

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale



**Monitoraggio e modellazione numerica del
fenomeno di caduta massi: il caso studio di
Antey-Saint-André**

Relatori:

Barla Marco

Antolini Francesco

Thuegaz Patrick

Candidato:

Camilla Mattioli

Anno Accademico 2017/ 2018

SOMMARIO

CAPITOLO 1	INTRODUZIONE.....	1
1.1.	Struttura dei capitoli	2
CAPITOLO 2	CLASSIFICAZIONE E MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI FRANOSI	4
2.1.	Aspetti generali.....	4
2.2.	Classificazione dei fenomeni franosi	5
2.3.	Caduta massi.....	6
2.3.1.	Analisi della dinamica del fenomeno	9
2.4.	Monitoraggio dei movimenti franosi.....	14
2.4.1.	Strumenti di monitoraggio	16
CAPITOLO 3	METODI PER LA MODELLAZIONE NUMERICA DEI FENOMENI DI	
CADUTA MASSI		23
3.1.	Metodi di analisi della dinamica.....	24
3.1.1.	Analisi del fenomeno mediante approccio Lumped mass	26
3.1.2.	Analisi del fenomeno mediante blocchi rigidi	27
3.2.	Modelli numerici agli Elementi Distinti (DEM)	28
3.2.1.	Finite Discrete Element Method (FDEM)	31
CAPITOLO 4	IL SITO DI ANTEY-SAINT-ANDRÉ.....	36
4.1.	Descrizione del sito in esame e inquadramento geologico	36
4.2.	Disgaggio controllato del masso.....	41
4.3.	Analisi e ricostruzione delle traiettorie di caduta.....	49
CAPITOLO 5	SIMULAZIONE DELLA CADUTA MASSI CON ROCFALL E ROCKYFOR3D	58
5.1.	Analisi del fenomeno mediante il metodo Lumped mass	58
5.1.1.	Analisi delle traiettorie	61
5.1.2.	Vantaggi e limitazioni del metodo Lumped mass	71
5.2.	Simulazione del fenomeno con Rockyfor3D.....	72
5.2.1.	Dati di input del modello.....	73
5.2.2.	Dati di output del modello	80
5.3.	Confronto dei risultati ottenuti	84

CAPITOLO 6	SIMULAZIONE DELLA CADUTA MASSI CON PFC2D 5.0	86
6.1.	Descrizione del software utilizzato	87
6.1.1.	Applicazione del software al caso studio	88
6.2.	Calibrazione dei micro parametri dell'ammasso roccioso	93
6.2.1.	Realizzazione del provino sintetico e prova di compressione monoassiale	93
6.2.1.	Calibrazione dei microparametri del pendio mediante back analysis	99
6.3.	Analisi dei risultati ottenuti	112
CAPITOLO 7	CONCLUSIONI	117
BIBLIOGRAFIA		124
ALