, dalla direzione di caduta del blocco prima del

rimbalzo e dalla velocità del blocco in caduta. Durante ciascun rimbalzo, il modello consente al blocco di deviare la sua direzione prima del rimbalzo verso la direzione della cella raster nella quale il blocco rimbalza. La “slope aspect” è la direzione di massima pendenza, quindi rappresenta la direzione del pendio più ripido in ogni cella e viene calcolato seguendo Zevenbergen e Thorne (1987). La deviazione della direzione del blocco rispetto alla fase precedente prima del rimbalzo è infine determinato da un numero casuale e dalla velocità del blocco.

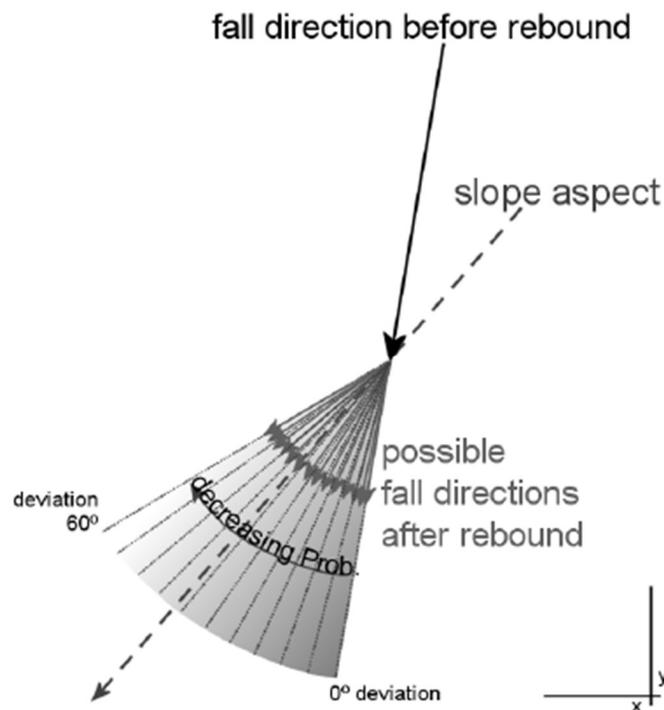


Figura 4-3 Dimostrazione grafica dell'algoritmo di calcolo della direzione di caduta dopo un rimbalzo. (Dorren 2014)

Il numero casuale definisce lo scostamento del blocco rispetto alla sua direzione originale. Vengono così calcolate delle probabilità di accadimento riportate in *Tabella 4-3* determinate in funzione della velocità del blocco prima e dopo il rimbalzo.

Deviation Angle (°)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$V < 10 \text{ m.s}^{-1}$	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 \leq V < 15 \text{ m.s}^{-1}$	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$V \geq 15 \text{ m.s}^{-1}$	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Tabella 4-3 Probabilità degli intervalli dell'angolo di deviazione del blocco dopo il rimbalzo, in funzione di tre velocità utilizzate dal software (Dorre, 2014)

I valori nella Tabella 3 sono basati su analisi statistiche traiettografiche di caduta massi e delle velocità osservate durante gli esperimenti di caduta massi presentati in Dorren et al. (2006). Se il blocco entra in una fossa (una piccola depressione) nel modello di elevazione digitale (DEM), la direzione prima e dopo il rimbalzo rimane invariata.

4.1.3 Dati Raster di Output

Nel momento in cui il blocco in roccia rimbalza all'interno di una cella raster, i massimi delle variabili simulate in quella cella raster sono memorizzati in altri file raster (*Figura 4-4*). Questi ultimi sono gli output del software che hanno la stessa dimensione e formato dei raster in input.

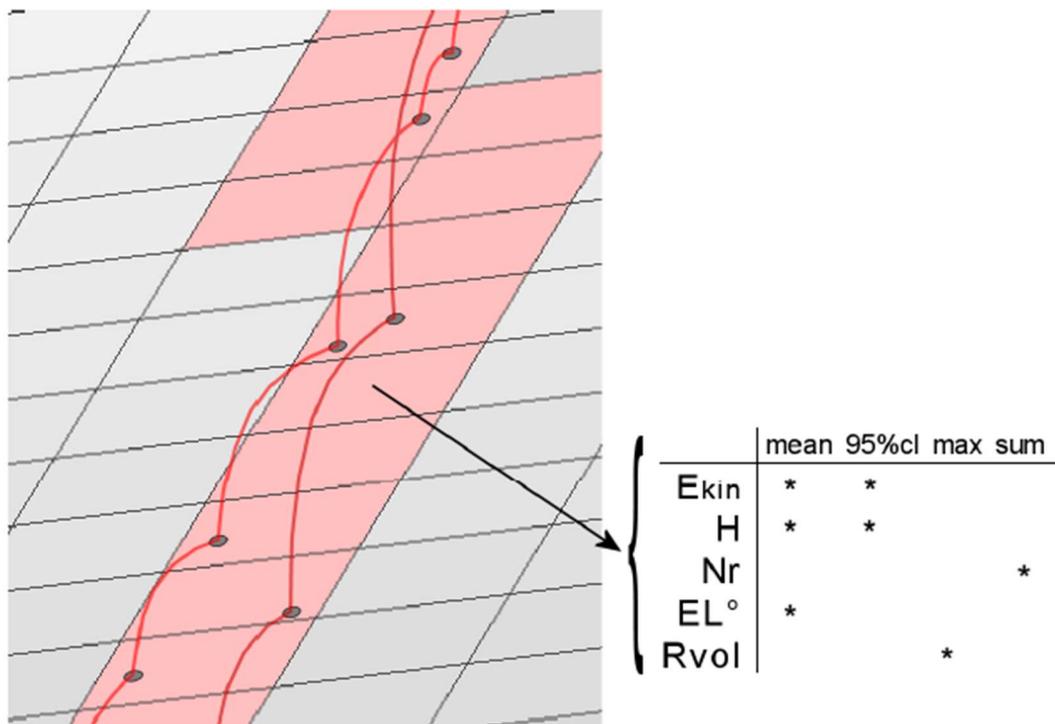


Figura 4-4 Passaggio dalla traiettoria 3D ai dati raster di Output

A questo punto si definiscono tutti i parametri che il software RockyFor3D fornisce al termine dell'analisi:

- E_mean.asc: la media dei valori massimi di energia cinetica (traslazionale + rotazionale; in kJ) di tutti i blocchi simulati in una data cella

- E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc: questi raster rappresentano il 90 °, 95 °, 98 ° e 99 ° percentile dell'energia simulata per cella. L'output è espresso in numeri interi e corrisponde ai seguenti limiti di classe energetica: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 , 120, 130, 140, 150, 200, 250, 300, 500, 750, 1'000, 1'500, 2'000, 3'000, 5'000, 8'000, 10'000, 15'000 , 20'000, 50'000, 99'999 (in kJ). In questi raster, il valore 99'999 rappresenta tutti i valori maggiori di 50'000 kJ.
- E_95CI.asc: intervallo di confidenza al 95% di tutti i valori massimi di energia cinetica (in kJ) registrati in ogni cella . I valori di deviazione standard (σ) in Rockyfor3D sono calcolati come segue:

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

- Ph_mean.asc: la media dell'altezza massima di passaggio (in m; misurata in direzione normale rispetto alla superficie del pendio) del baricentro di tutti i blocchi che hanno attraversato la cella
- Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc: questi raster rappresentano il 90 °, 95 °, 98 ° e 99 ° percentile delle altezze simulate di passaggio (del baricentro del blocco, misurato in direzione normale rispetto alla superficie del pendio) per cella. L'output è espresso in numeri interi e corrisponde ai seguenti limiti della classe di altezza: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 99 (in m). In questi raster 99 rappresenta tutti i valori superiori a 20 m.
- Ph_95CI.asc: altezza di passaggio massima (in m; misurati in direzione normale alla superficie del pendio) registrati in ciascuna cella. Il principio di calcolo del valore Ph_95CI è identico al valore E_95CI. Può quindi essere considerata l'altezza di passaggio massima in ciascuna cella.
- Nr_passages.asc: il numero di blocchi passati attraverso ogni cella.
- Nr_sourcecells.asc: il numero di celle di origine che "alimentano" una determinata cella [-]. In altre parole, questa mappa mostra per ogni cella, da quante diverse celle di origine sono arrivati i blocchi in quella data cella.
- Nr_deposited.asc: il numero di blocchi fermati in ciascuna cella.

- Traj_time.asc: tempo minimo necessario per raggiungere una cella raster dalle aree di origine definite [s]
- V_max.asc: la velocità massima assoluta simulata per cella raster (m.s-1).
- Reach_probability.asc: Questa mappa mostra se è probabile (valori più alti nella mappa) o improbabile (valori più bassi > 0 nella mappa) che una roccia arrivi in una data cella.

Per costruire una mappa di intensità o una mappa dei pericoli in una determinata area di studio sulla base dei dati di output di Rockyfor3D, i raster di output Reach_probability.asc e Nr_deposited.asc sono più utili per delineare zone realistiche di runout di caduta massi. Quando si utilizzano 100 simulazioni per cella di origine, le celle in Reach_probability.asc con valori inferiori all'1-1,5% possono generalmente essere considerate valori anomali.

4.2 Fase preliminare in ambiente GIS

Affinché si possa risalire ai risultati dell'analisi di propagazione è necessario, preliminarmente, impostare un ambiente GIS sul quale saranno calibrati i parametri di input da inserire nel software RockyFor3D e sul quale verranno riprodotti i raster dell'analisi di propagazione. Il software Opensource QGis permette di ottenere tutto ciò.

La fase iniziale prevede il caricamento dell'ortofoto e di un DTM:

- L'ortofoto è inserita mediante il servizio WMS (*Figura 4-5*) presente in QGis: esso prevede il caricamento del URL fornito dal GeoPortale della Regione Piemonte tramite il comando "Aggiungi Layer WMS". L'ortofoto di riferimento è quella fornita da AGEA nel 2015.

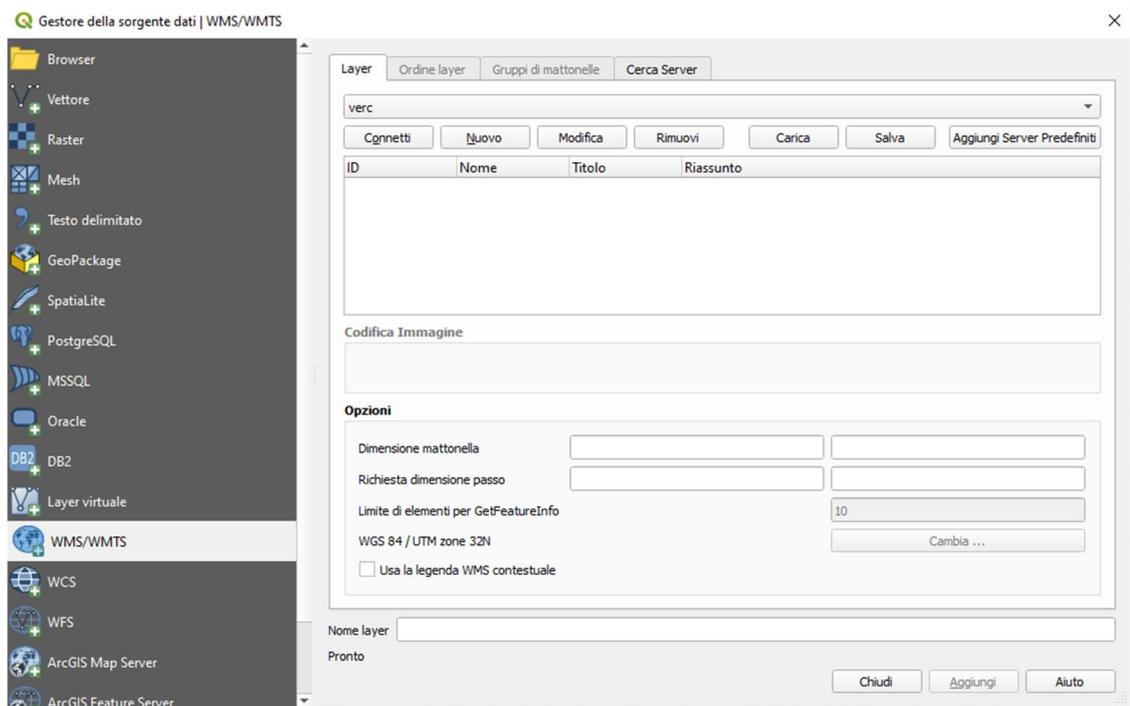


Figura 4-5 Interfaccia comando "Aggiungi Layer WMS"

- Il DTM è ottenuto tramite il GeoPortale della Regione Piemonte, riferito ad una ripresa aerea avvenuta nel 2010. Il DTM 5x5 è denominato "HILLSHADE_RIPRESA_AEREA_ICE_2009_2011_DTM" ed è caricato attraverso il comando "Aggiungi Raster".

Successivamente si è definito il sistema di riferimento WGS84/UTM 32N. Si procede poi ad identificare l'area della miniera di Kreas e la zona in cui sono avvenuti i numerosi crolli. Di seguito nella *Figura 4-6* e *Figura 4-7* sono rappresentate rispettivamente l'ortofoto AGEA 2015 e il DTM "HILLSHADE RIPRESA AEREA ICE 2009-2011".

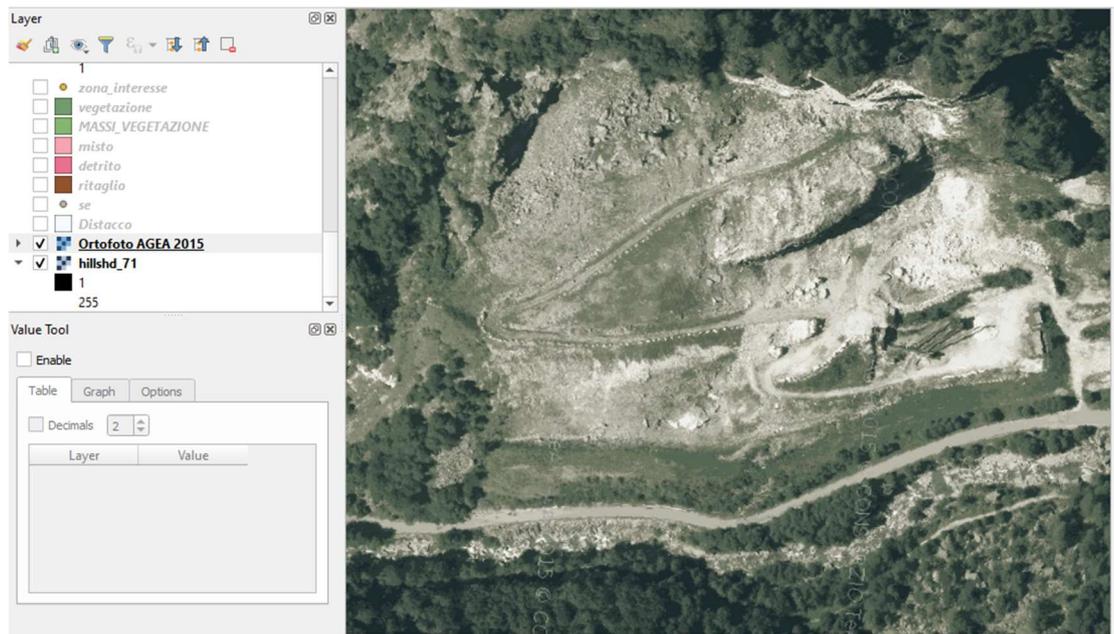


Figura 4-6 Ortofoto AGEA 2015, Zona della miniera di Kreas

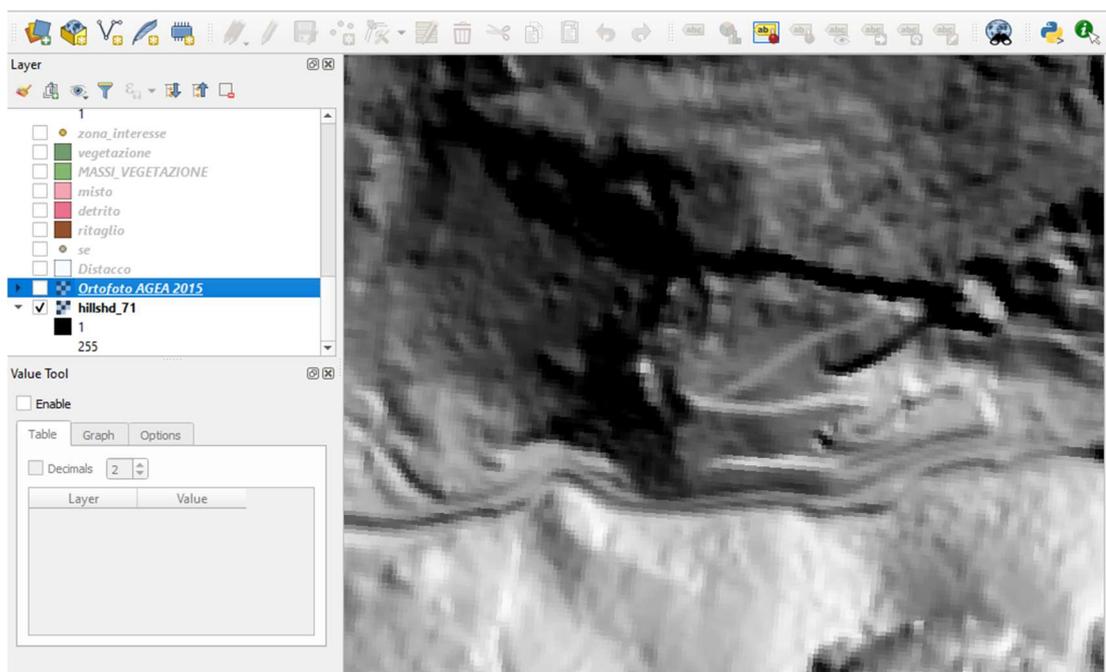


Figura 4-7 DTM HILLSHADE 2011 , zona Miniera di Kreas

Nella Figura 4-6 si nota che nel 2015, anno in cui è stata ottenuta l'ortofoto, non era ancora avvenuto l'accumulo di blocchi in roccia lungo il versante, pertanto i crolli, fino a quel periodo, erano limitati. In seguito, dal raster DTM , si estrapola un file

vettoriale contenente le quote dell'area. Il comando per tale procedura è il geoalgoritmo "Punti regolari" che si trova all'interno del menù "Processing". Tuttavia, la regione Piemonte ha fornito uno *shapefile* dell'intera provincia di Vercelli contenente le quote altimetriche dell'area. Utilizzando il comando "Ritaglia", una volta aver creato un nuovo *shapefile* poligonale, è possibile risalire ugualmente al vettore citato precedentemente.

Al fine di poter avviare l'analisi di propagazione è necessario creare le mappe da inserire su RockyFor3D: di fatto nello *shapefile* in cui sono contenute le quote altimetriche e le coordinate geografiche (x,y) , sono state aggiunte ulteriori colonne alla tabella degli attributi (*Tabella 4-4*) per la caratterizzazione del pendio. Esse sono così definite:

- Z: colonna in cui sono contenute le quote altimetriche. Da questa colonna sarà poi ricavato il file raster denominato dem.asc.
- Rg70, rg20, rg10: colonne in cui sono contenuti i valori di scabrezza citati al Paragrafo 4.1. Da queste colonne saranno ricavati i file raster rg70.asc, rg20.asc ed rg10.asc.
- Rockdensity: colonna nella quale sono contenuti i valori di densità della zona di distacco. Da questa colonna sarà ricavato il file raster rockdensity.asc.
- Soiltype: colonna in cui si tiene conto, dal punto di vista numerico, della tipologia di suolo. Da questa colonna sarà poi ricavato il file soiltype.asc

Q zona_interesse :: Totale degli elementi: 7572, Filtrati: 7572, Selezionati: 0

	z	rg70	rg20	rg10	rockdensi	soiltype
1	1463,00				2500,00	6,00
2	1511,00					
3	1531,00					
4	1482,00				2500,00	6,00
5	1493,00					
6	1424,00	0,200	0,40	0,900		4,00
7	1428,00	0,200	0,40	0,900		4,00
8	1417,00	0,200	0,40	0,900		4,00
9	1421,00	0,200	0,40	0,900		4,00
10	1439,00	0,200	0,40	0,900		4,00
11	1445,00	0,200	0,40	0,900		4,00
12	1431,00	0,200	0,40	0,900		4,00
13	1435,00	0,200	0,40	0,900		4,00
14	1397,00	0,030	0,05	0,050		3,00
15	1400,00	0,200	0,40	0,900		4,00
16	1391,00	0,030	0,05	0,050		3,00
17	1394,00	0,030	0,05	0,050		3,00
18	1410,00	0,200	0,40	0,900		4,00
19	1414,00	0,200	0,40	0,900		4,00
20	1403,00	0,200	0,40	0,900		4,00
21	1406,00	0,200	0,40	0,900		4,00

Mostra Tutti gli Elementi

Tabella 4-4 Tabella degli attributi dello shapefile della zona di interesse

Per ogni campo, come si evince dalla *Tabella 4-4*, si definiscono la tipologia (Integer, Double, Real) e il numero di cifre decimali (Dorren 2004).

A questo punto si procede con la suddivisione dell'area in regioni aventi delle proprietà pressoché costanti. La selezione di regioni omogenee è ottenuta mediante delle indagini visive attraverso il supporto di foto aeree ed immagini satellitari. Le zone omogenee sono le seguenti:

- *Zona di distacco*: Essa è la zona in cui è avvenuto il distacco dei blocchi in roccia (*Figura 4-8*). Quest'area è stata individuata mediante l'utilizzo di immagini satellitari e foto effettuate attraverso il volo dei droni (*Figura 4-9*):

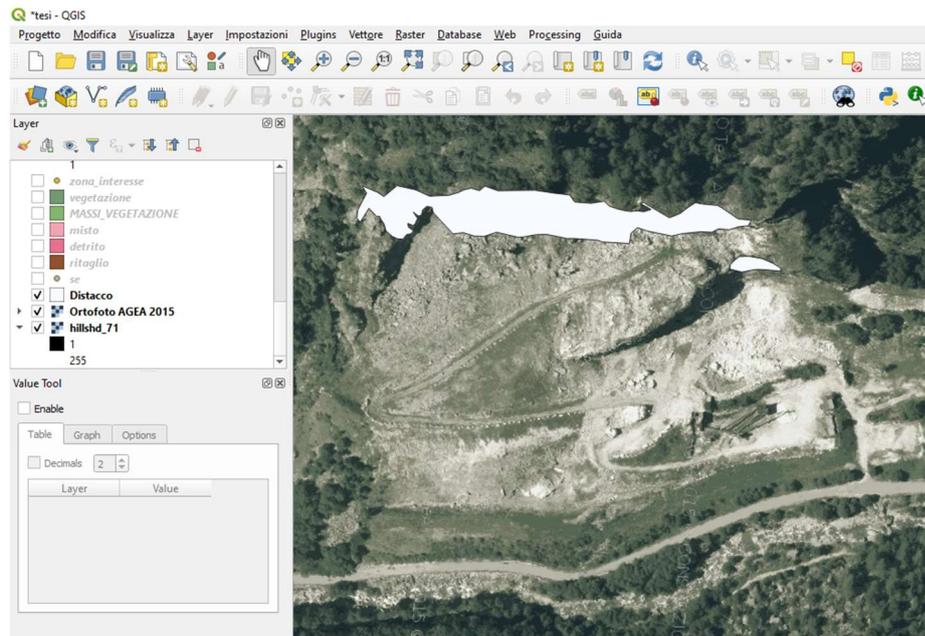


Figura 4-8 Rappresentazione in bianco della zona di distacco



Figura 4-9 Foto da Drone dell'area di distacco (cortesia Dott. Cavagnino e dalla Regione Piemonte)

- Zona di detrito: zona in cui sono presenti i blocchi in roccia aventi una granulometria e dimensione omogenea (Figura 4-10). Le poligonali sono state ottenute mediante l'utilizzo di immagini satellitari e immagini LiDaR:

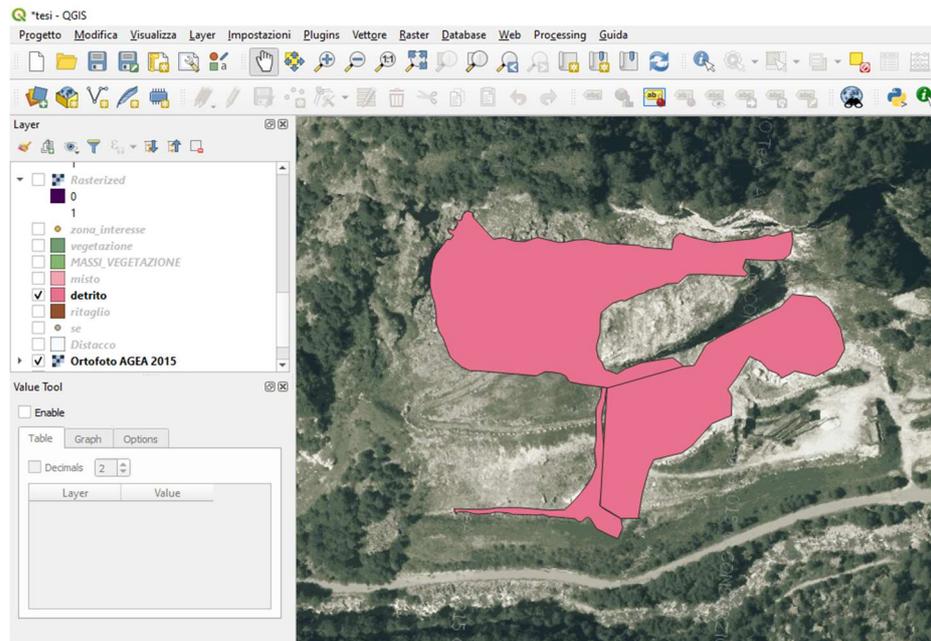


Figura 4-10 Zona di detrito

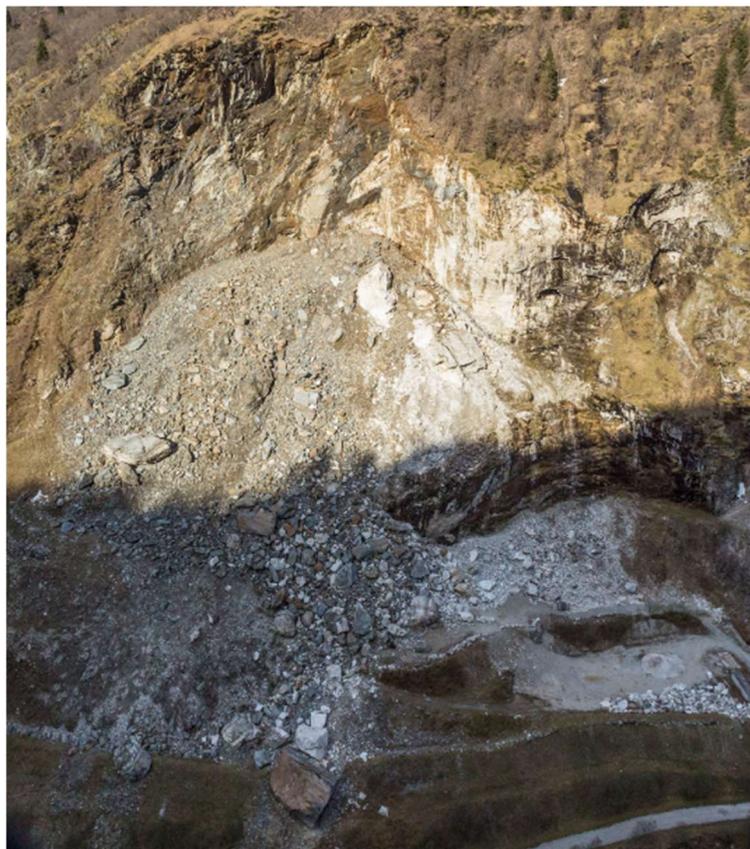


Figura 4-11 Immagine LIDAR dell'area di distacco (cortesia Dott. Cavagnino e Regione Piemonte)

- Zona mista: zona in cui è avvenuto l'accumulo di detriti a granulometria eterogenea (Figura 4-12). Vi sono delle piccole aree in cui non vi è detrito bensì il bedrock appartenente al pendio.

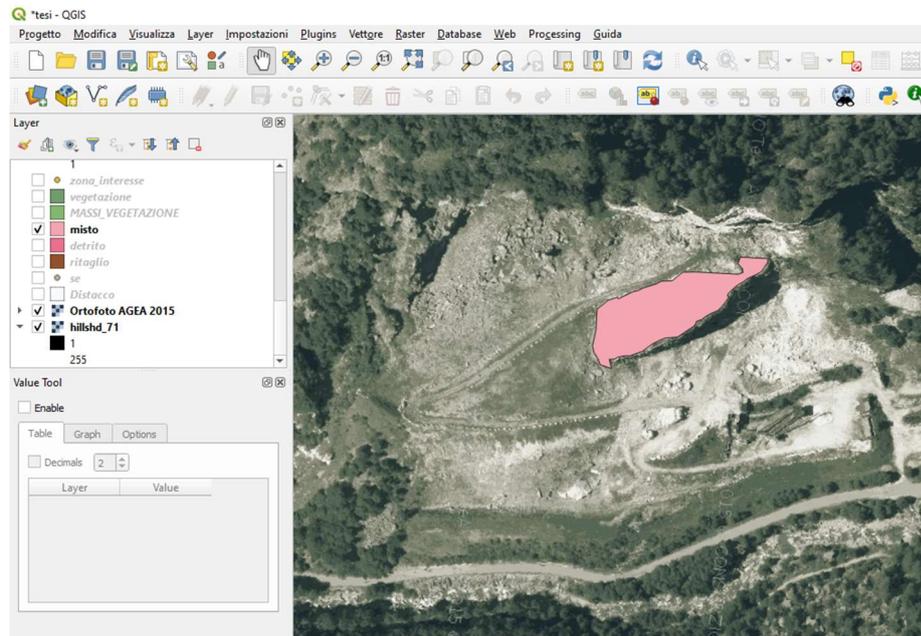


Figura 4-12 Zona a granulometria eterogena

- Zona massi e vegetazione: zona caratterizzata dall'alternanza di massi e vegetazione (Figura 4-13)

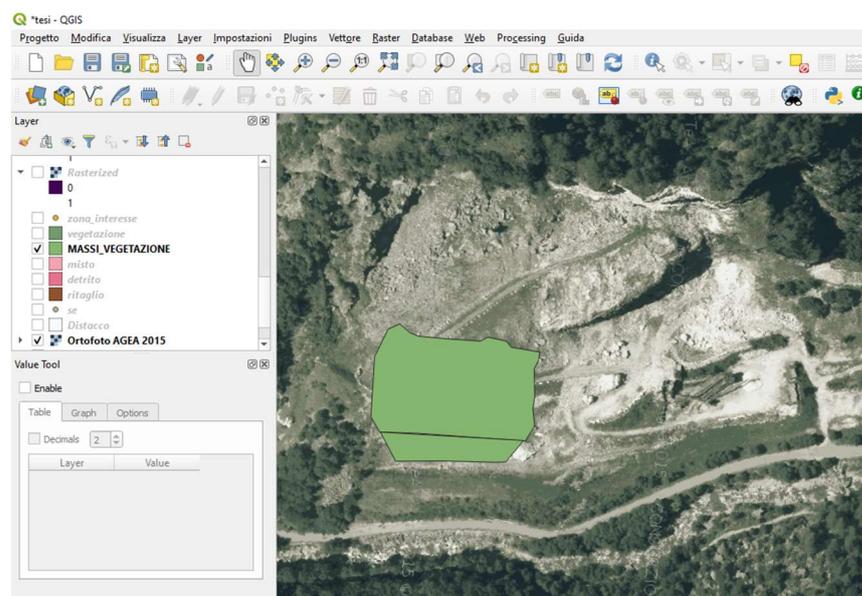


Figura 4-13 Zona alternata dalla presenza di massi e vegetazione

- Zona vegetazione: zona caratterizzata dalla sola presenza della vegetazione (Figura 4-14).

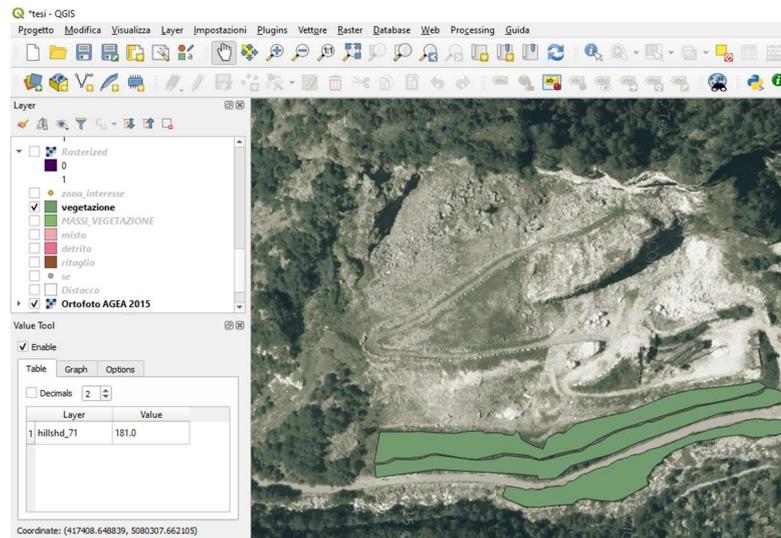


Figura 4-14 Zona caratterizzata dalla sola presenza della Vegetazione

Una volta suddiviso il versante in aree omogenee si procede alla taratura dei parametri visualizzabili in *Tabella 4-4*. Alla *zona di distacco* è assegnato un valore iniziale di 2500 kg/m^3 , pari alla densità dei blocchi che sono potenzialmente instabili. Per calcolare i restanti parametri (*Soiltype*, *Rg70*, *Rg20*, ed *Rg10*) si utilizza un'analisi a ritroso, ovvero una *back analysis*. Di fatto si assegnano dei valori iniziali pari a quelli riscontrabili nel manuale fornito da *RockyFor3D* (Figura 4-15). Affinché tali parametri possano essere inseriti nel software di propagazione tridimensionale è necessario trasformarli in formato raster; in *QGIS with GRASS* esiste un'estensione chiamata "v.to.rast" che permette di convertire le colonne della tabella degli attributi nelle mappe raster elencate nei paragrafi precedenti. Mediante l'utilizzo di questo comando è possibile assegnare ad ogni raster in uscita la dimensione della cella espressa in pixel (*cellsize*) che, per la seguente trattazione, è pari a 5.

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

	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

Figura 4-15 Valori suggeriti da Rockyfor3D (Dorrem,2014)

Successivamente, attraverso l'output in raster fornito dal software "*Nr_deposited*", si visualizzano le aree di deposito in ambiente GIS. I parametri *Rg* ed *Soiltype* vengono iterati in modo da riprodurre i depositi in roccia reali in sito, ovvero le zone di accumulo. Il confronto tra il raster "*Nr_deposited*" e la situazione reale sul pendio è stato effettuato mediante l'utilizzo di immagini satellitari, immagini LiDaR e foto ottenute da Drone dai quali sono stati anche ricavati i parametri da inserire nella tabella degli attributi. I parametri della tabella degli attributi che rappresentano nel modo migliore i reali depositi lungo il versante sono qui rappresentati:

Zona di detrito

- Rg70: 0.2 m
- Rg20: 0.4 m
- Rg10: 0.9 m
- Soiltype: 6

Zona mista

- Rg70: 0.1 m
- Rg20: 0.2 m

- Rg10: 0.4 m
- Soiltype:

Zona massi e vegetazione

- Rg70: 0.05 m
- Rg20: 0.1 m
- Rg10: 0.2 m
- Soiltype: 4

Zona vegetazione

- Rg70: 0.03 m
- Rg20: 0.03 m
- Rg10: 0.03 m
- Soiltype: 3

4.3 Simulazione del Crollo tramite il Software Rockyfor3D

Una volta aver settato i parametri della back-analysis e aver ricavato le mappe raster per l'analisi tridimensionale, si procede con la simulazione del crollo nella zona definita instabile. I parametri di ingresso di Rockyfor3D sono di seguito elencati:

- Numero di simulazioni: si è adottato il valore di 10000 simulazioni in quanto l'affidabilità dei risultati dipende anche dal numero di simulazioni delle traiettorie. Il numero scelto dovrebbe ridurre al minimo l'errore sull'analisi probabilistica.
- Dimensioni del blocco: si è deciso di adottare un blocco rettangolare aventi dimensioni $2m \cdot 1m \cdot 1.2m$ e quindi un volume pari a $2.4 m^3$. La scelta di tali dimensioni è basata sulla stima dei volumi attraverso file DXF dai quali sono state ricavate le dimensioni principali dei blocchi. La forma rettangolare è una scelta semplicistica in quanto le geometrie reali del problema sono più complesse ed irregolari.

In *Figura 4-16* è rappresentato il risultato dell'analisi eseguita con RockyFor3D ed i raster sono stati rappresentati in ambiente GIS.

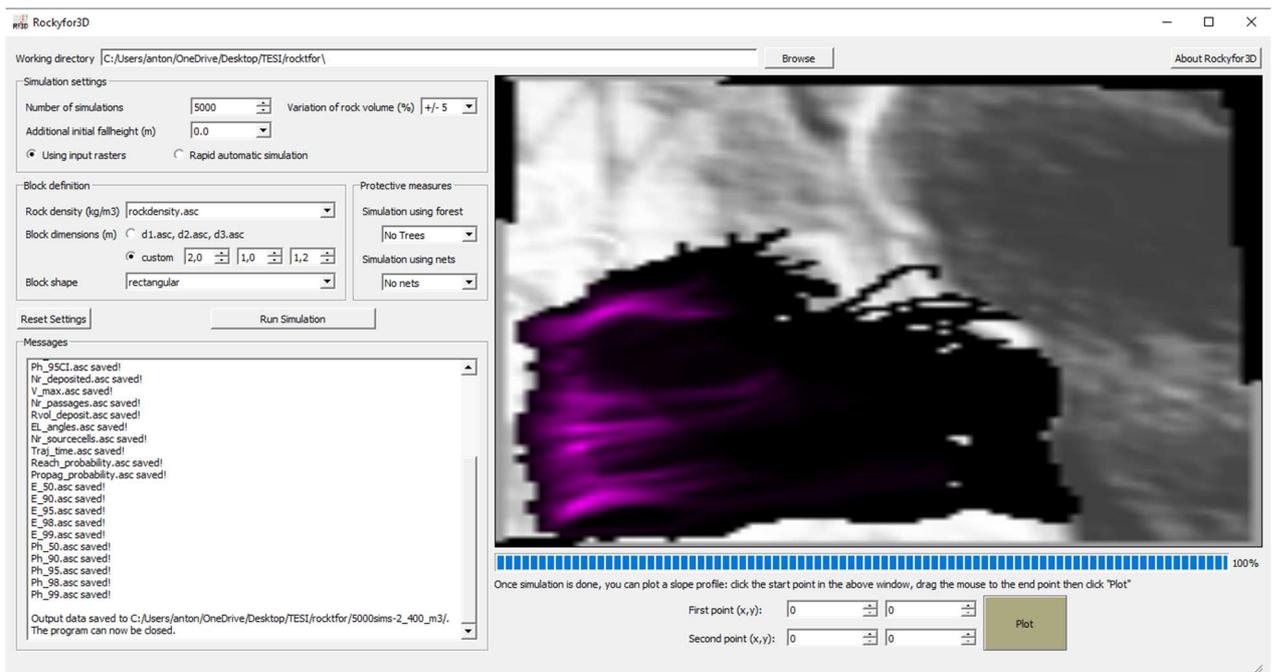


Figura 4-16 Output del Software RockyFor3D

I risultati consentono di ricavare la distribuzione lungo il versante dei seguenti parametri:

- Energia cinetica;
- Velocità;
- Altezza di rimbalzo;
- Depositi;

Per l'elaborato in questione verranno considerati i valori medi e quelli al 99° percentile considerando quest'ultimi come valori massimi dato che il software non restituisce valori al 100° percentile.

4.3.1 Area di invasione

Il risultato dell'area di invasione (Figura 4-17) è confrontato con la situazione attuale del versante, file .dwg in ambiente CAD (Figura 4-18); il confronto può ritenersi soddisfacente in quanto, nei risultati dell'analisi di propagazione, si possono notare 4 macro-zone:

- Un'area di accumulo a ridosso della zona di distacco dei blocchi (e quindi delle celle sorgenti);
- Un'area di accumulo in prossimità di un dislivello molto accentuato;
- Un'area di deposito con una forma conoidale;
- Una zona di accumulo in prossimità del rilevato paramassi costruito tra la fine del pendio ed il ciglio stradale;
- La presenza di alcuni blocchi anche oltre la sovrastruttura stradale;

Queste zone sono corrispondenti ad analoghe presenti sul versante.

La distribuzione delle traiettorie è governata, nella seguente trattazione, dalle pendenze lungo il versante e dalla tipologia di suolo.



Figura 4-17 Rappresentazione dell'area di invasione simulata



Figura 4-18 Immagine in ambiente CAD

4.3.2 Velocità

I valori maggiori delle velocità (Figura 4-19) si registrano in prossimità dell'importante dislivello che si trova sulla destra del versante: qui la differenza di quota è di circa 60 m (a strapiombo) e le velocità calcolate dall'analisi di propagazione sono pari a circa 70 m/s. Tuttavia, sulla restante parte del pendio, i valori delle velocità sono pressoché costanti, intorno a 30 m/s con un decremento al piede del pendio.



Figura 4-19 Andamento delle velocità

4.3.3 Altezze di rimbalzo

In *Figura 4-20* sono rappresentate le altezze di rimbalzo. Si nota che anche i valori delle altezze di rimbalzo sono piuttosto elevati a causa degli importanti dislivelli che vi sono lungo tutto lo sviluppo del pendio. Così come per le velocità, anche le altezze di rimbalzo registrano dei valori elevati (di circa 100 m) in prossimità dello strapiombo. Da queste considerazioni si può concludere che la distribuzione delle altezze di rimbalzo al 99° percentile è pressoché uniforme lungo il pendio, intorno a 9 m, con delle zone in cui si registrano dei valori di picco sino a 100 m circa, indicativi di strapiombi.

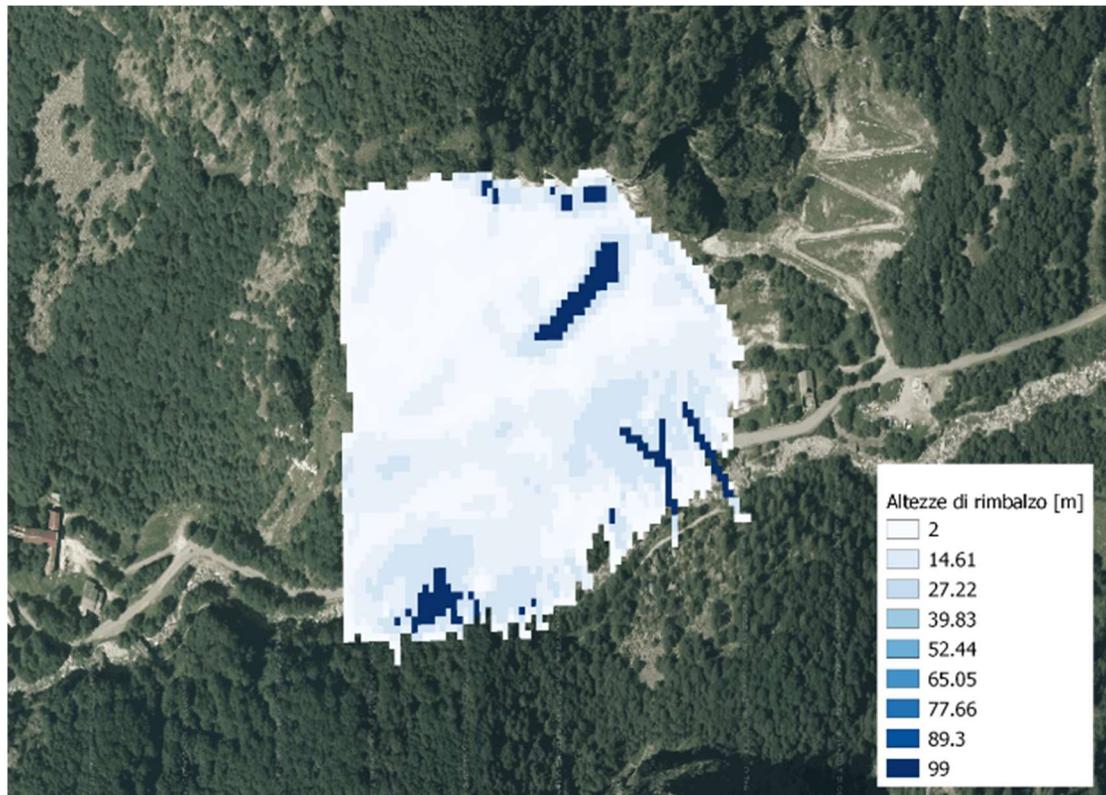


Figura 4-20 Altezze di rimbalzo

4.3.4 Energie cinetiche

In *Figura 4-21* si visualizzano i valori delle energie cinetiche. Anche questi sono molto elevati essendo proporzionali alle velocità al quadrato. Le zone del versante in cui

l'energia cinetica è più alta si concentrano a ridosso dello strapiombo e a valle del rilevato paramassi in cui l'energia cinetica raggiunge dei valori che variano tra 8000 kJ e 6000 kJ. In prossimità del rilevato paramassi e nella zona centrale a forma "conoidale" si registrano dei valori di circa 2000 kJ.

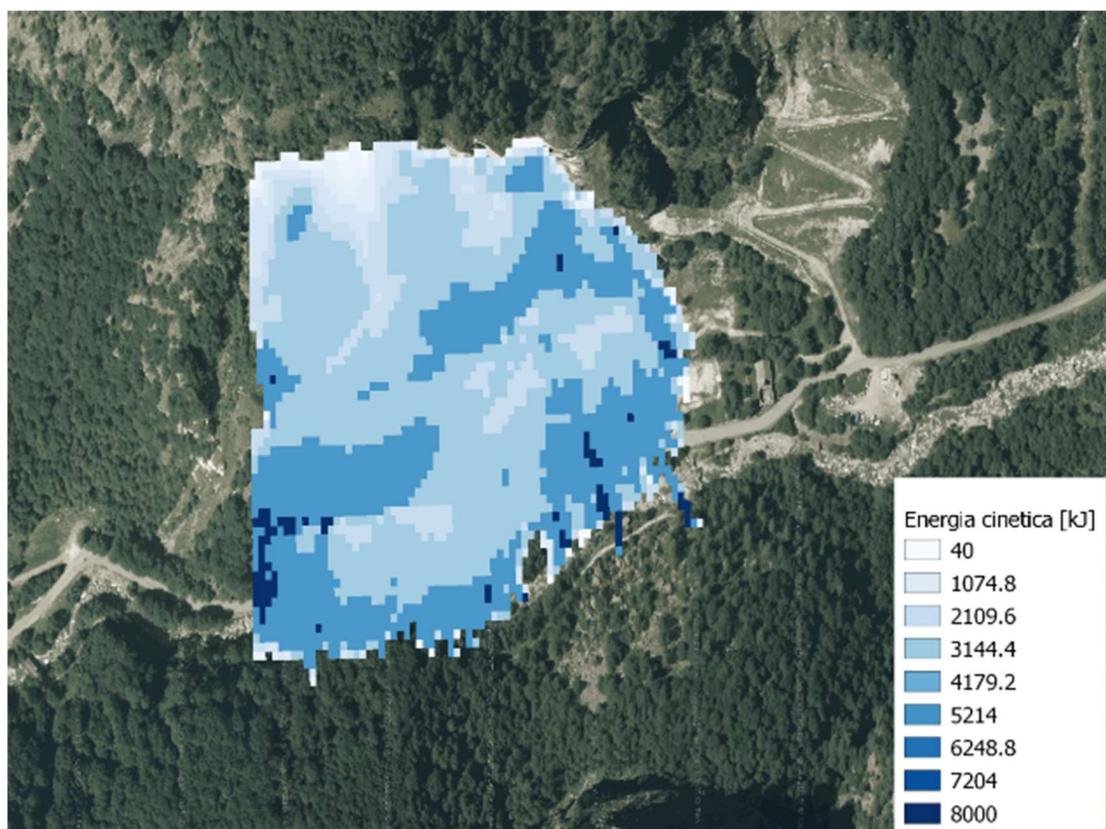


Figura 4-21 Andamento dell'energia cinetica lungo il pendio

4.4 Conclusioni sull'analisi di propagazione

Dai risultati dell'analisi di propagazione si può concludere che i valori sono strettamente correlati all'andamento topografico ed altimetrico del versante. Poiché la zona è interessata da importanti dislivelli, si registrano dei valori energetici molto elevati che comportano, nel caso di stabilizzazione del versante, delle opere difensive robuste, come dei rilevati paramassi (struttura esistente al di sopra della infrastruttura stradale) e/o degli interventi di riprofilatura del pendio. Questi ultimi saranno trattati nei capitoli successivi.

5. MODELLAZIONE E VERIFICHE DEL RILEVATO PARAMASSI

5.1 Introduzione e geometria del rilevato

Il rilevato paramassi rappresentato in *Figura 5-1* è stato costruito in seguito ai primi crolli avvenuti nella zona della Miniera di Kreas. La funzione del rilevato è quella di arrestare i blocchi provenienti da monte, evitando la caduta di essi sulla pavimentazione stradale a valle dell'opera. L'impatto dei blocchi in roccia di grandi dimensioni ha provocato la plasticizzazione e parziale distruzione locale del rilevato che, per questo motivo, dovrà essere verificato per valutarne la stabilità attuale.



Figura 5-1 Foto del rilevato paramassi con un blocco di grandi dimensioni conficcato in testa

Per la ricostruzione geometrica e meccanica sarà utilizzato un software agli elementi finiti 3D “RS3” di Rocscience. Essi permettono di riprodurre l'impatto dei blocchi in

condizioni pseudo-statiche (e/o dinamiche) e ricavare il coefficiente di sicurezza globale dell'opera prima dell'impatto e post-impatto. Al fine di tarare il modello si procederà ad una back-analysis utilizzando come parametro di riferimento gli spostamenti reali subiti dal rilevato a seguito dell'impatto dei monoliti su di esso e come parametri sensibili le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati. Sarà dunque calcolato il coefficiente di sicurezza globale del rilevato allo stato attuale. Successivamente si procederà alla valutazione della sicurezza dell'opera simulando la caduta di ulteriori blocchi, mediante un'analisi di propagazione, che vadano ad impattare quelli già presenti sul rilevato.

Dai rilievi condotti in zona e dalle carte tecniche della Regione Piemonte è possibile riprodurre la reale geometria del rilevato che è composto da elemento interno in pietra e malta e da un rivestimento esterno omogeneo di terreno compattato con spessore di circa 1 m. Di seguito vengono elencate le dimensioni principali del rilevato (Figura 5-2):

- Altezza del rilevato **H** pari a 6.5 m;
- Base maggiore **B** pari a 21 m;
- Testa del rilevato **b** pari a 2 m;
- Angolo di inclinazione dei paramenti α di circa 34°;
- Profondità del rilevato di circa 20 m;

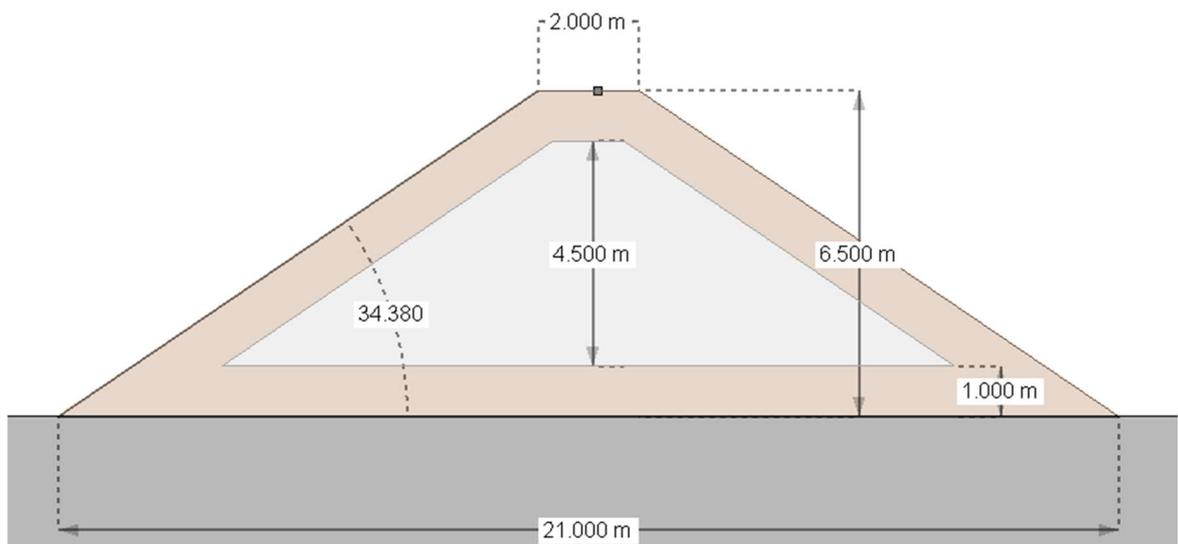


Figura 5-2 Geometria del Rilevato Riprodotta su RS3

Questa tipologia di costruzione, con anima in pietra, dagli angoli molto ridotti e dalle altezze importanti, è spesso utilizzata in sostituzione dei rilevati in terra rinforzata che potrebbero risultare molto onerosi (Tabella 5-1).

Type	Geometry	Example	Reference
Embankment made of compacted soil	Isosceles trapezium Faces dip $\approx 35^\circ$ (with reference to horizontal) Usual max. height $\approx 5-6$ m	 Rasa quarry (Varese – Italy)	Paronuzzi (1989) Del Greco et al. (1994)

Tabella 5-1 Caratteristiche principali dei rilevati con anima in pietra (D. Peila et al (2009))

Il rilevato poggia su una roccia che ai fini della modellazione viene assunta infinitamente rigida e verrà modellata come una fondazione sulla quale il rilevato potrà scorrere (Figura 5-4). In Figura 5-4 è rappresentato il rilevato paramassi nello stato originario dell'opera, ovvero in assenza di blocchi conficcati in testa.

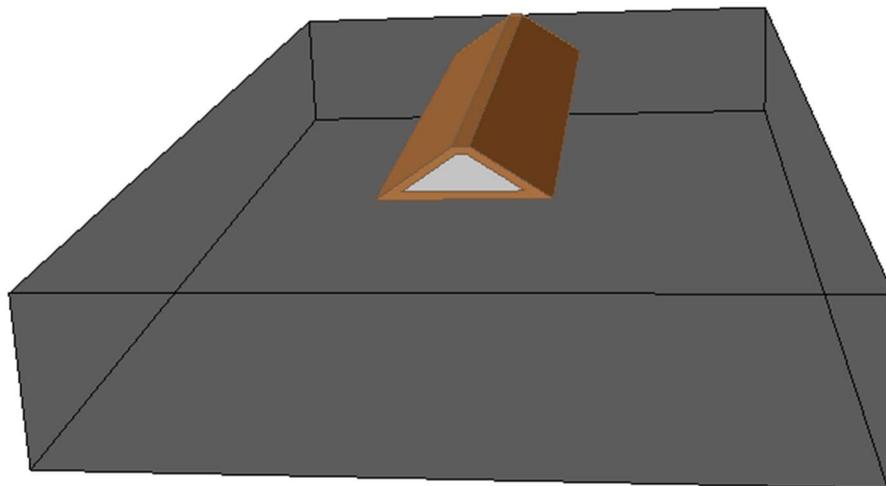


Figura 5-3 Modello completo del Rilevato con rinforzo in Pietra

La situazione reale in sito presenta due grandi blocchi conficcati sulla testa del rilevato che hanno asportato una parte dello strato di terreno compattato, causando degli spostamenti non trascurabili e mettendo a rischio l'efficacia dell'opera. Lo scopo della seguente trattazione sarà quello di ricavare un coefficiente di sicurezza globale che possa quantificare la funzionalità del rilevato paramassi. Per tanto, una volta aver validato il modello ed aver ricavato i parametri meccanici, si procederà alla creazione di un nuovo **scenario** in cui saranno modellati i due massi improntati sull'opera di difesa passiva. La situazione attuale in sito è rappresentata della *Figura 5-5* e *Figura 5-6*



Figura 5-5 Blocco 1 improntato sul rilevato



Figura 5-4 Blocco 2 Improntato sul rilevato

La stima dei volumi rappresentati è effettuata mediante dei file .dxf (*Figura 5-6*) ricavati da riprese con drone: mediante la stima dello spessore e la superficie dei blocchi si ricavano i volumi (*Tabella 5-2*):

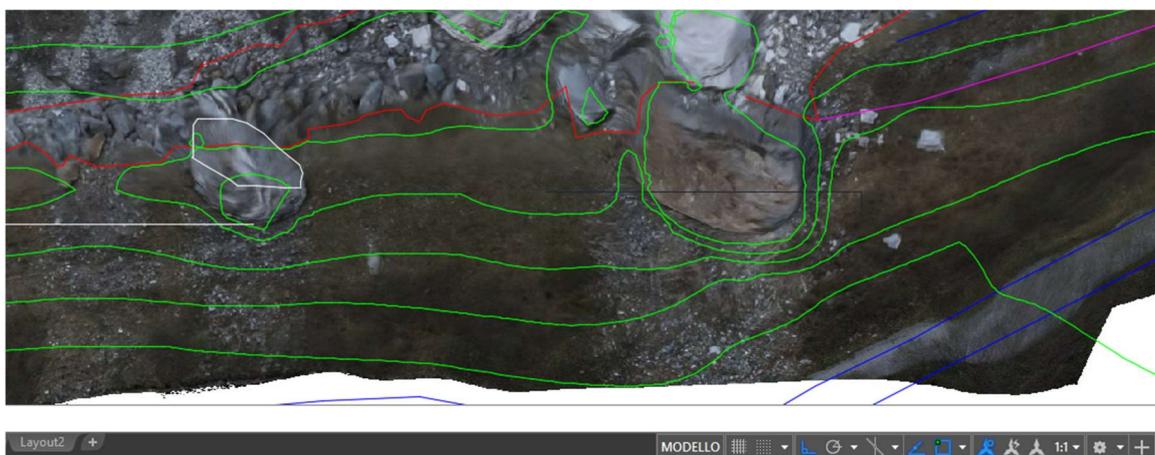


Figura 5-6 File DXF della zona di interesse del rilevato (Cavagnino, 20018)

Caratteristiche geometriche del 1° blocco			Caratteristiche geometriche del 2° blocco		
Area	183	[m ²]	Area	84	[m ²]
h	5,5	[m]	h	6	[m]
V	1006,5	[m ³]	V	504	[m ³]

Tabella 5-2 Caratteristiche geometriche dei due blocchi presenti sul rilevato

5.2 Modellazione dello scenario per la validazione del modello

Il programma RS3 è un software agli elementi finiti (FEM) che prevede la schematizzazione delle unità in semplici elementi, semplificando il problema e facilitando la risoluzione del medesimo. L'analisi agli elementi finiti è suddivisa in alcuni step fondamentali:

- Definizione del dominio: nel caso di un'analisi bidimensionale le dimensioni del dominio sono scelte in modo che il modello non risenta degli effetti di bordo. Solitamente il valore caratteristico delle dimensioni del dominio dipende dall'opera in questione. Nel caso analizzato, dato che il bedrock e la fondazione del rilevato sono coincidenti, si assume uno spessore della fondazione pari a 20 m ed una distanza del rilevato dai margini pari a 30 m. La modellazione del bedrock è arbitraria in quanto esso, rappresentando un piano infinitamente rigido, potrebbe essere modellato con degli incastri alla base dell'opera.
- Discretizzazione degli elementi: Il dominio è discretizzato in un numero di piccole regioni chiamate elementi finiti. La risoluzione delle equazioni avverrà per ogni singolo elemento. La mesh utilizzata è tetragonale a 4 nodi, con un infittimento nelle zone di applicazione dei carichi al fine di poter valutare con maggiore precisione l'effetto di questi ultimi sull'opera (Figura 5-7).

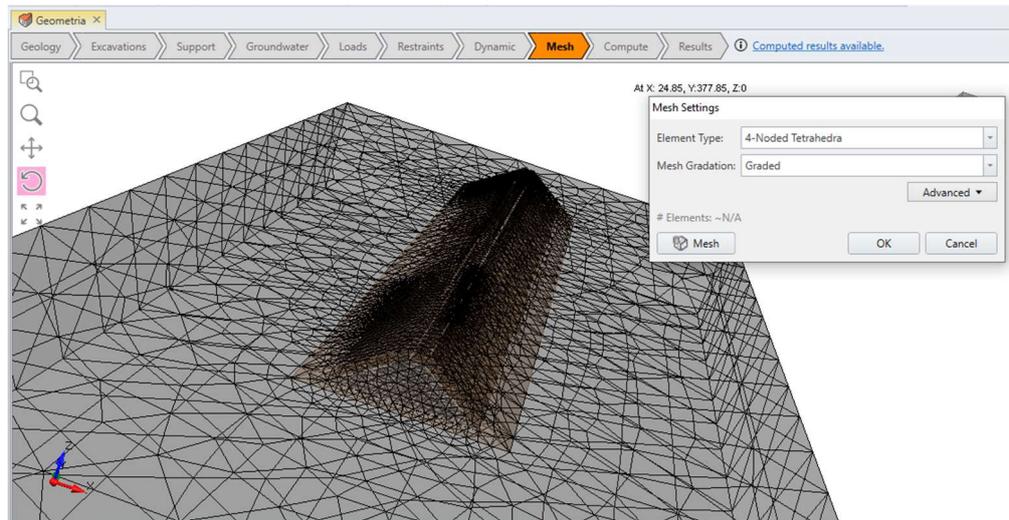


Figura 5-7 Discretizzazione del modello con elementi tetragonali in ambiente RS3

- Condizioni al contorno: esse hanno la funzione di diminuire il numero di incognite del problema e rappresentano un mezzo per poter prevedere gli spostamenti dell'opera. Per questo motivo viene vincolato il modello alla fondazione attraverso degli incastrati in modo che il rilevato paramassi, una volta subito l'impatto dei blocchi, è libero di traslare sul piano e deformarsi (Figura 5-8). La fondazione rappresenterà, quindi, un piano indeformabile sulla quale il rilevato paramassi sarà libero di traslare. Tale scelta è stata adottata sulla base degli spostamenti misurati in sito e analizzando i file .dwg: da essi (Figura 5-9) si può notare infatti una traslazione verso valle in prossimità della zona di impatto del blocco.

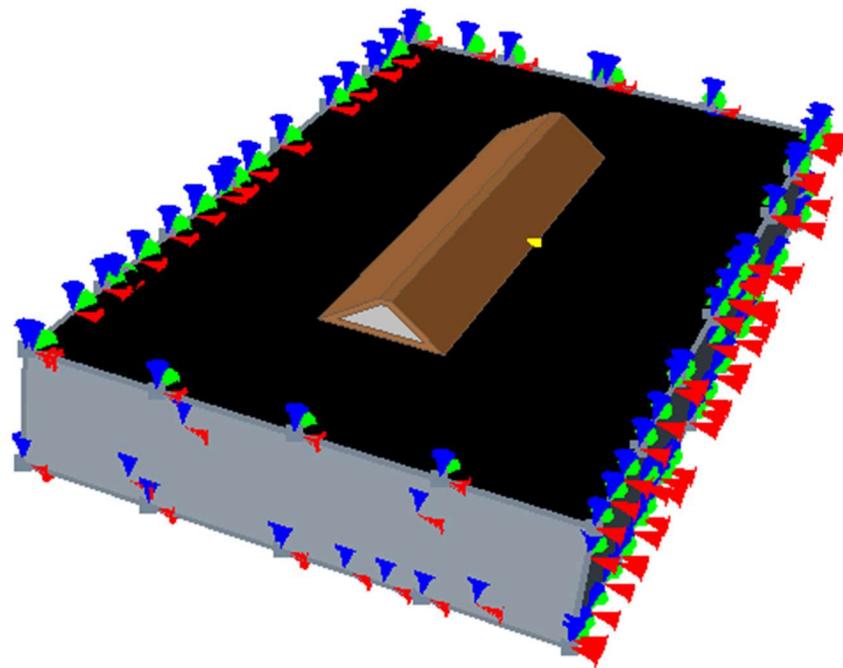


Figura 5-8 Condizioni al contorno del modello tridimensionale

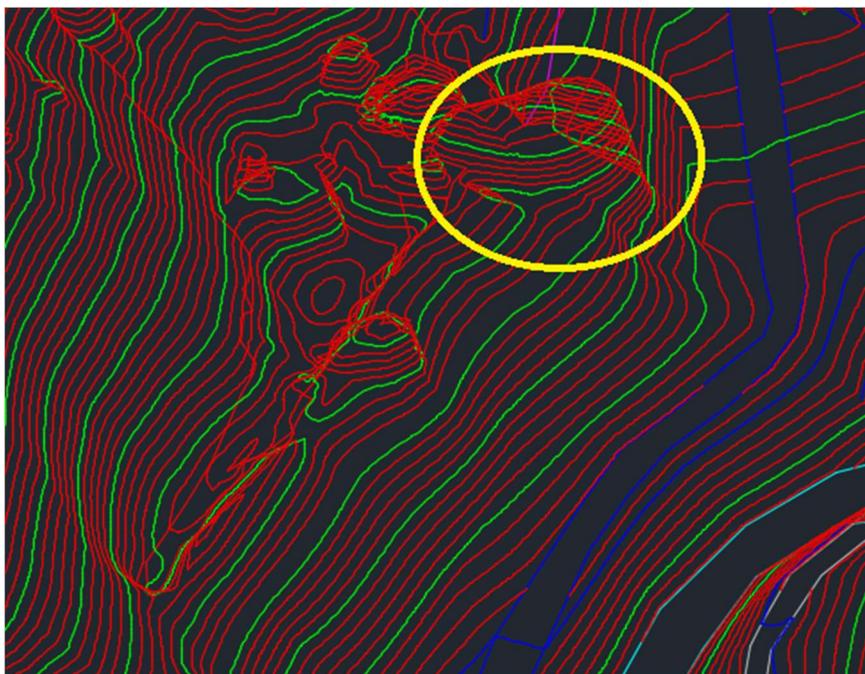


Figura 5-9 File .dwg della zona di interesse, (Geologo Cavagnino)

5.2.1 Modellazione dei blocchi impattanti sul rilevato

Una procedura semplificata per tenere conto della forza (dinamica) sul rilevato nel momento in cui il blocco di roccia impatta l'opera, è quella di stimare una forza statica equivalente. Esistono diverse formule in letterature, provenienti da diversi esperimenti condotti sui modelli. Nella seguente trattazione è utilizzata la formula proposta da *Plaussiard e Donzè (2009)*:

$$F = 225 \cdot \left(\frac{m \cdot v^2}{2}\right)^{0.66}$$

In cui **m** rappresenta la massa del blocco in kg e **v** rappresenta la velocità del blocco espressa in m/s. In tale formula, la velocità sarà ricavata dalle analisi di propagazione.

In *Tabella 5-3* sono mostrati i risultati ottenuti relativamente ai due massi impattanti sull'opera. Le velocità in gioco sono state ricavate dall'analisi di propagazione con software RockyFor3D, inserendo i volumi precedentemente calcolati. Una volta ricavata la forza con la formula di *Plaussiard e Donzè (2009)* si calcola il carico uniformemente distribuito **q**: esso è ricavato dividendo la forza F per la superficie di impatto del blocco ricavata dalle planimetrie e dai file .dwg.

Forze del 1° blocco			Forze del 2° blocco		
V	1006,5	[m ³]	V	504	[m ³]
v	7,17	[m/s]	v	7,07	[m/s]
F	32172	[kN]	F	21818	[kN]
q	0,164	MPa	q	0,169	MPa

Tabella 5-3 Valori delle forze dei blocchi impattanti sul rilevato

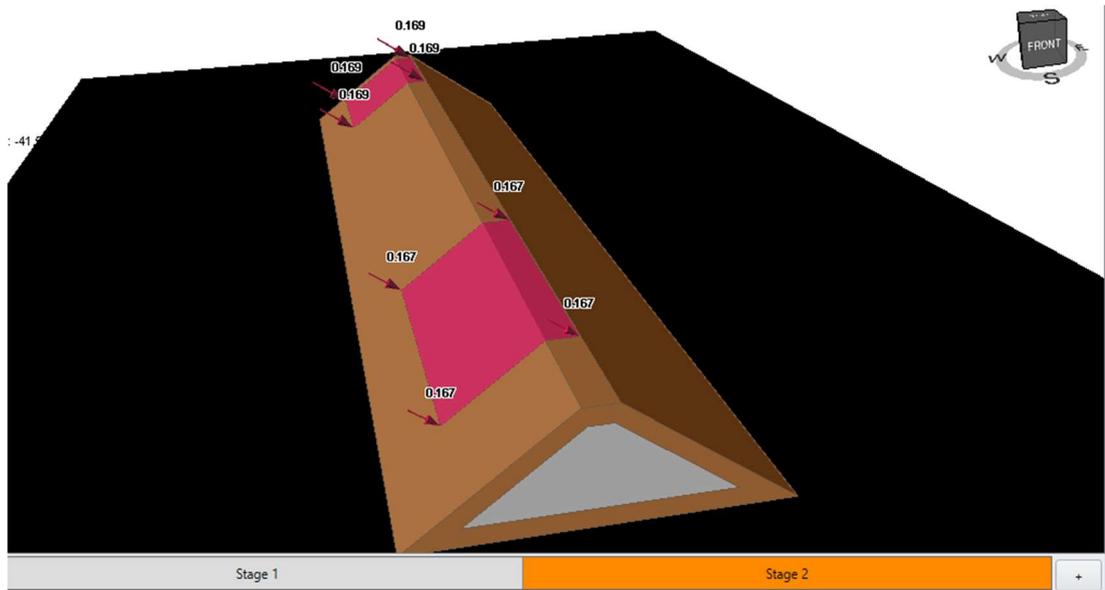


Figura 5-10 Modello su RS3 con l'applicazione dei carichi dovuti all'impatto dei blocchi

Dalla *Figura 5-10* si può notare come l'impronta dei carichi riprodotta è regolare, semplificando la reale situazione in sito. Una parte del masso ha impattato contro la testa del rilevato ed una parte contro il lato inclinato. La distanza tra i due massi impattanti è di circa 40 m.

5.3 Back-analysis e validazione del modello

Per la validazione del modello si procede con una back-analysis che servirà per tarare i parametri di resistenza meccanica del rilevato paramassi. Essa viene effettuata, come detto precedentemente, misurando in situ gli spostamenti che ha subito realmente il rilevato successivamente all'impatto dei due blocchi.

Tramite un processo iterativo vengono aggiornati i parametri di resistenza di volta in volta, fin quando non si ottengono dalle simulazioni numeriche gli spostamenti reali del rilevato. Questi ultimi, che coincidono con l'affondamento del blocco nell'opera, sono stati misurati dal punto più lontano raggiunto dal rilevato rispetto allo scenario indeformato.



Figura 5-11 Spostamenti dovuti all'impatto dei due blocchi

La *Figura 5-11* mostra in giallo la traccia della testa del rilevato in uno scenario in assenza di deformazione. A partire da questa retta sono stati misurati i due spostamenti:

- Per il blocco con una volumetria pari a 1006.5 m^3 è stato misurato uno spostamento pari a 3.42 m
- Per il blocco con una volumetria pari a 504 m^3 è stato misurato uno spostamento pari a 2.8 m

Gli spostamenti sono quindi, come ci si aspettava in base alle elevate energie in gioco, superiori al metro. È necessario evidenziare che, nonostante le importanti forze in gioco e degli spostamenti molto grandi, l'opera non è collassata.

I materiali che costituiscono il rilevato paramassi sono stati simulati come segue:

- Per il terreno compattato è stato utilizzato il criterio di rottura alla Mohr-Coulomb ipotizzando un comportamento elastico perfettamente plastico.
- Anche per il rinforzo in pietra è stato adottato il medesimo criterio di rottura con un comportamento perfettamente plastico.

In *Tabella 5-4* sono riportati i parametri ottenuti dalla back analysis:

Parametri di resistenza		
EMBANKMENT	c	0,02 [MPa]
	ϕ	45 [°]
	Tens.Stre	0,01 [MPa]
	Res. Φ	45 [°]
	Dilat.Angl	15 [°]
	E	150 [MPa]
	v	0,25 [-]
RINFORZO	c	0,001 [MPa]
	ϕ	50 [°]
	Tens.Stre	0,2 [MPa]
	Res. Φ	50 [°]
	Dilat.Angl	0 [°]
	E	30000 [MPa]
	v	0,3 [-]

Tabella 5-4 Parametri di resistenza meccanica dei materiali che costituiscono il rilevato paramassi

I risultati ottenuti consentono di fare le seguenti considerazioni:

- Il terreno compattato del rilevato presenta dei parametri di resistenza che sono compatibili con i valori riportati in letteratura (per esempio D.Peila et al, 2007). Infatti, si ricava una coesione pari a 20 kPa ed un angolo di resistenza al taglio pari a 45°, con un modulo di deformabilità di 150 MPa. Infatti nell'articolo pubblicato da *D.Peila et al nel 2005* sono resi noti i parametri di resistenza meccanica ottenuti mediante prove di laboratorio riportati nella *Tabella 5-5*

	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ' (kN/m ³)	Description
Type 1	9	34	21	Sand and gravel
Type 2	50	30	17	Silt and clay

Tabella 5-5 Parametri di resistenza pubblicati da D.Peila, et al(2007)

- Il rinforzo interno in pietrame e malta presenta dei valori di coesione molto bassi pari a 1 kPa; ciò risulta accettabile in quanto il rinforzo in pietra all'interno del rilevato è assemblato mediante l'utilizzo di una malta che conferisce al materiale un valore minimo di coesione. L'angolo di resistenza al

taglio ricavato è pari a 50° in accordo con gli studi condotti da *Barton (2008)* riassunti in *Figura 5-12*.

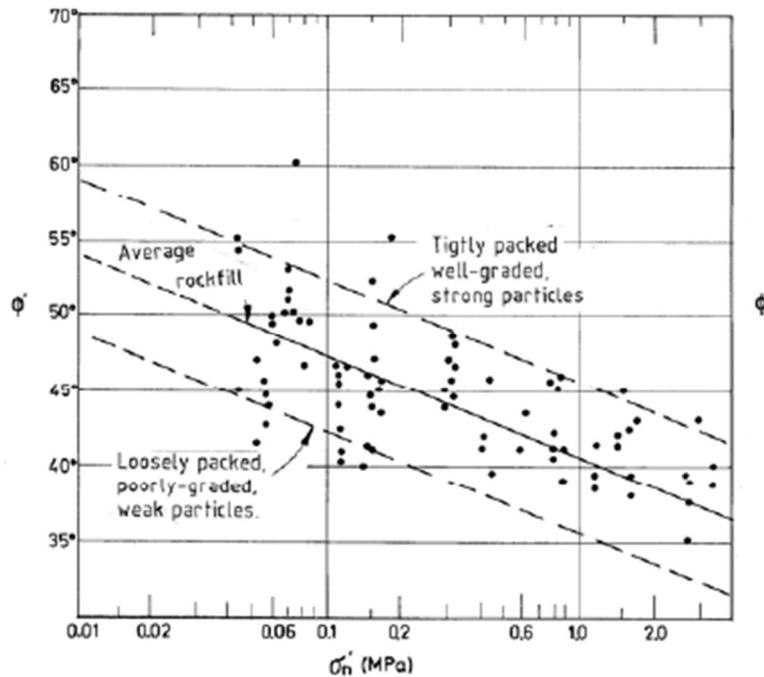


Figura 5-12 Grafico dei rockfill Barton (2008)

Entrando nel grafico di *Figura 5-12* con un valore di tensione agente in situ pari a 0.45 MPa ed intercettando la retta “Average Rockfill” si ricava un valore dell’angolo di resistenza al taglio pari a circa 45° , non lontano dal valore ricavato dalla back-analysis. La rigidezza del materiale, pari a 30 GPa, è risultata accettabile e conforme ai valori ricavati in letteratura.

Una volta tarati i parametri di resistenza meccanica del rilevato si procede al calcolo degli spostamenti e quindi alla validazione del modello.

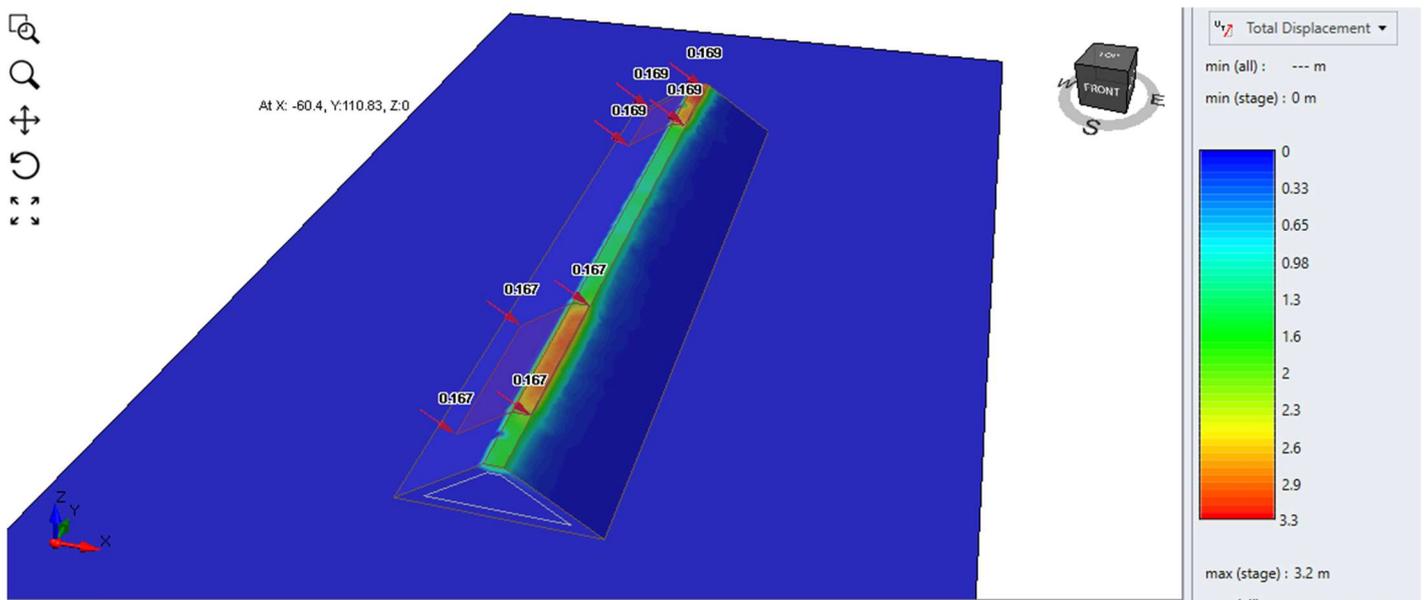


Figura 5-13 Andamento degli spostamenti nel rilevato

Dalla *Figura 5-13* si può notare l'andamento degli spostamenti lungo tutto lo sviluppo del rilevato. In prossimità delle zone di impatto dei due blocchi si registrano degli spostamenti più marcati, con dei massimi pari a 3.3 m. Nella fascia centrale gli spostamenti hanno dei valori pressoché costanti (circa 1 m). La testa del rilevato, quindi, è come se si spostasse rigidamente in direzione orizzontale anche nelle zone in cui non è avvenuto l'impatto.

Successivamente sono diagrammati gli spostamenti registrati in testa del rilevato attraverso l'utilizzo di una "query" così come mostrato in *Figura 5-14*. L'origine della query è posizionata sulla sinistra, in prossimità del blocco con un volume di 1006.5 m³.

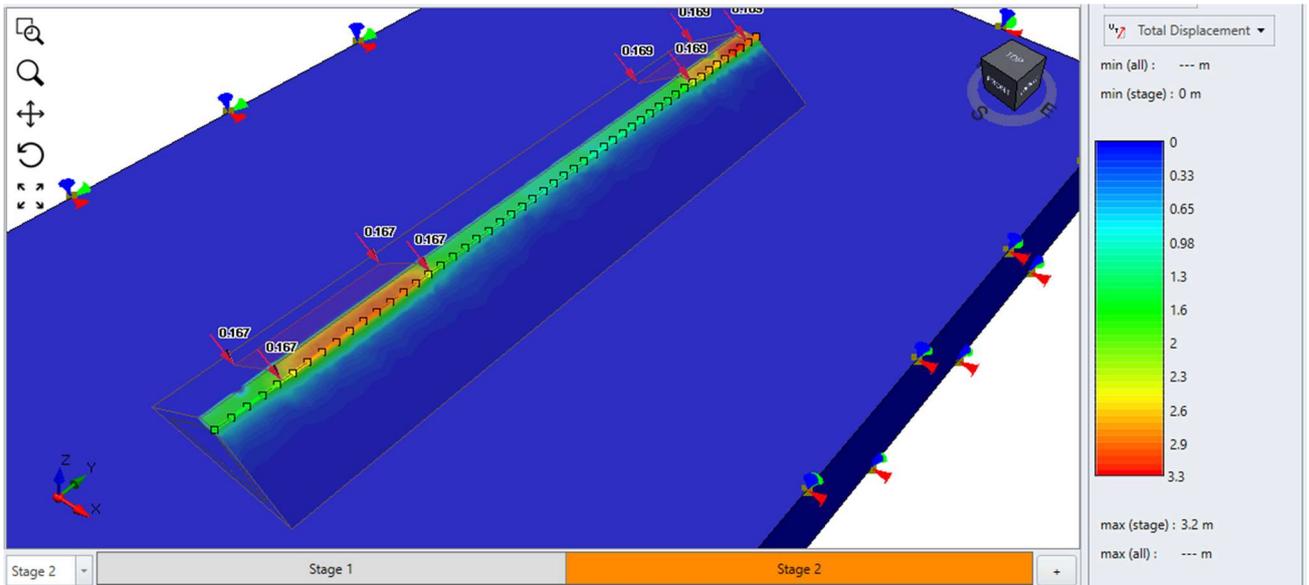


Figura 5-14 Installazione della query sulla testa del rilevato

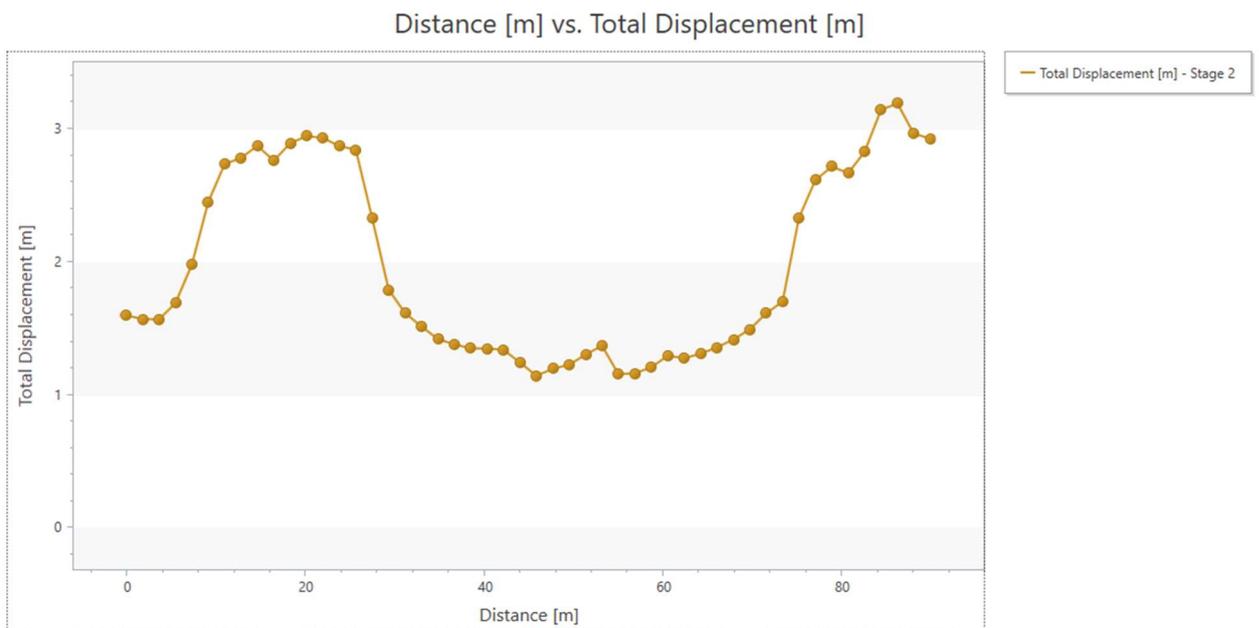


Figura 5-15 Grafico dell'andamento degli spostamenti

In *Figura 5-15* si può osservare il grafico che mostra l'andamento degli spostamenti in testa. A 20 m dalla fine del rilevato vi è il blocco con volume pari a 500 m^3 in cui si registra uno spostamento massimo pari a 2.93 m a fronte dei 2.8 m misurati (*Figura 5-16*).

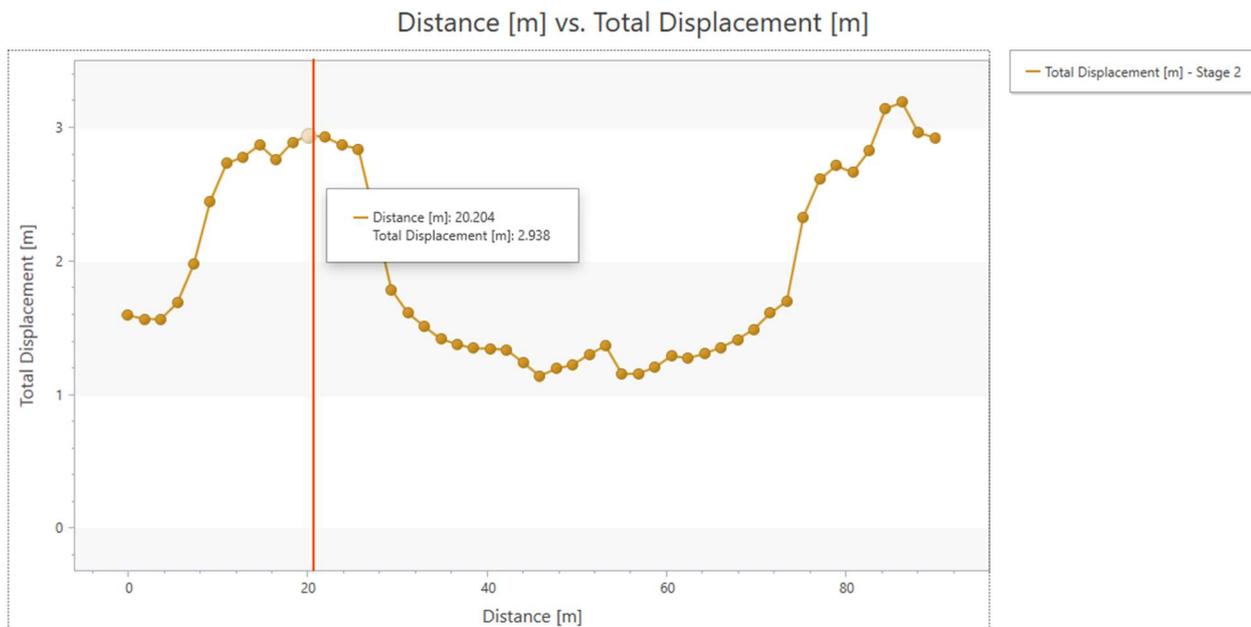


Figura 5-16 Andamento degli spostamenti in prossimità del blocco con un volume pari a 504 m^3

A 80 m dalla fine del rilevato vi è il blocco con volume pari a 1006.5 m^3 in cui si registra uno spostamento massimo pari a 3.18 m a fronte dei 3.4 m misurati. (Figura 5-17)

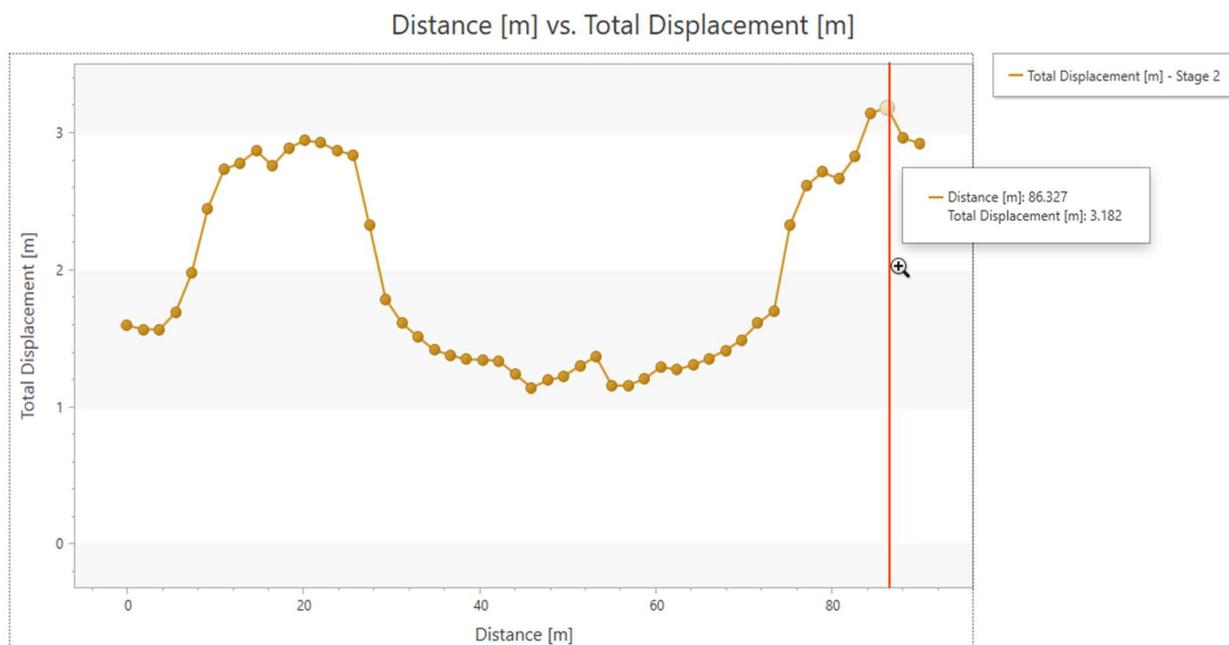


Figura 5-17 Andamento degli spostamenti in prossimità del blocco con un volume pari a 1006.5 m^3

Sulla base dei risultati ottenuti si può concludere che il modello costruito, con i parametri ricavati dalla back analysis, riproduce in modo soddisfacente la situazione reale.

Riassumendo, si possono elencare gli spostamenti ottenuti:

- Lo spostamento misurato per il blocco in roccia con un volume pari a 1006.5 m³ è pari a 3.42 m. Lo spostamento ricavato dal modello, una volta tarati i parametri di resistenza meccanica, è pari a 3.18 m;
- Lo spostamento misurato per il blocco in roccia con un volume pari a 504 m³ è pari a 2.8 m. Lo spostamento ricavato dal modello, una volta tarati i parametri di resistenza meccanica, è pari a 2.94 m.

5.4 Stabilità globale del rilevato paramassi

Una volta validato il modello, si procede con la valutazione del livello di sicurezza dell'opera, sia allo stato attuale che a seguito dell'impatto di ulteriori blocchi in roccia. Si riproduce la geometria del rilevato, tenendo in conto i due blocchi in testa al rilevato. A tal fine si rimodella il rilevato asportando la parte di terreno collassato a seguito dell'impatto con i monoliti e applicando dei carichi gravitativi uniformemente distribuiti pari al peso dei blocchi (*Figura 5-18*).

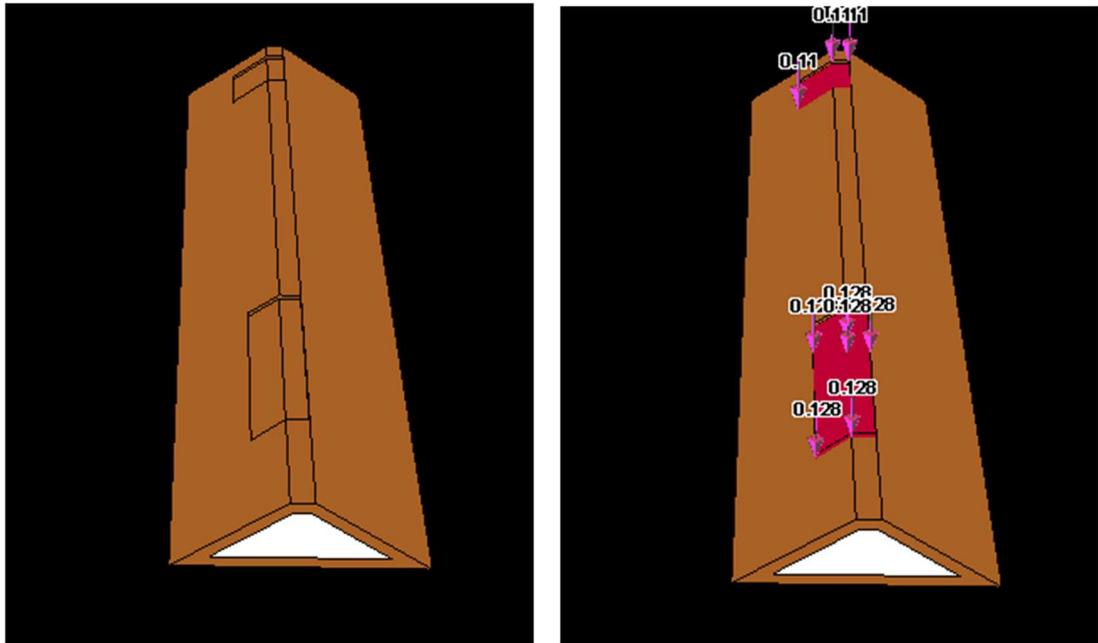


Figura 5-18 Situazione attuale del rilevato con i due blocchi poggianti sulla testa dell'opera

In *Figura 5-18* viene mostrata la modellazione dei blocchi attraverso dei carichi uniformemente distribuiti in direzione verticale. L'impronta è stata valutata sulla base delle considerazioni effettuate al paragrafo 5.3. Il volume dei blocchi è moltiplicato per il peso specifico e successivamente diviso per la superficie di impronta. La pressione del blocco con una volumetria pari a 1006.5 m^3 è pari a 0.128 MPa mentre per il blocco di 504 m^3 è uguale a 0.11 MPa .

Successivamente si valuta il livello di sicurezza globale del rilevato nella situazione attuale, ovvero con i blocchi poggianti sulla testa del rilevato. Pertanto, si calcola un coefficiente di sicurezza FS attraverso la tecnica "Shear Strength Reduction SSR" implementata all'interno del software RS3. Questo metodo prevede la riduzione progressiva dei parametri di resistenza fin quando l'analisi non converge più; questa è la condizione di equilibrio limite e il rapporto tra il valore di partenza dei parametri di resistenza dei materiali e il valore all'equilibrio limite fornisce il fattore di sicurezza globale dell'opera. I parametri di resistenza meccanica di partenza dei materiali costituenti il rilevato sono ricavati nel paragrafo 5.3 nella *Tabella 5-4*.

Dalla *Figura 5-19* si ricava il coefficiente di sicurezza dell'opera nella condizione attuale (ovvero con i due blocchi incastrati sulla testa del rilevato) che è pari a **1.33**. Quindi il pendio risulta stabile essendo il coefficiente di sicurezza maggiore dell'unità.

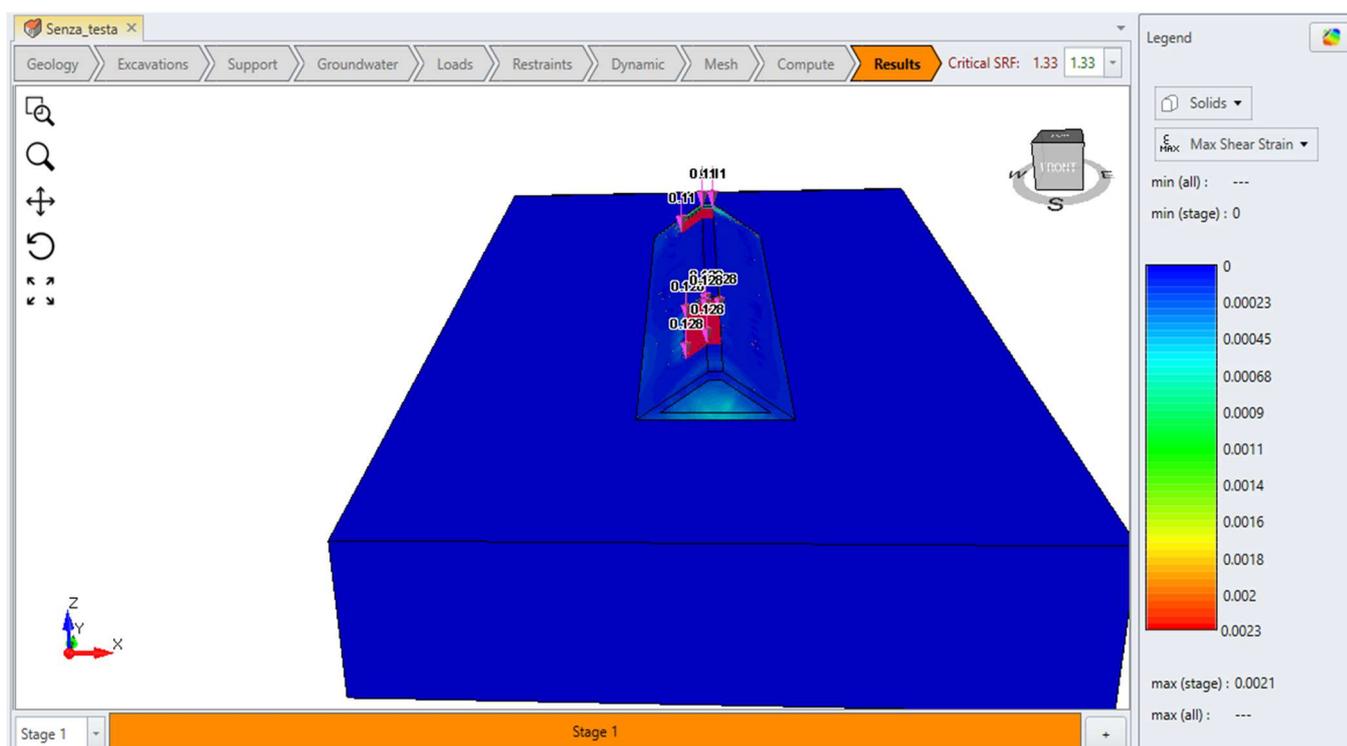


Figura 5-19 Valutazione del Coefficiente di sicurezza dell'opera nelle reali condizioni in sito

5.5 Analisi di stabilità del rilevato a seguito di ulteriori impatti

Si intende valutare la stabilità del rilevato secondo uno scenario per cui nuovi eventi di crollo inducono l'impatto di blocchi di roccia contro quelli già depositati in testa. Il modello di partenza è quello definito nel paragrafo precedente, ove però ai carichi gravitativi già presenti sul rilevato si aggiungono ulteriori forze pseudo-statiche dovute all'impatto dei nuovi blocchi.

A tale scopo occorre scegliere i volumi dei blocchi che possono cadere durante un nuovo evento, escludendo volumi molto grandi (come ad esempio quelli presenti sopra il rilevato) in quanto si assume dai rilievi effettuati in sito che il crollo di questi blocchi sia già avvenuto e difficilmente si possa riproporre in futuro. Per-tanto si andranno a considerare dei valori medi dei volumi presenti lungo il versante, definendo due scenari:

- Un primo scenario è rappresentato dal volume utilizzato per l'analisi di propagazione pari a 2.4 m^3
- Un secondo scenario prevede un volume pari a 8 m^3

Mediante l'ausilio dei file .dxf, sono stati ricavati i volumi dei blocchi presenti lungo il versante escludendo quelli con volumi maggiori a 10 m^3 in quanto si assume che il pendio abbia già "scaricato" tutti i massi con tale volumetria ed effettuando una media dei volumi rimanenti. Il valore di 8 m^3 Da questi si ricavano i volumi di 8 m^3 , che rappresenta lo scenario più gravoso, e 2.4 m^3 pari al volume con una frequenza di caduta maggiore.

5.5.1 Parametri di Input del modello con blocco pari a 2.4 m^3

Affinché possa essere ricavata la forza pseudo-statica da applicare al rilevato è necessario individuare la velocità di impatto, in intensità e direzione. L'intensità è ricavata dall'analisi di propagazione riportata nel capitolo 4. In prossimità del rilevato la velocità è di circa 35 m/s : in *Tabella 5-6* sono ricavati i dati di input del problema

Impatto dei blocchi	
Scenario Impatto con volume $2,4 \text{ m}^3$	
v	35 m/s
V	2,4 m3
m	6000 [kg]
F	4844,5 [kN]

Tabella 5-6 Valori utilizzati per la stabilità del rilevato con un blocco avente una volumetria pari a 2.4 m^3

A questo punto è necessario valutare la direzione di applicazione della forza: per far ciò deve essere ricavato l'angolo di impatto del blocco dalle analisi traiettografiche, attraverso l'installazione di un collettore in ambiente GIS. Tramite il software RockyFor3D saranno ricavati i valori di tali angoli.

Il collettore è costruito mediante la creazione di uno shapefile poligonale in prossimità dei due blocchi precedentemente analizzati. In *Figura 5-20* si visualizza il collettore in rosa: a questo vengono assegnati i seguenti valori nella tabella degli attributi:

- Net_number: posto pari ad 1 che rappresenta un valore di default adimensionale (Tabella 5-7);
- Net_energy: rappresenta la capacità di assorbimento del collettore. E' posto pari a 0 in quanto la rete non esiste materialmente, ma serve soltanto per ricavare la direzione dei blocchi (Tabella 5-7);
- Net_height: misura l'altezza in metri della barriera. Anch'esso è posto pari a 0 (Tabella 5-7);



Figura 5-20 Collettore in prossimità dei due blocchi

	z	rg70	rg20	rg10	rockdensi	soiltype	net_number	net_energy	net_height
1	1326,00	0,200	0,40	0,900		4,00	1	0	0
2	1327,00	0,200	0,40	0,900		4,00	1	0	0
3	1326,00						1	0	0
4	1326,00						1	0	0
5	1324,00						1	0	0
6	1327,00	0,200	0,40	0,900		4,00	1	0	0
7	1326,00	0,200	0,40	0,900		4,00	1	0	0
8	1326,00	0,030	0,03	0,030		3,00	1	0	0

Tabella 5-7 Parametri di input del collettore installato

Dall'analisi di propagazione con collettore effettuata su RockyFor3D si ricavano i seguenti valori:

- Media degli angoli ricavati: 13°
- Angolo Massimo: 85°
- Angolo minimo: 8°

A questi valori si aggiunge il valore ricavato dalla cumulata di frequenza: essa riporta sulle ascisse il valore degli angoli e sulle ordinate la frequenza cumulata per ogni valore. Al 95° percentile si ricava un angolo pari a 24° come si evince dal grafico in *Figura 5-21*

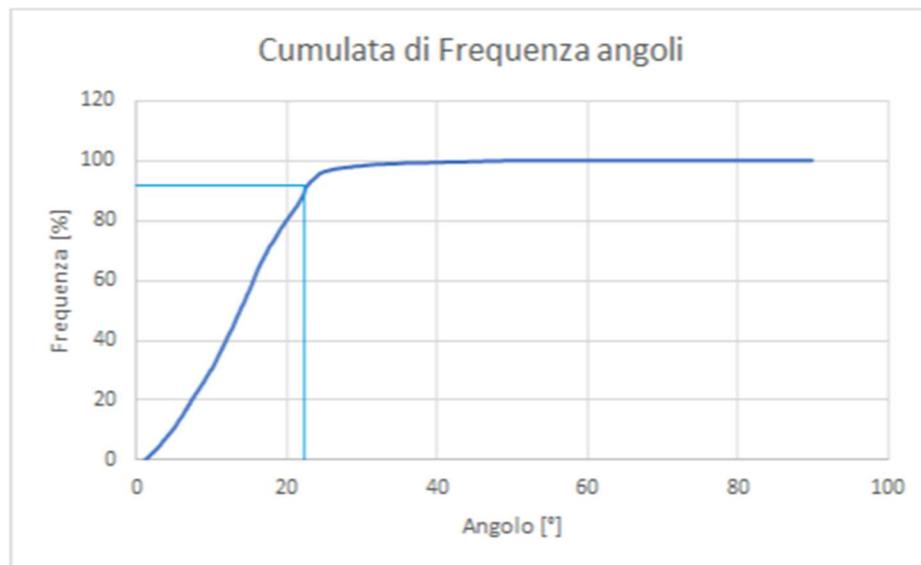


Figura 5-21 Grafico della cumulata di frequenza

Vengono così costruiti 4 scenari per il blocco di volumetria pari a 2.4 m³:

- Angolo di impatto pari a 0°: condizione in cui ci si aspettano le massime deformazioni di taglio dato che la forza impattante è orizzontale, quindi rappresenta la condizione peggiore seppur irrealistica.
- Angolo di impatto pari al minimo: 13°.
- Angolo di impatto pari al 95° percentile: 24°.
- Angolo di impatto pari al valore massimo 90°: condizione in cui ci si aspettano delle deformazioni di taglio minime a causa della verticalità della forza impattante che aumenterà lo stato tensionale verticale σ_v del rilevato .

5.5.2 Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m³ ed angolo di impatto pari a 0°

Le *Figura 5-22* e *Figura 5-23* riportano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

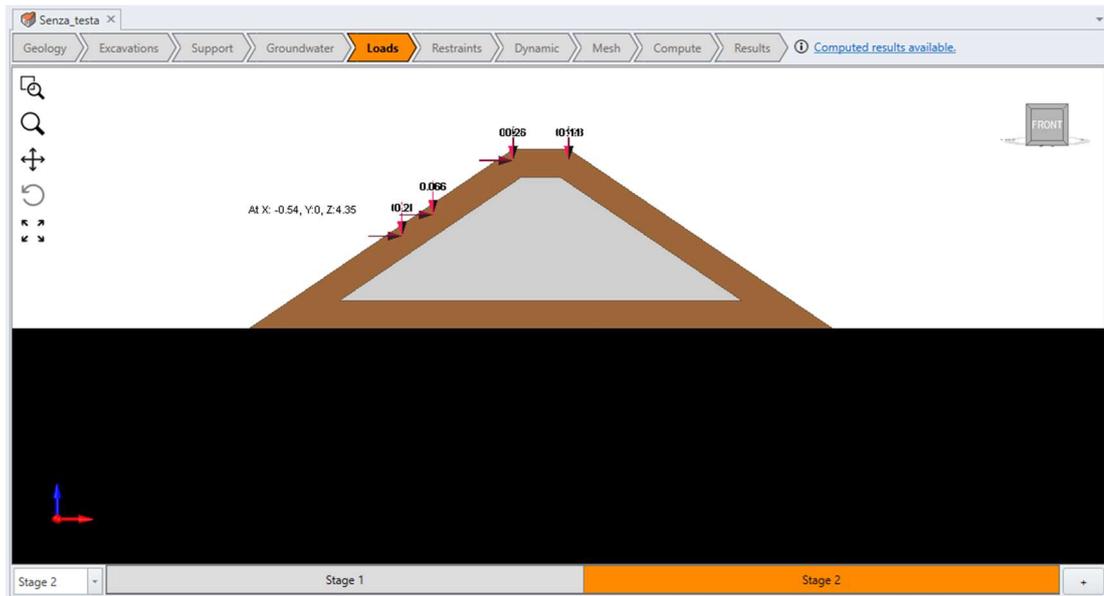


Figura 5-22 Scenario del blocco di 2.4 m³ ed angolo di impatto pari a 0°

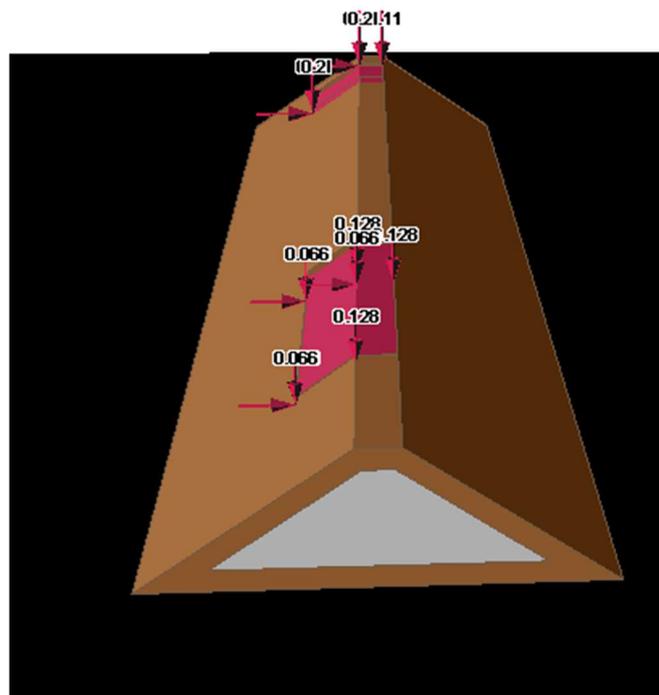


Figura 5-23 Scenario del blocco di 2.4 m³ ed angolo di impatto pari a 0°

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 2.4 m^3 ed una direzione di impatto orizzontale è uguale a **1.26**, valore minore rispetto al $FS=1.33$ ricavato al paragrafo 5.4. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1 cm**, in prossimità del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m^3 (Figura 5-24).

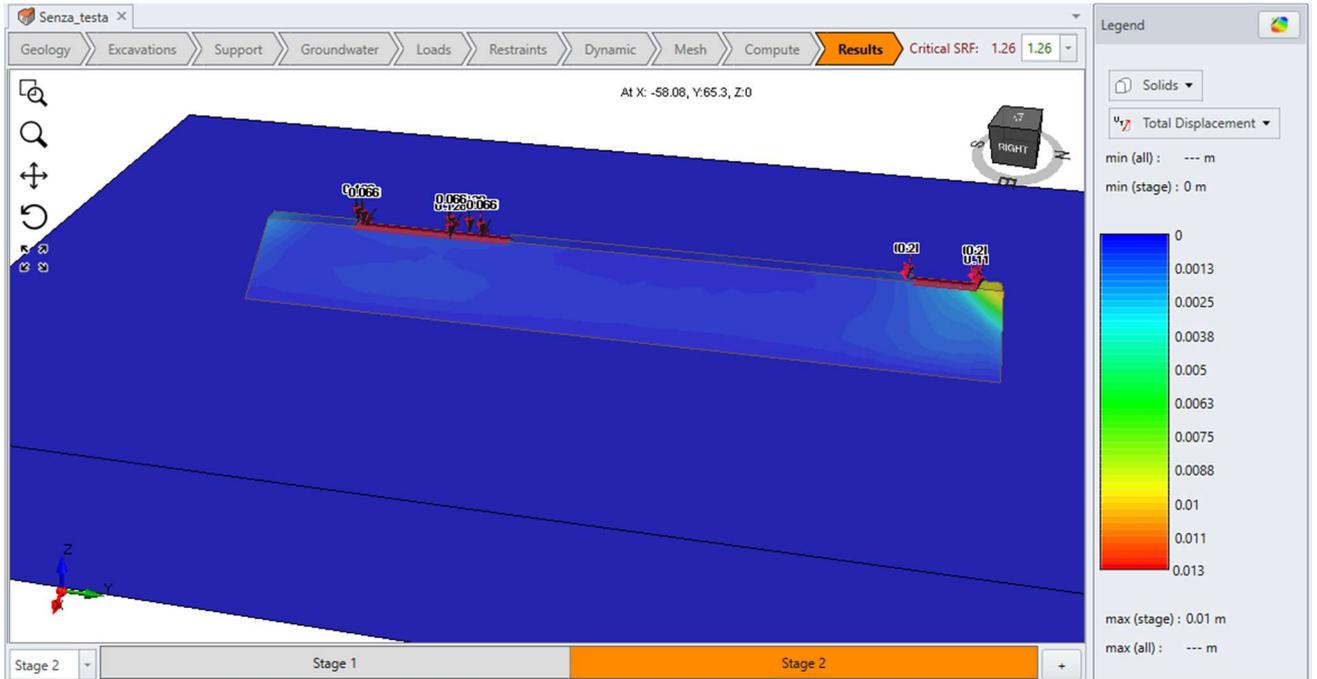


Figura 5-24 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 0°

Come si può notare dalla Figura 5-25 , le massime deformazioni a taglio sono prevalentemente concentrate in prossimità del blocco con volume pari a 504 m^3 , formando una “fascia” tendente all’estremità del rilevato. Ciò spiega come il valore massimo dello spostamento nel rilevato sia raggiunto ove si hanno le massime deformazioni a taglio.

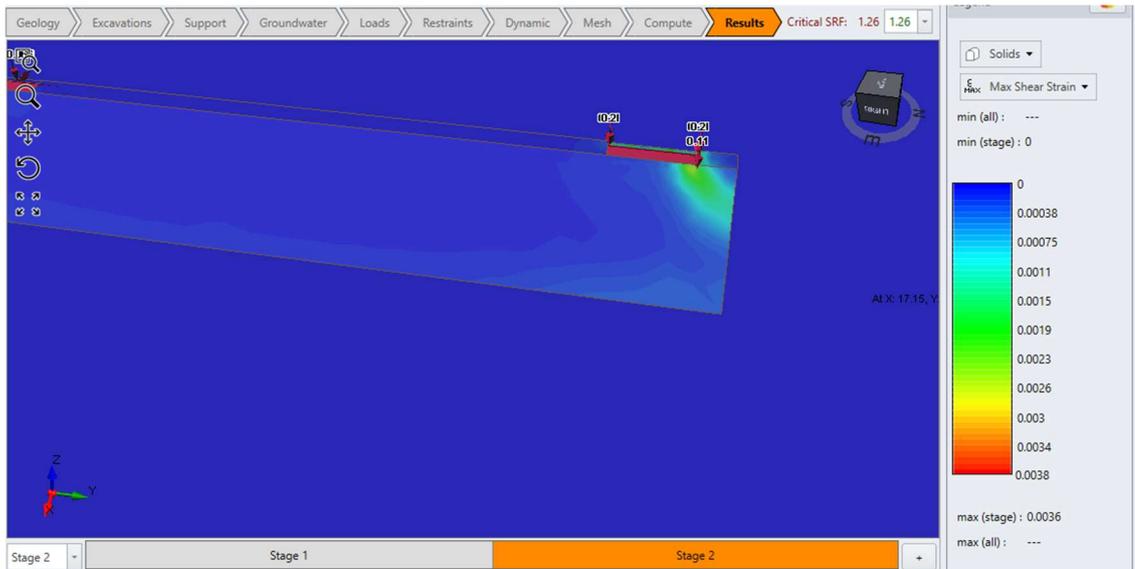


Figura 5-25 Max Shear strain condizioni del blocco di 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 0°

5.5.3 Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 13°

Le Figura 5-26 e Figura 5-27 riportano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

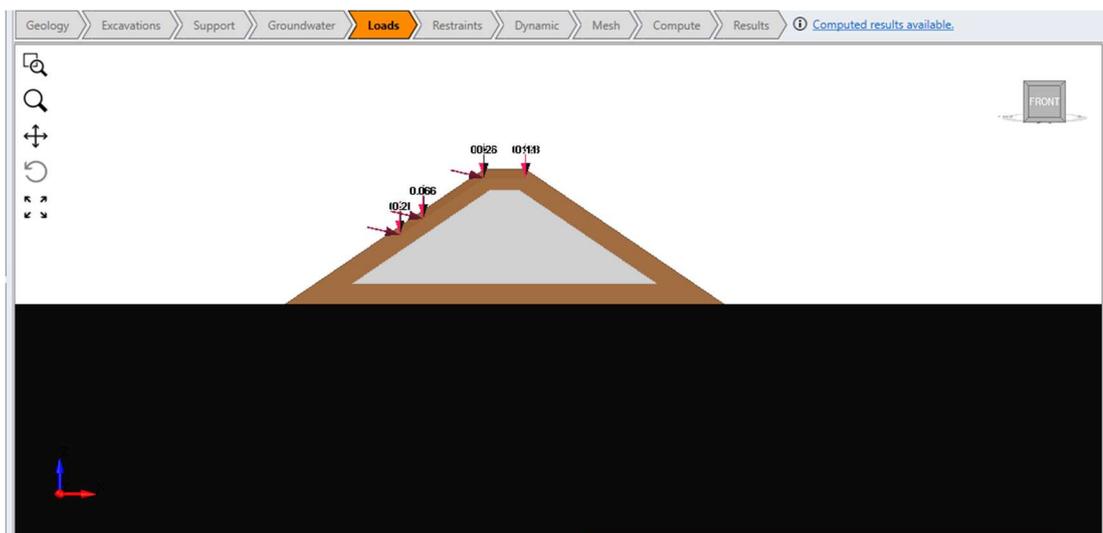


Figura 5-26 Scenario del blocco di 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 13°

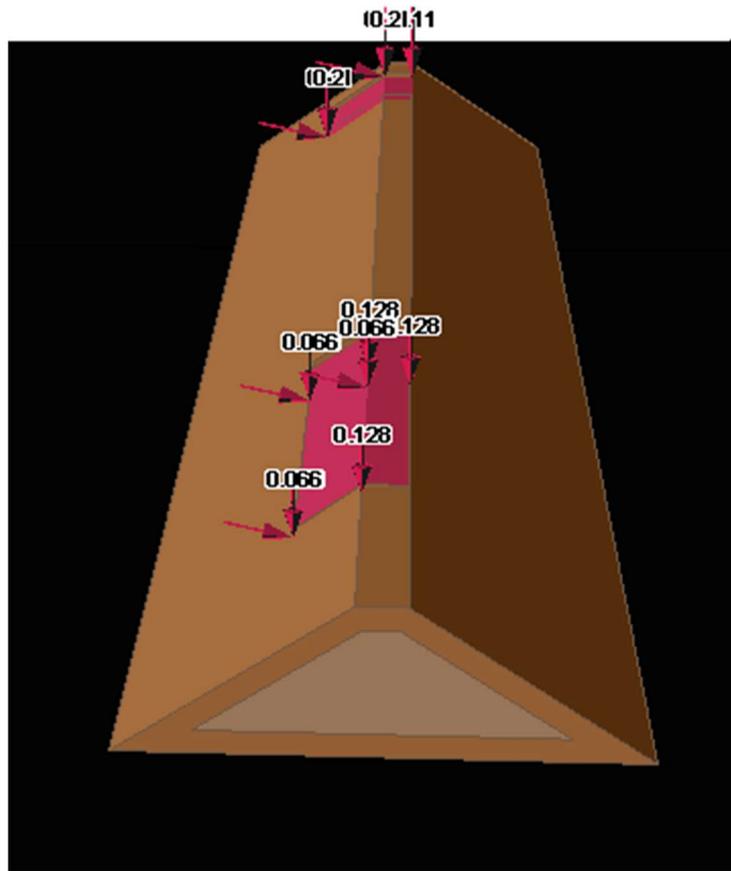


Figura 5-27 Scenario del blocco di 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 13°

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 2.4 m^3 ed un angolo di impatto 13° è uguale a **1.29**, valore minore rispetto al $FS=1.33$ ricavato al paragrafo 5.4. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1 cm**, in prossimità del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m^3 (Figura 5-28).



Figura 5-28 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 13°

In Figura 5-29, le massime deformazioni a taglio sono prevalentemente concentrate in prossimità del blocco con volume pari a 504 m^3 , formando una “fascia” tendente all’estremità del rilevato. Si nota che il valore della massima deformazione a taglio è minore al caso precedente. Ciò è dovuto alla direzione di applicazione della forza: nel caso precedente la forza era orizzontale, in questo caso una parte della forza applicata incrementa le tensioni verticali del rilevato e diminuiscono quelle orizzontali.

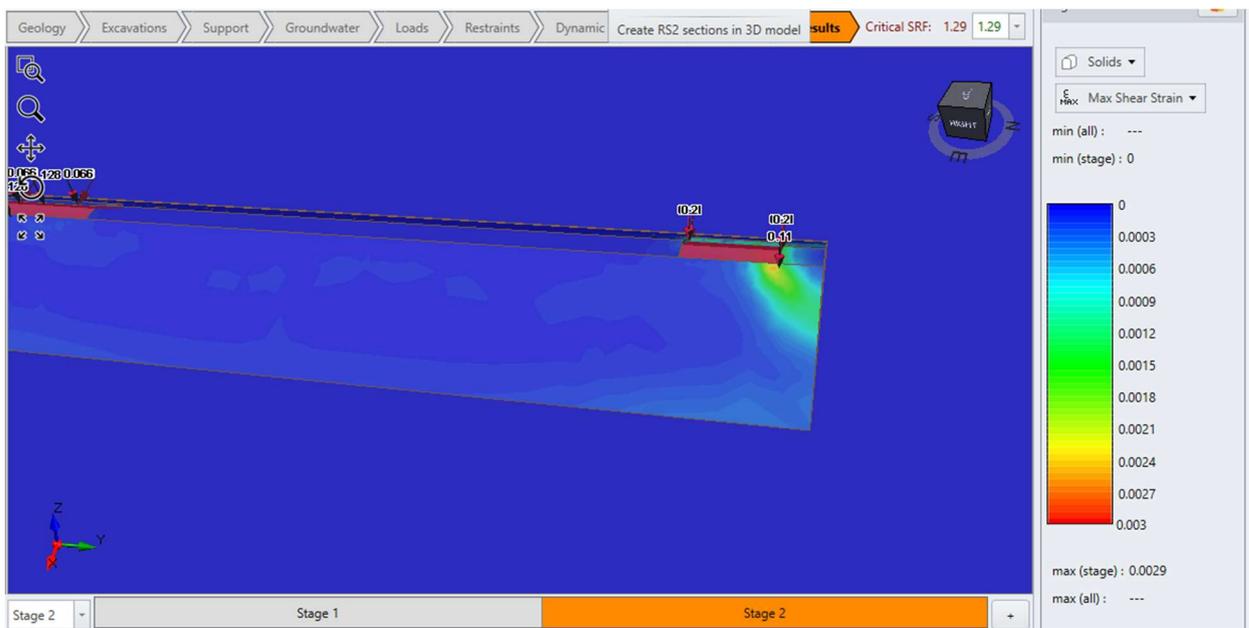


Figura 5-29 Max Shear strain condizioni del blocco di 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 13°

5.5.4 Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m³ ed angolo di impatto pari a 24°

Le *Figura 5-30* e *Figura 5-31* riportano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

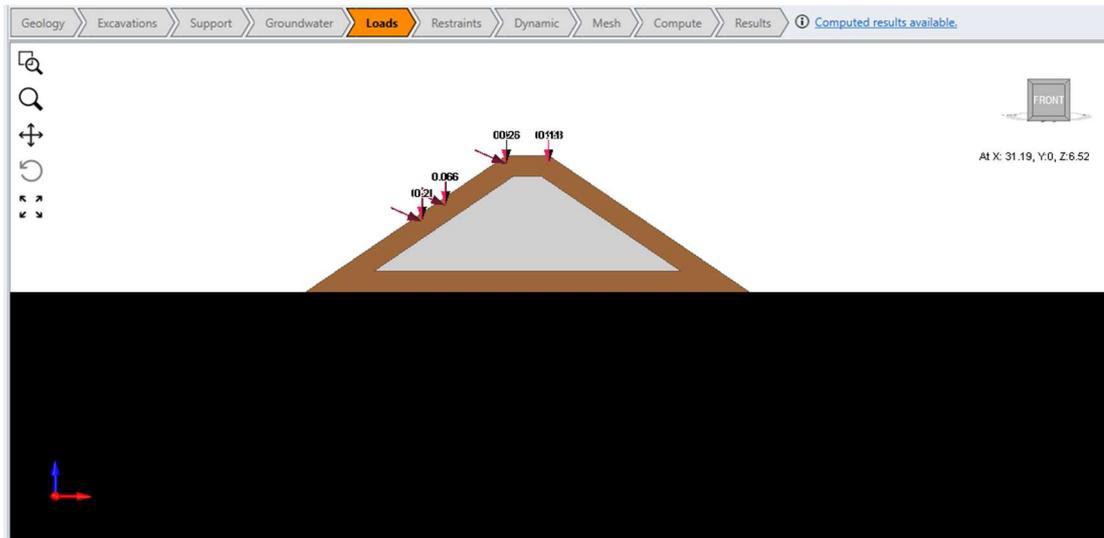


Figura 5-30 Scenario del blocco di 2.4 m³ ed angolo di impatto pari a 24°

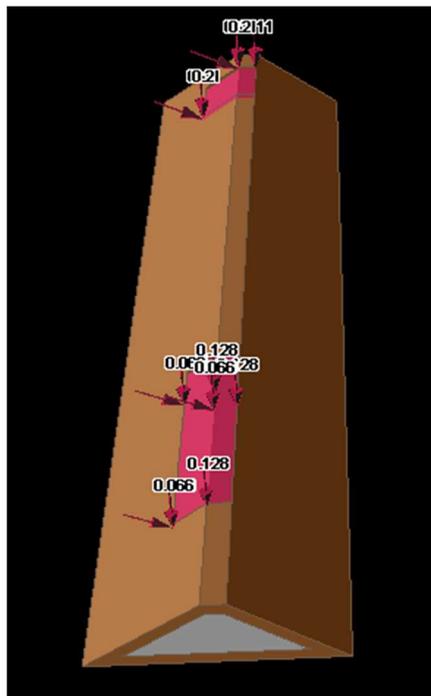


Figura 5-31 Scenario del blocco di 2.4 m³ ed angolo di impatto pari a 24°

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 2.4 m^3 ed un angolo di 24° è uguale a **1.3**, valore minore rispetto al $FS=1.33$ ricavato dalla condizione senza impatto di blocchi L'effetto è quello di una piccola riduzione del fattore globale di sicurezza e l'instabilità è localizzata. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1 cm**, in prossimità del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m^3 . Nella zona del blocco con una volumetria pari a 1006.3 m^3 si registrano degli spostamenti più piccoli. Ciò è dovuto all'impronta della zona di carico che è più piccola in corrispondenza del masso con volume maggiore e disperde maggiormente la pressione dovuta all'impatto dell'ulteriore blocco (*Figura 5-32*).

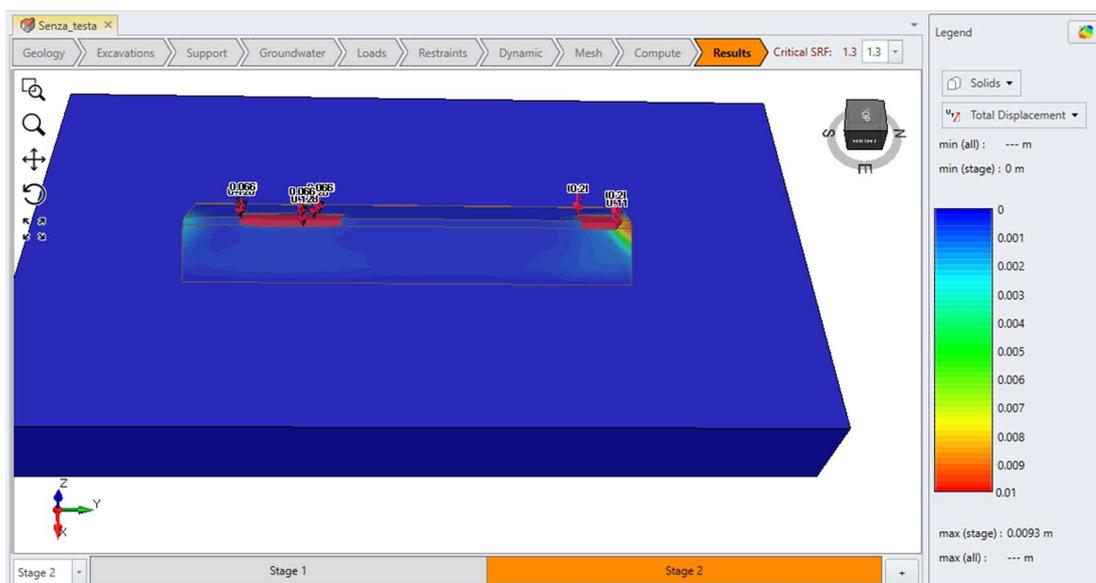


Figura 5-32 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 2.4 m^3 ed angolo di impatto pari a 24°

Anche in questo caso, come si nota dalla *Figura 5-33*, le massime deformazioni a taglio sono prevalentemente concentrate in prossimità del blocco con volume pari a 504 m^3 . Si noti che i valori di deformazione a taglio sono decrescenti al crescere dell'angolo di impatto, dato che la forza incrementa sempre di più le tensioni totali verticali del rilevato.

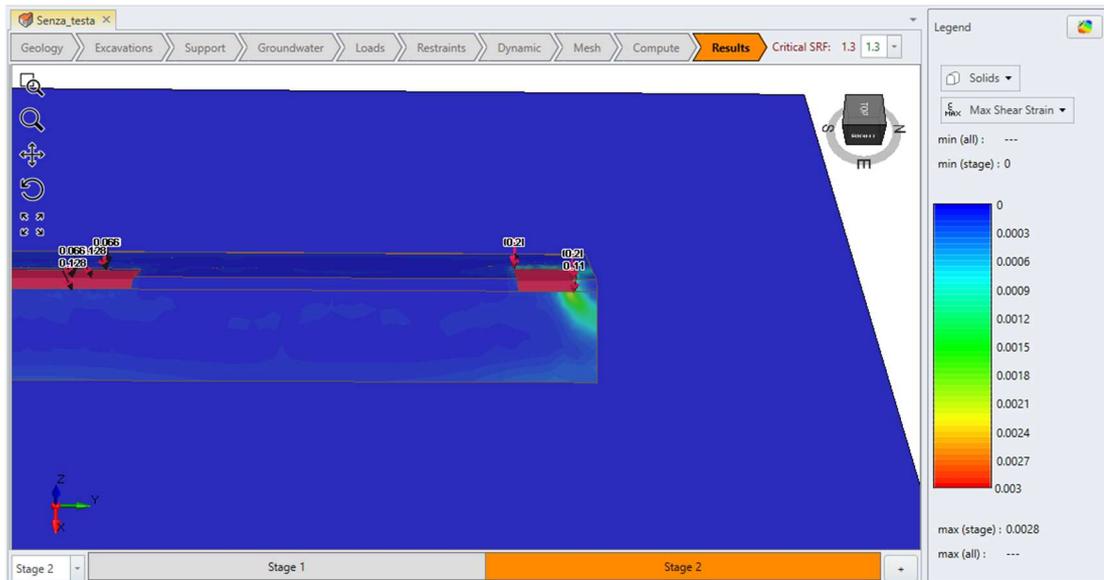


Figura 5-33 Max Shear strain condizioni del blocco di 2.4 m³ ed angolo di impatto pari a 24°

5.5.5 Impatto di un blocco con volumetria pari a 2.4 m³ ed angolo di impatto verticale

Le Figura 5-34 e Figura 5-35 rappresentano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

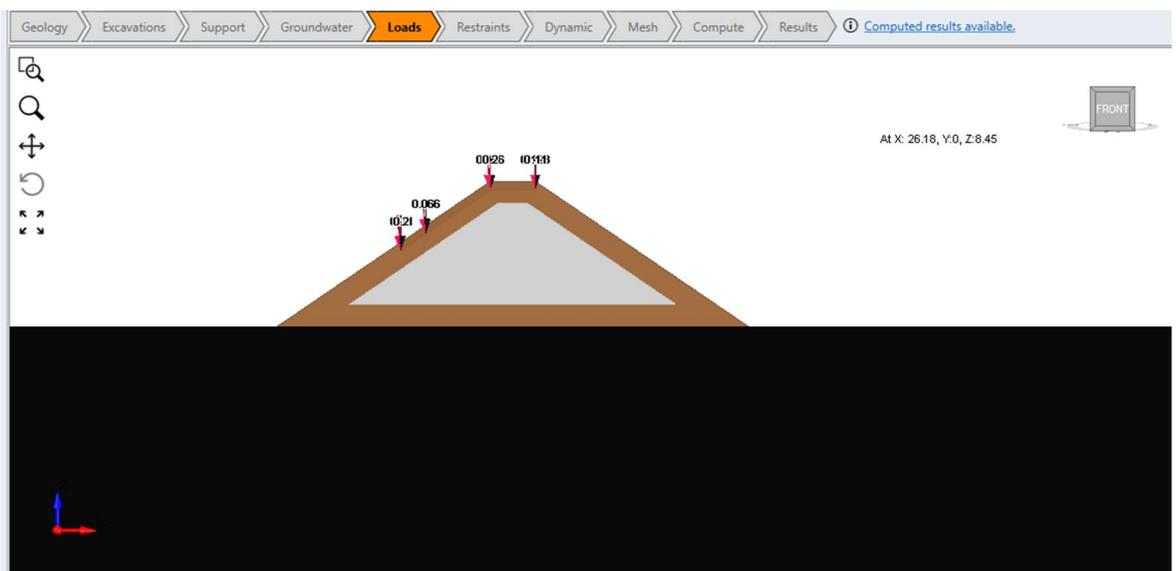


Figura 5-34 Scenario del blocco di 2.4 m³ ed angolo di impatto verticale

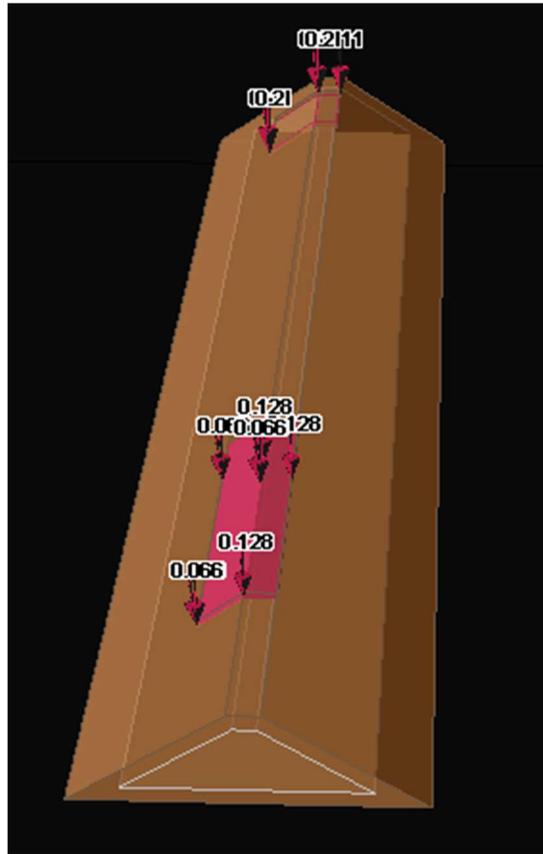


Figura 5-35 Scenario del blocco di 2.4 m³ ed angolo di impatto verticale

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 2.4 m³ ed un angolo di impatto verticale è uguale a **1.3**, valore minore rispetto al FS=1.33 ricavato al paragrafo 5.4. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1.1 cm**, in prossimità del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m³ (Figura 5-36).

5.5.6 Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m³ ed angolo di impatto orizzontale

Affinché possa essere ricavata la forza pseudo-statica da applicare al rilevato è necessario individuare la velocità di impatto: essa è ricavata dall'analisi di propagazione che segue la stessa procedura descritta nel capitolo 4, utilizzando un volume di input del blocco pari a 8 m³. In prossimità del rilevato la velocità è di circa 27 m/s: in tabella sono ricavati i dati di input del problema

Impatto dei blocchi	
Scenario Impatto con blocco di volumetria pari a 8 m ³	
v	27 m/s
V	8 m ³
m	20000 [kg]
F	7613,471 [kN]

Tabella 5-8 Valori utilizzati per la stabilità del rilevato con un blocco avente una volumetria pari a 8 m³

Gli angoli ricavati sono gli stessi che si ricavano al paragrafo 5.5.1, seguendo la stessa procedura.

Dalle *Figura 5-38* e *Figura 5-39* si notano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

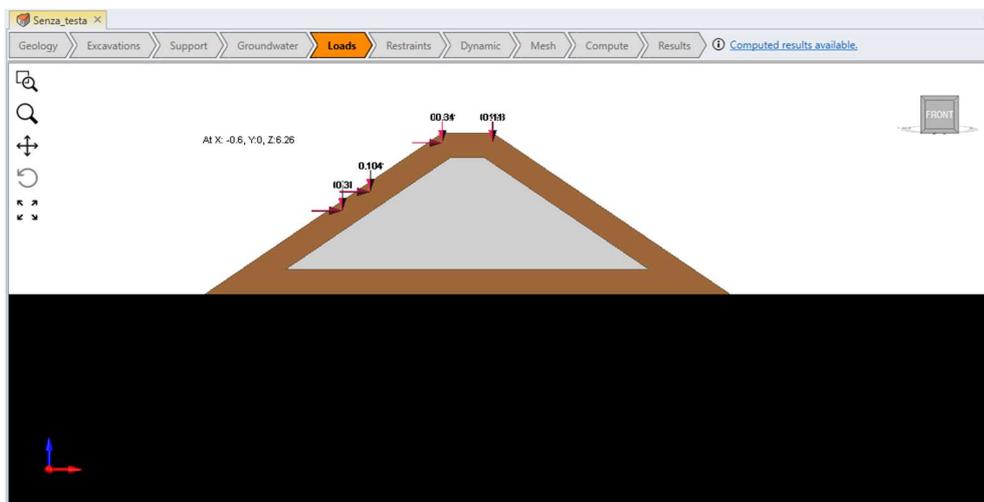


Figura 5-38 Scenario del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto orizzontale

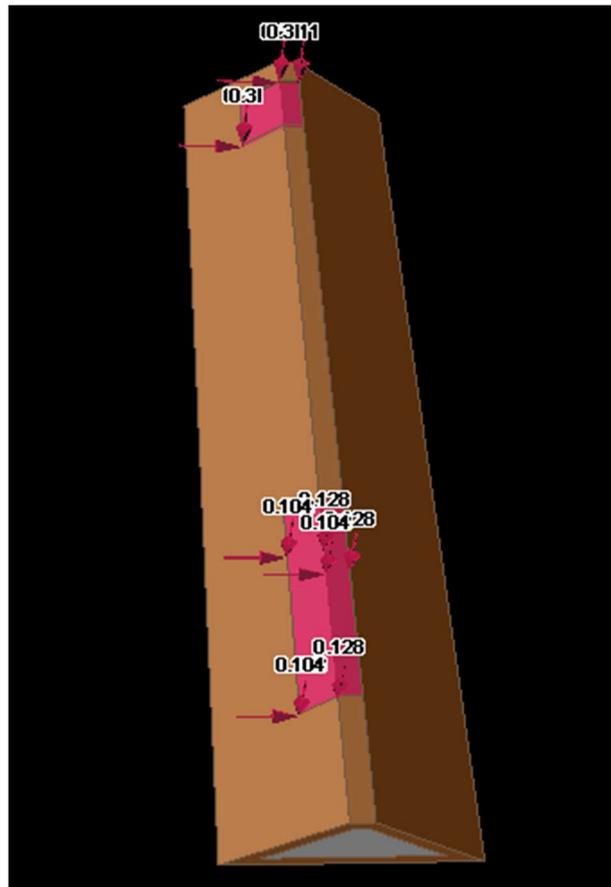


Figura 5-39 Scenario del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto orizzontale

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 8 m³ ed una direzione di impatto orizzontale è uguale a **0.95**, valore minore rispetto al FS=1.33 ricavato al paragrafo 5.4. e minore rispetto all'unità. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1 cm**, in prossimità del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m³ (Figura 5-40).



Figura 5-40 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto orizzontale.

Come si può notare dalla Figura 5-41, le massime deformazioni a taglio sono prevalentemente concentrate in prossimità del blocco con volume pari a 504 m^3 . I valori delle deformazioni a taglio sono il doppio rispetto a quelli ricavati dallo scenario con volume di 2.4 m^3 .



Figura 5-41 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto orizzontale.

5.5.7 Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m³ ed angolo di impatto pari a 13°

Le *Figura 5-42* e *Figura 5-43* riportano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

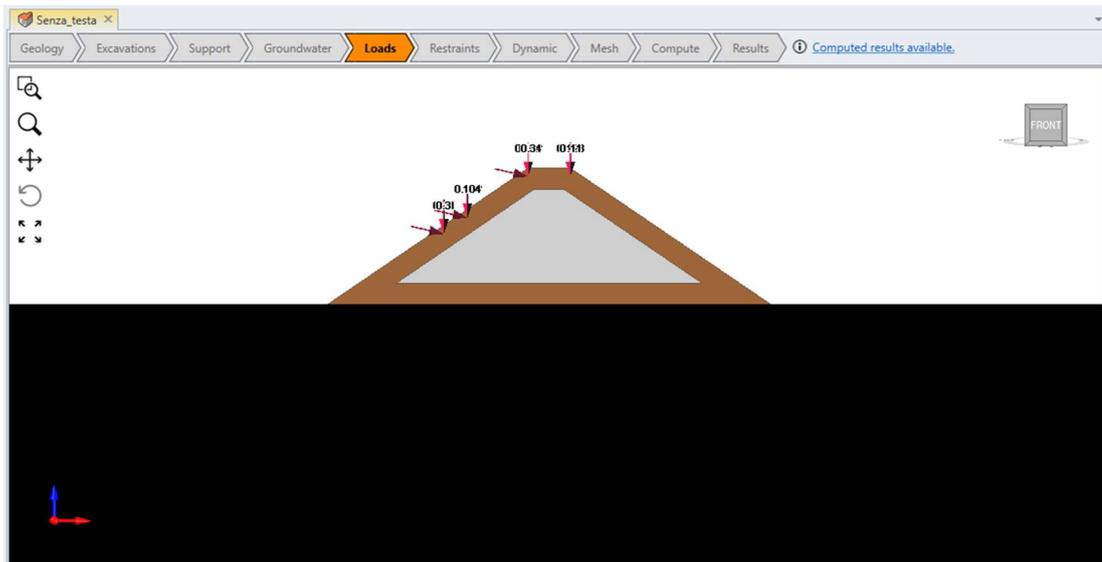


Figura 5-42 Scenario del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto pari a 13°

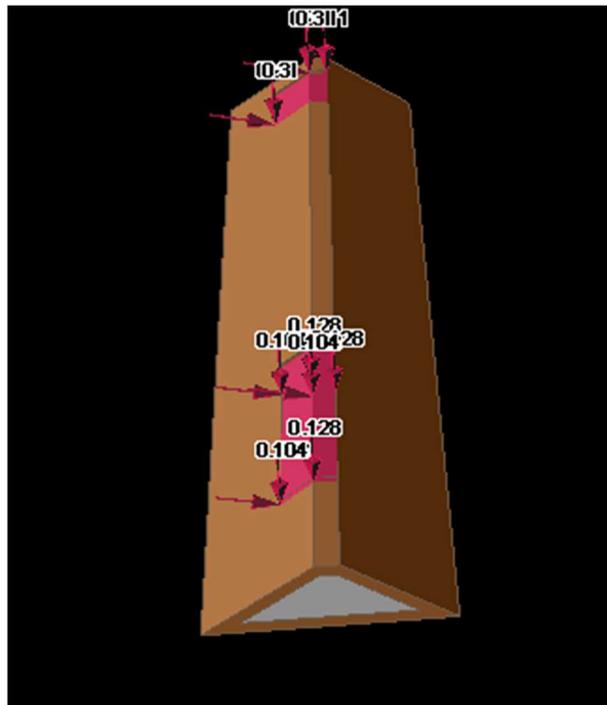


Figura 5-43 Scenario del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto pari a 13°

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 8 m^3 ed un angolo di impatto verticale è uguale a **1.13**, valore minore rispetto al $FS=1.33$ ricavato al paragrafo 5.4. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1 cm**, in prossimità del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m^3 . (Figura 5-44).

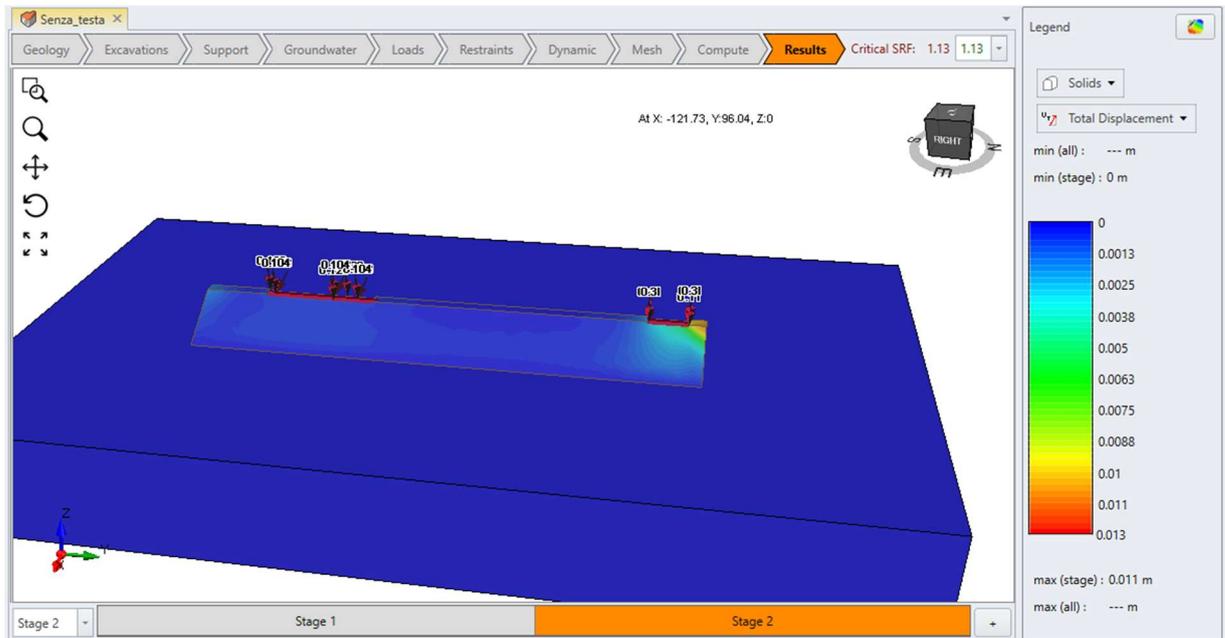


Figura 5-44 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto pari a 13° .

Come si può notare dalla Figura 5-45, le massime deformazioni a taglio sono prevalentemente concentrate in prossimità del blocco con volume pari a 504 m^3 .

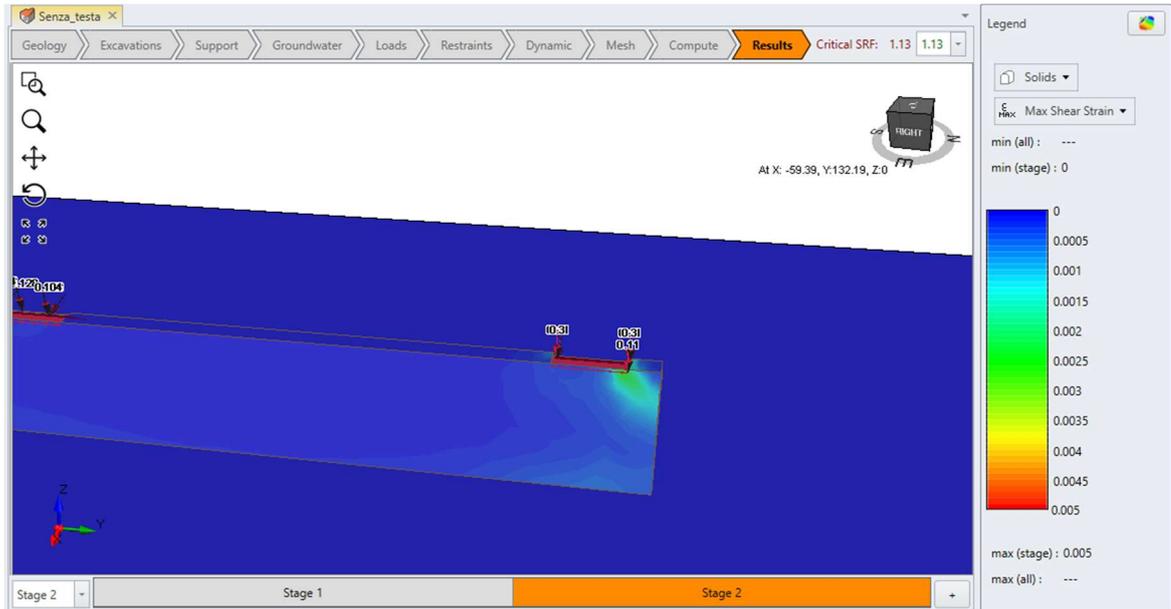


Figura 5-45 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto pari a 13°

5.5.8 Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m^3 ed angolo di impatto pari a 24°

Le Figura 5-44 e Figura 5-45 riportano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

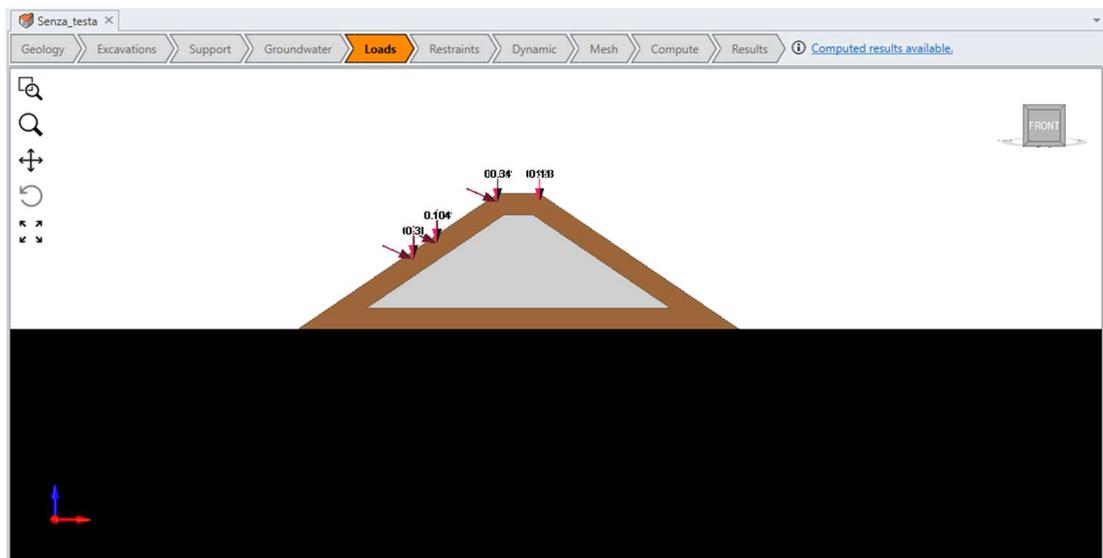


Figura 5-46 Scenario del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto pari a 24°

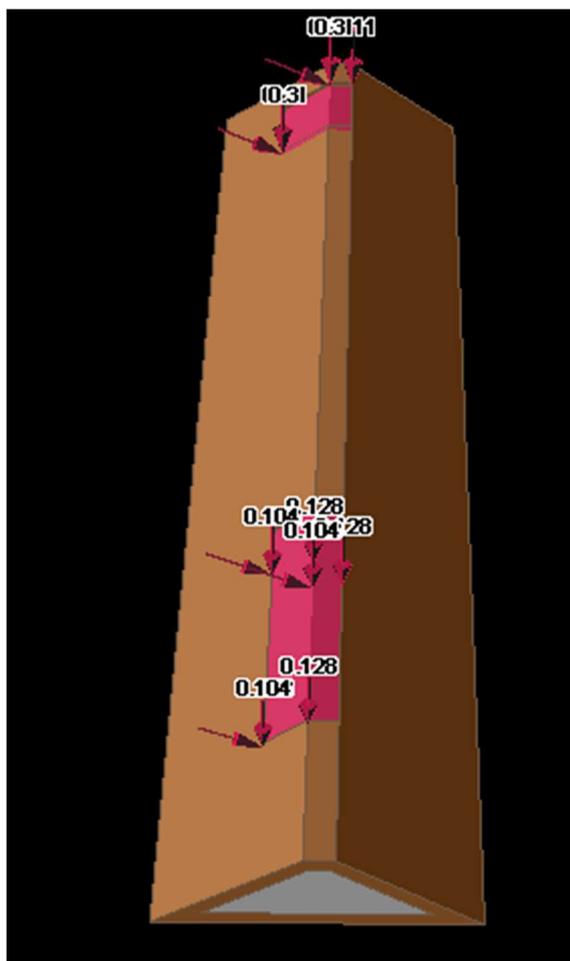


Figura 5-47 Scenario del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto pari a 24°

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 8 m³ ed un angolo di impatto verticale è uguale a **1.2**, valore minore rispetto al FS=1.33 ricavato al paragrafo 5.4. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1 cm**, in corrispondenza del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m³ (Figura 5-48). In prossimità del blocco con volume maggiore, si ricavano degli spostamenti più piccoli: di fatto, il blocco con volume di 8 m³ impatta contro il masso conficcato avente volumetria pari a 1006.3 m³. La superficie di contatto tra il rilevato e quest'ultimo è maggiore rispetto a quella del blocco di 504 m³. Si avrà, pertanto, su tutta la superficie di impatto, una distribuzione degli spostamenti meno localizzata e più dispersa con valori ridotti (Figura 5-52).

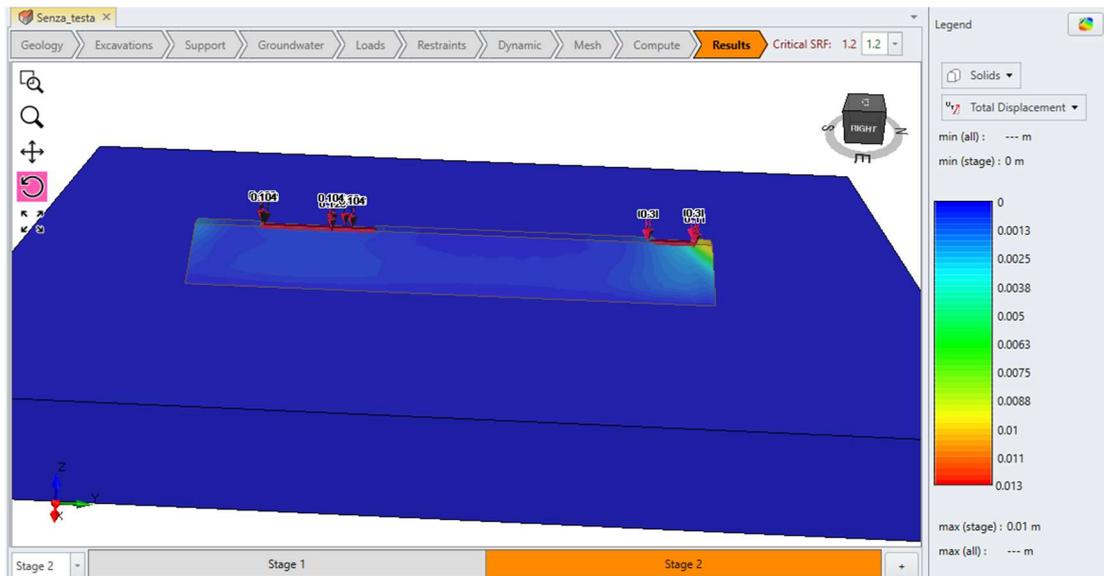


Figura 5-48 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto pari a 24° .

Come si può notare dalla *Figura 5-49*, le massime deformazioni a taglio sono prevalentemente concentrate in prossimità del blocco con volume pari a 504 m^3 , formando una “fascia” tendente all’estremità del rilevato. Ciò spiega come il valore massimo dello spostamento nel rilevato sia raggiunto ove si hanno le massime deformazioni a taglio.

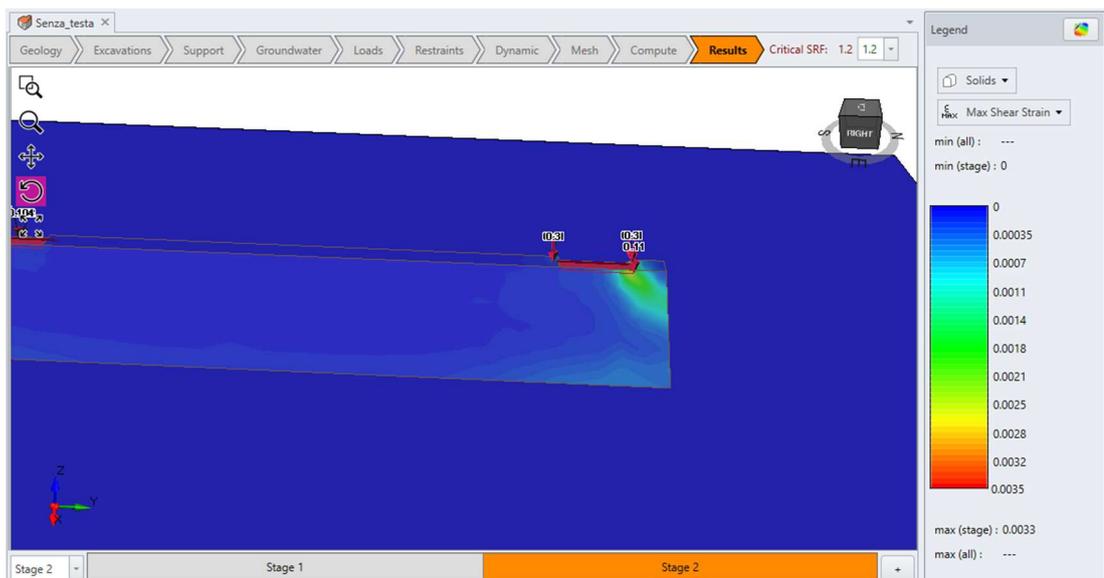


Figura 5-49 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto pari a 24°

5.5.9 Impatto di un blocco con volumetria pari a 8 m³ ed angolo di impatto del blocco verticale

Dalle *Figura 5-50* e *Figura 5-51* si notano i carichi gravitativi dei massi piantati sul rilevato nella parte del materiale asportato (marrone scuro) e le forze pseudo-statiche orizzontali del nuovo blocco:

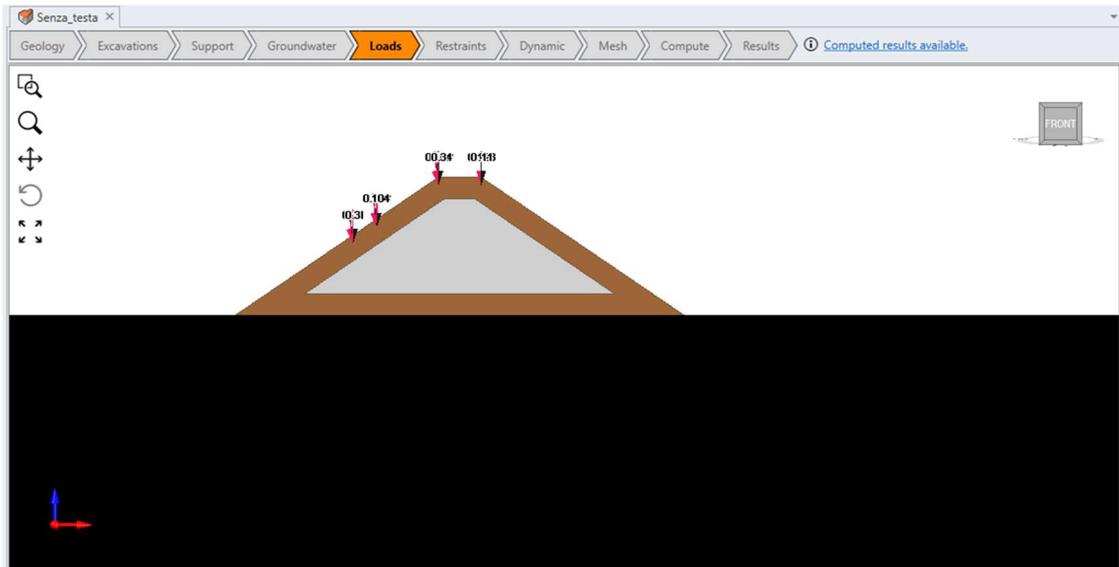


Figura 5-50 Scenario del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto verticale

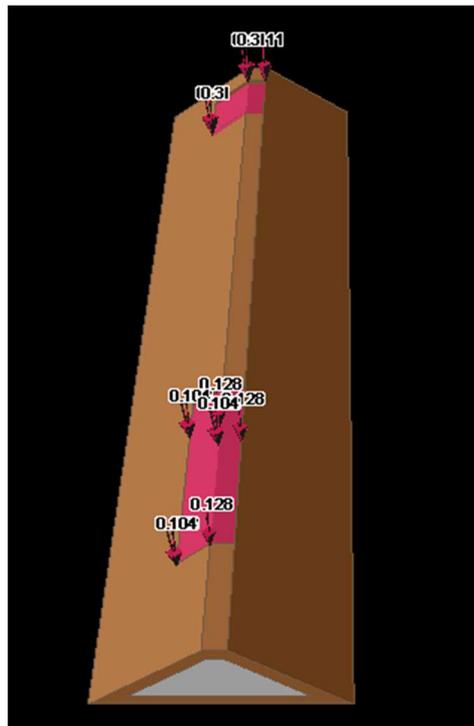


Figura 5-51 Scenario del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto verticale

Il fattore di sicurezza globale del rilevato con un blocco impattante avente volumetria pari a 8 m^3 ed un angolo di impatto verticale è uguale a **1.26**, valore minore rispetto al $FS=1.33$ ricavato al paragrafo 5.4. Si registra inoltre uno spostamento massimo pari a **1.4 cm**, in prossimità del blocco piantato sul rilevato avente volumetria pari a 504 m^3 . (Figura 5-52).



Figura 5-52 Fattore di sicurezza dell'opera e spostamento in condizioni del blocco di 8 m^3 ed angolo di impatto verticale.

Ciò giustifica la concentrazione delle massime deformazioni a taglio in prossimità del blocco con volume pari a 504 m^3 (Figura 5-43).



Figura 5-53 Max Shear strain condizioni del blocco di 8 m³ ed angolo di impatto verticale

5.6 Considerazioni sulla modellazione e verifiche del rilevato paramassi

Gli scenari rappresentati nei paragrafi precedenti mostrano una buona stabilità del rilevato in presenza dei due blocchi piantati sulla testa di esso. Infatti, il fattore di sicurezza nella condizione rappresentata nel paragrafo 5.4 è pari a 1.33. Tuttavia, l'impatto di ulteriori blocchi con una volumetria di 2.4 m³ e 8 m³ diminuisce il fattore di sicurezza dell'opera creando delle zone critiche (zone di massima deformazione a taglio) concentrate in prossimità della zona in cui è presente il blocco di 504 m³:

- Nello scenario che prevede l'impatto del blocco di una volumetria pari a 2.4 m³ contro i massi già presenti sul rilevato, si evidenziano delle riduzioni del fattore di sicurezza. In particolare, qualora l'angolo di collisione fosse orizzontale il fattore di sicurezza avrebbe valori pari a 1.26. Negli altri scenari invece il fattore di sicurezza raggiunge dei valori di 1.29, 1.3 ed 1.3 rispettivamente per angoli di collisione pari a 13°, 24° ed angolo di impatto verticale.
- Invece, per lo scenario relativo all'impatto di un blocco avente volume pari a 8 m³ (con una forza pseudo-statica superiore rispetto al blocco con volume di

2.4 m³) vengono evidenziate delle condizioni di instabilità quando l'angolo di impatto è orizzontale. Il fattore di sicurezza, infatti, si riduce ad un valore pari a 0.92, inferiore all'unità. Pertanto, l'opera risulta instabile essendo le forze agenti superiori a quelle resistenti. Con angoli di 13°, 24° ed impatto del blocco verticale, il rilevato paramassi risulta stabile.

6. INTERVENTO DI RIPROFILATURA DELLA SCARPATA

Nel capitolo 4 si è evidenziato, mediante l'analisi di propagazione, che la zona di deposito dei massi è molto ampia, tanto da superare l'intervento di difesa costruito a valle e depositarsi anche sulla strada al di sotto del pendio. Per questo motivo viene proposto un intervento di riprofilatura del pendio attraverso la costruzione di "terrazzamenti" aventi la stessa quota. In questo modo si creano delle zone molto ampie in cui si possono depositare i massi in caduta e viene diminuito anche il dislivello del pendio, principale causa delle alte velocità ed energie cinetiche. L'efficacia dell'intervento proposto viene valutata attraverso un'analisi di propagazione mediante l'utilizzo del Software precedentemente utilizzato RockyFor3D.

6.1 Creazione del modello su QGis

Utilizzando il modello adottato nel capitolo 4, si costruiscono, in ambiente Gis, delle zone a quota omogenea. Le quote di riferimento sono estrapolate dalla Planimetria e dalle sezioni rappresentate in *Figura 6-1* e *Figura 6-2*. In giallo sono rappresentate le zone di intervento e le rette bianche rappresentano le sezioni riportate in *Figura 6-2*. Dalle sezioni e dalla planimetria si ricavano:

- Le zone a quota omogenea lungo il pendio;
- L'estensione dei terrazzamenti che seguiranno l'andamento dei poligoni in giallo in *Figura 6-1*;

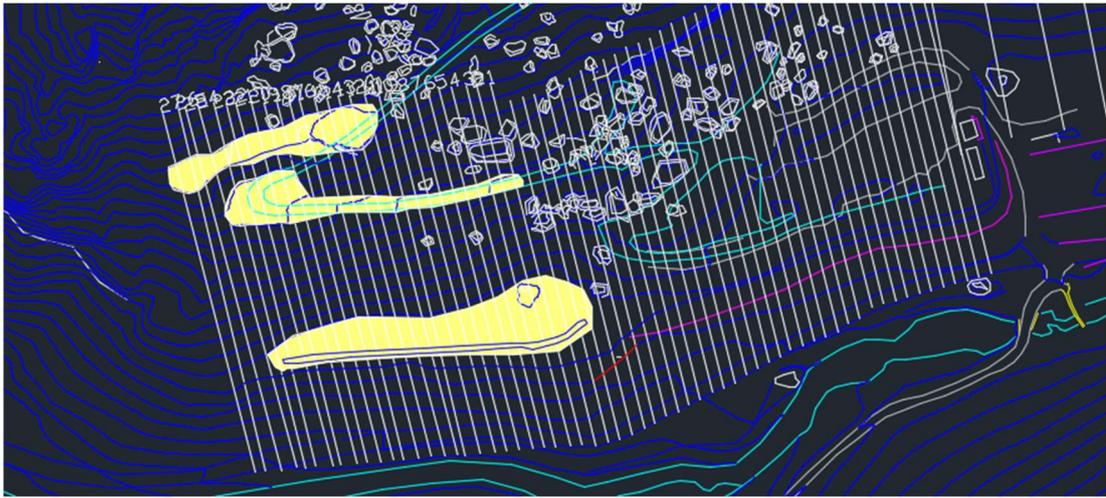


Figura 6-1 Planimetria del versante (cortesia dott. Cavagnino)

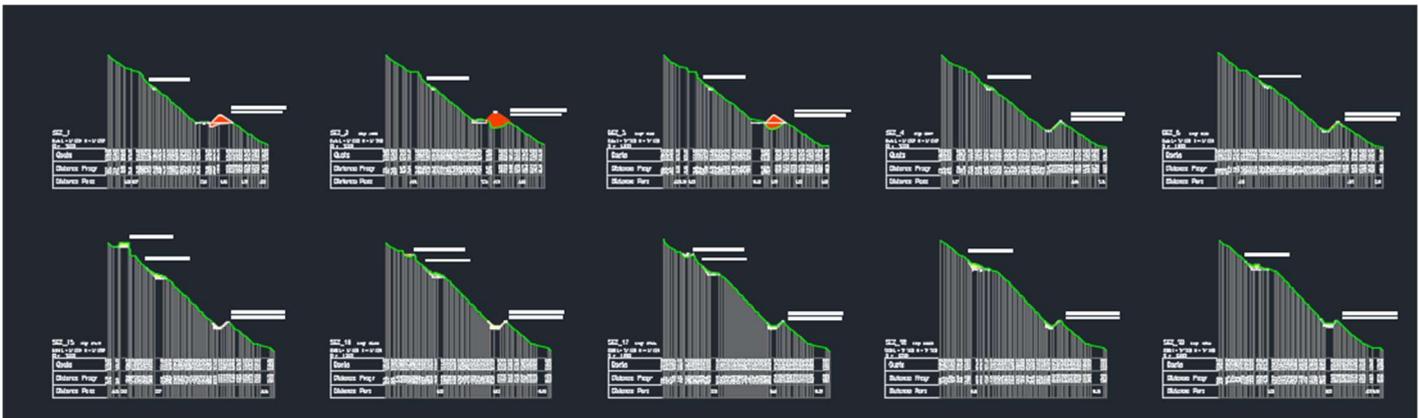


Figura 6-2 Sezioni del versante (cortesia dott. Cavagnino)

Avendo individuato le zone a quota omogenea, esse sono riportate in ambiente Gis mediante la creazione di vettori poligonali(.shp). I terrazzamenti creati sono situati in tre zone diverse del pendio (Figura 6-3):

- A ridosso del rilevato paramassi (in azzurro nella Figura 6-3 è costruito un terrazzamento a quota di circa 1316 m s.l.m. La quota del rilevato è inclusa nel DTM caricato in ambiente Gis, pertanto essa non sarà modificata.
- Un terrazzamento situato a metà del pendio con quote variabili tra i 1354 m s.l.m., 1361 m s.l.m, 1369 m s.l.m e 1371 m s.l.m (elemento in verde, grigio, marrone e rosso)

- Un ultimo terrazzamento situato in prossimità delle celle sorgenti in testa al pendio con delle quote variabili tra i 1383 m s.l.m. e 1386 m s.l.m (poligono giallo e rosa).



Figura 6-3 Modello con aree di intervento a quota omogenea a quota omogenea in ambiente Gis

Alle aree a quota omogenea sono stati assegnati i seguenti coefficienti di scabrezza (Descritti nei capitoli 3 e 4):

- Rg70:0
- Rg20:0
- Rg10:0
- Soiltype: 3

I seguenti parametri indicano delle zone con scabrezza nulla (terreno battuto e costipato) ed una tipologia di terreno capace di assorbire una buona parte dell'energia dovuta all'impatto. Questo simula uno strato di terreno fine compattato che coprirà i terrazzamenti al fine di dissipare l'energia dei massi in caduta nell'area.

Successivamente, seguendo la medesima procedura descritta nel capitolo 3, si convertono le colonne della tabella degli attributi del modello in file raster che saranno successivamente caricate su RockyFor3D per l'analisi di propagazione.

6.2 Analisi di propagazione su RockyFor3D e commenti sui risultati finali

La valutazione dell'efficacia dell'intervento è valutata attraverso una delle mappe di output fornite dal software RockyFor3D che rappresenta il numero di depositi dei blocchi, e quindi l'area di invasione dei massi crollati. Il volume rappresentativo è il medesimo utilizzato nel capitolo 3, con una forma rettangolare e valore pari a 2.4 m³.

Come si può notare dal confronto delle *Figure 6-4 e 6-5*, riportanti i risultati traiettografici nelle condizioni senza e con intervento rispettivamente, l'area di invasione dei blocchi in caduta è diminuita drasticamente rispetto allo scenario senza intervento di riprofilatura. In *Figura 6-4*, infatti, si può notare come alcuni blocchi vadano oltre l'infrastruttura stradale. Mentre in *Figura 6-5*, l'accumulo dei blocchi si concentra sopra l'opera di difesa.



Figura 6-4 Zona di deposito dei blocchi senza l'intervento di risistemazione del pendio.



Figura 6-5 Zona di deposito dei blocchi con l'intervento di risistemazione del pendio

Dai risultati dell'analisi di propagazione si evidenziano anche delle modeste riduzioni delle energie cinetiche e delle velocità come mostrato in *Figure 6-6 e 6-7*. Infatti, si può notare che in prossimità del rilevato paramassi l'energia cinetica raggiunge dei valori di 1400 kJ, a differenza dello scenario senza intervento in cui i valori erano di circa 2000 kJ. Inoltre, i valori di energia cinetica lungo tutto il pendio sono ridotti. A ridosso dello "strapiombo" (zona in cui è presente un elevato dislivello) si ricavano dei valori pari a 5000 kJ, più bassi rispetto allo scenario senza intervento in cui si annotavano dei valori di circa 6000 kJ



Figura 6-6 Valori delle velocità raggiunte dai blocchi lungo il versante.

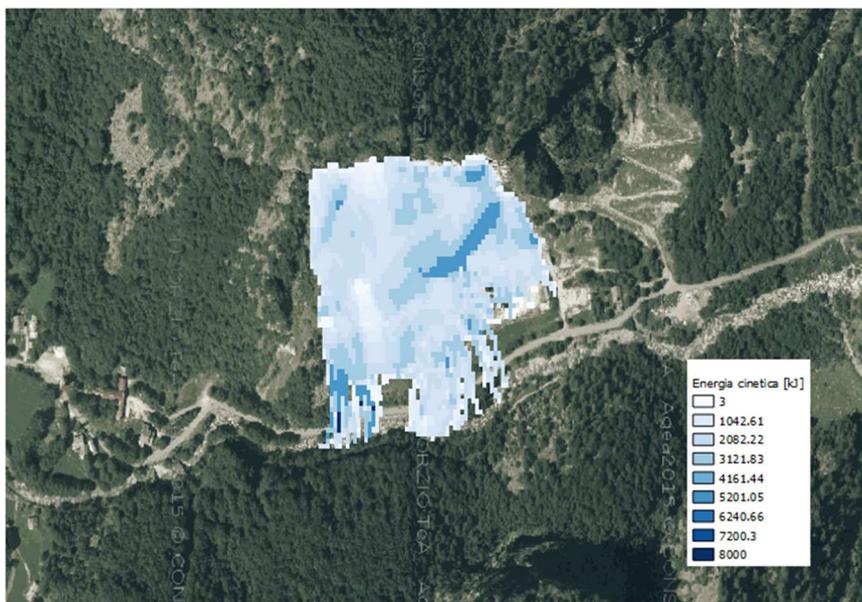


Figura 6-7 Valori dell'energia cinetica dei blocchi lungo il versante.

A questo punto è necessario valutare la condizione di stabilità del rilevato a seguito dell'intervento di riprofilatura nello scenario che prevede l'impatto di un ulteriore blocco con volume pari a 8 m^3 con traiettoria orizzontale, condizione in cui il coefficiente di sicurezza globale è risultato minore dell'unità.

Le velocità dei blocchi in prossimità del rilevato a seguito dell'intervento di riprofilatura sono pari a 18 m/s , a differenza dei 27 m/s ricavati nello scenario in

assenza di intervento quindi, le forze pseudo-statiche da applicare al rilevato saranno inferiori. In *Tabella 6-1* sono rappresentati i valori utilizzati per la stabilità del rilevato in seguito all'intervento di riprofilatura del pendio.

Impatto dei blocchi		
Scenario Impatto del blocco con volume 8 m^3		
v	18 m/s	
V	8 m^3	
m	20000 [kg]	
F	4458,022 [kN]	

Tabella 6-1 Valori utilizzati per la stabilità del rilevato con un blocco avente una volumetria pari a 8 m^3 , a seguito dell'intervento di riprofilatura

Sul modello agiscono quindi i pesi dei due blocchi conficcati in testa ed in un secondo momento (stage 2) sono state applicate delle pressioni in direzione orizzontale il cui modulo è dato dal rapporto tra le forze pseudo-statiche rappresentate in *Tabella 6-1* e la superficie di impronta sulle quali agiscono. In *Figura 6-8* raffigura:

- Una pressione di 0.06 MPa in corrispondenza del blocco con volume di 1006.5 m^3
- Una pressione di 0.17 MPa in corrispondenza del blocco con volume di 504 m^3

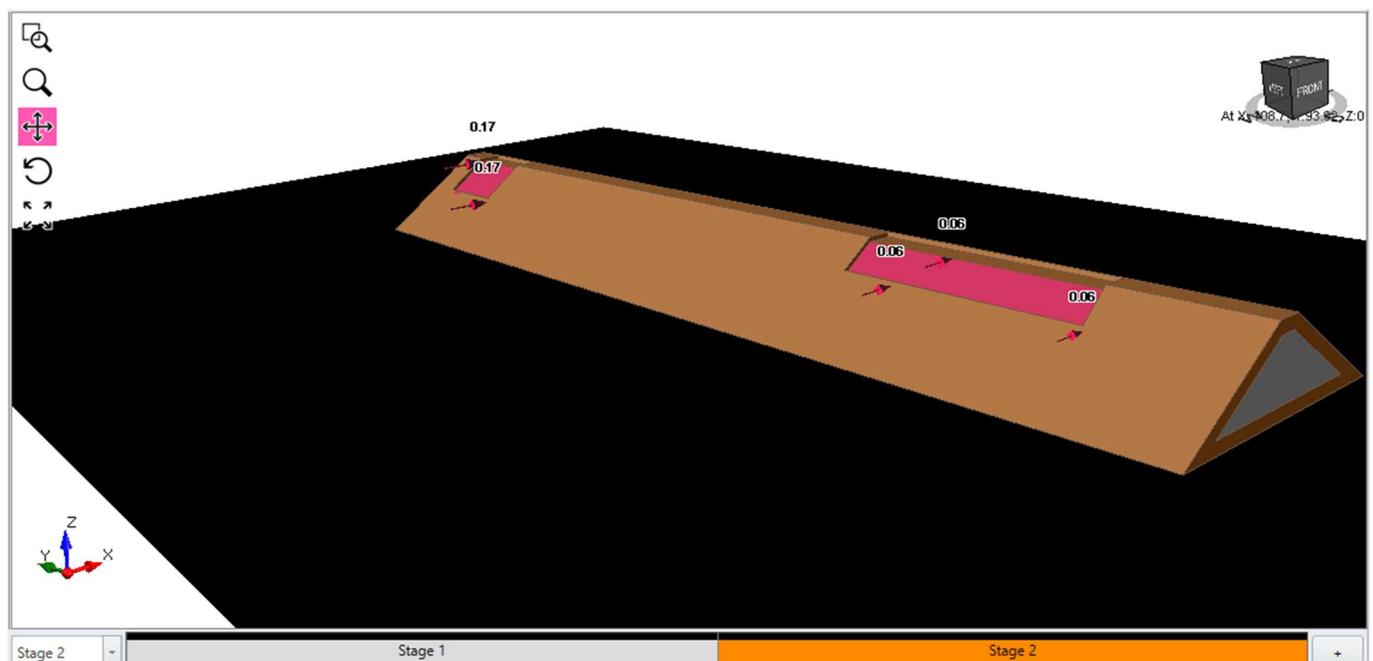


Figura 6-8 Carichi in direzioni orizzontali dovuti all'impatto di un blocco avente volumetria pari a 8 m^3 a seguito dell'intervento di riprofilatura

7. CONCLUSIONI

Il presente elaborato di tesi ha analizzato la stabilità di un sito in Valsesia, adiacente ad una cava di estrazione inattiva, ove fenomeni di crollo passati hanno messo a rischio l'infrastruttura stradale al piede del versante, causando la chiusura della stessa. In particolare, si è proceduto a: costruire un modello di propagazione 3D che consenta di analizzare scenari futuri; valutare le condizioni di stabilità di un'opera di difesa esistente (rilevato paramassi in pietrame e terreno compattato) nelle condizioni attuali e a seguito di ulteriori fenomeni di crollo, mediante simulazione numerica 3D agli elementi finiti; valutare l'efficacia di un intervento di risistemazione del versante che prevede riprofilatura.

La costruzione del modello di propagazione si è basata sulla riproduzione degli eventi franosi avvenuti dal 2016 in poi. È stato infatti necessario tarare i parametri di ingresso nel modello essendo questi ultimi e legati al carattere aleatorio del fenomeno e ad un livello di incertezza dovuto alla condizione mutevole del sito. A tale scopo sono stati utilizzati due programmi: QGis e Rockyfor3D. Mediante l'accoppiata dei due software è stato possibile effettuare una back-analysis in cui le zone di deposito dei blocchi e quindi le aree di invasione ottenute sono state confrontate con le foto ottenute da LiDar o foto aeree con drone. Il modello così validato ha fornito anche i valori di velocità ed altezze di rimbalzo dei blocchi in caduta, che sono stati utilizzati successivamente per la valutazione della sicurezza del rilevato paramassi. I risultati ottenuti consentono di osservare che:

- L'area di invasione ricavata dall'analisi di propagazione risulta molto simile alla condizione reale in sito. Occorre rilevare che, la nicchia di distacco è un dato di input molto incerto a causa dell'aleatorietà del fenomeno, pertanto si è optato per una nicchia di distacco molto estesa. L'area di invasione dell'analisi di propagazione risulta, seppur di poco, più estesa rispetto alla reale condizione in sito: ciò risulta accettabile in quanto a favore di sicurezza.
- Le velocità, altezze di rimbalzo ed energie cinetiche hanno dei valori più ampi rispetto a quelli ricavati nei consueti fenomeni di crollo. Ciò è dovuto agli imponenti dislivelli presenti lungo lo sviluppo del pendio (in alcune punti i dislivelli raggiungono gli 80 metri circa).

Mediante i risultati dell'analisi di propagazione si è valutato il livello di sicurezza del rilevato paramassi esistente a valle del pendio, conducendo un'analisi numerica agli elementi finiti tridimensionale. Poiché non è stato possibile condurre delle prove in sito o in laboratorio per valutare le principali proprietà meccaniche dei materiali che costituiscono il rilevato, è stato, necessario tarare i parametri di resistenza mediante una back-analysis. Dalle foto di ripresa aerea con drone e dai file in formato .dxf che contengono le curve di livello e planimetrie della zona di interesse, è stato possibile ricavare gli spostamenti del rilevato a seguito dell'impatto di due grandi blocchi che si sono piantati sulla testa del rilevato, asportando in parte una porzione di essa. Tali spostamenti sono stati considerati al fine di tarare il modello numerico.

Essendo gli spostamenti indotti dai massi arrestati in testa al rilevato pari a circa 3 metri, è stato necessario valutare la stabilità dell'opera nella condizione attuale, ovvero con i due grandi blocchi piantati sulla testa dell'opera, che sono stati modellati come carichi gravitativi uniformemente distribuiti. Applicando la tecnica "Shear Strength Reduction", con il programma FEM RS3 (Rocscience) si è ricavato un valore del coefficiente di sicurezza globale pari a 1.33 che testimonia la stabilità dell'opera nelle condizioni attuali in sito.

Successivamente il modello è stato usato per prevedere il comportamento dell'opera a seguito di ulteriori impatti sui due blocchi già presenti. Per questo motivo sono stati ricostruiti diversi scenari in cui è stato variato l'angolo di impatto e il volume dei massi impattanti. Con un volume di 8 m^3 ed una direzione della forza pseudo-statica orizzontale è stato ricavato un coefficiente di sicurezza inferiore all'unità, pari a 0.92. In questo scenario l'opera risulta instabile.

Infine, è stata valutata l'efficacia di un intervento di risistemazione del versante che prevede la costruzione di zone a quota omogenea ("terrazzamenti") favorendo il deposito dei materiali lapidei al di fuori della zona in cui si sviluppa l'infrastruttura stradale, ovvero a valle del rilevato paramassi.

In ambiente GIS e su Rockyfor3D sono state costruite delle zone a quota omogenea ed è stata effettuata un'analisi di propagazione attraverso la quale è stata valutata

l'area di invasione dei blocchi post-intervento. La riprofilatura del versante risulta efficace in quanto l'area di deposito è ben lontana dal rilevato paramassi e dalla strada (Figura 7-1). L'intervento consente inoltre di ridurre le energie cinetiche in gioco nell'area di invasione, consentendo di far rientrare anche lo scenario di possibile instabilità del rilevato impattato da nuovi crolli da 8 m^3 con traiettoria orizzontale.



Figura 7-1 Zona di deposito dei blocchi con l'intervento di risistemazione del pendio (rappresentate le zone a quota omogenea)

Bibliografia

ARPA PIEMONTE (2006), Appunti sulla geologia del Piemonte, Uno sguardo sul territorio. Arpa Piemonte, Dipartimento Tematico di Geologia e Dissesto

Barbero M. (2018), “Opere di difesa da caduta massi”. Materiali fornito nell’anno accademico 2018/2019 nel Corso di Meccanica delle Rocce. Politecnico di Torino.

Barbero M. (2018), “Analisi di stabilità di versante”. Materiali fornito nell’anno accademico 2018/2019 Corso di Meccanica delle Rocce. Politecnico di Torino.

Barbero M. (2018), “Opere di difesa da caduta massi”. Materiali fornito nell’anno accademico 2018/2019 nel Corso di Analysis and design of geotechnical structures and earthworks”. Politecnico di Torino

Barbero M. (2018), “Suggerimenti per il dimensionamento di tiranti di ancoraggio”. Materiali fornito nell’anno accademico 2017/2018 nel Corso di Meccanica delle Rocce. Politecnico di Torino.

Barton, NR 2008, 'Shear Strength of Rockfill, Interfaces and Rock Joints, and their Points of Contact in Rock Dump Design', in AB Fourie (ed.), Proceedings of the First International Seminar on the Management of Rock Dumps, Stockpiles and Heap Leach Pads, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 3-17

Barton, N., & Kjaernsli, B. (1981). Shear strength of rockfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 107(ASCE 16374). vol.107 p.873-891, <http://ojps.aip.org/gto>

Bourrier, F., Dorren, L., Nicot, F., Berger, F., & Darve, F. (2009). Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model. *Geomorphology*, 110(3-4), 68-79.

Dorren, L. K. (2015). Rockyfor3D (v5. 2) revealed—transparent description of the complete 3D rockfall model. EcorisQ paper (www.ecorisq.org).

Lambert, S., & Kister, B. (2017). Analysis of Existing Rockfall Embankments of Switzerland (AERES); Part A: State of Knowledge. Federal Office for the Environment, Bern, 55.

Netti, T., Castelli, M., & De Biagi, V. (2016). Effect of the Number of Simulations on the Accuracy of a Rockfall Analysis. *Procedia Engineering*, 158, 464-469.

Peila, D., Oggeri, C., & Castiglia, C. (2007). Ground reinforced embankments for rockfall protection: design and evaluation of full scale tests. *Landslides*, 4(3), 255-265.

Rayudu, D. N. (1997). Computer simulation of rockfalls-application to rockfalls at Fox Glacier, West Coast, New Zealand (Doctoral dissertation, Lincoln University).

Swift, Gareth and Jones, Russell, "The Design and Construction of a Reinforced Embankment on Soft Compressible Soil" (2008). International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering 46
<https://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session07/46>.

Plassiard, J. P., & Donzé, F. V. (2009). Rockfall impact parameters on embankments: A discrete element method analysis. *Structural Engineering International*, 19(3), 333-341.

Ronco, C., Oggeri, C. and Peila, D., 2009. Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection. *Natural Hazards and earth system sciences*, 9(4), p.1189.

Scavia C. (2015), "Stabilità dei versanti". Materiale fornito nel Corso di Meccanica delle Rocce 2017/2018. Politecnico di Torino.

Spang, R. M., & Krauter, E. (2001). Rock fall simulation-a state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriers. In *International Conference on landslides-Causes, impacts and countermeasures* (pp. 607-613).

Sakai, T., & Nakano, M. (2015). Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the soil skeleton structure. *Soils and Foundations*, 55(5), 1069-1085.

Shrestha, S., Baral, P., Bergado, D., Chai, J. & Hino, T. (2014). Numerical simulations using FEM 2D compared to FEM 3D and observed behaviour of reinforced full scale embankment. *Proceedings of the 9th International Symposium on Lowland Technology* (pp. 85-92). Japan: Saga University.

Victoria Ylenia Scappatura. Analisi traiettografica 3D di un fenomeno di caduta massi nel Comune di Perrero (TO) e proposta di un intervento di difesa. = 3D trajectory analysis of a rockfall event in the Municipality of Perrero (TO) and a defence intervention proposal. Rel. Claudio Scavia, Monica Barbero, Marta Castelli. Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile, 2018

Zhou, W. H., Lao, J. Y., Huang, Y., & Chen, R. (2016). Three-dimensional finite element modelling of soil arching in pile-supported geogrid-reinforced embankments. *Procedia engineering*, 143(1), 607-614.

SITOGRAFIA

www.arpa.piemonte.it

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.qgis.org

www.regione.piemonte.it

www.roscience.com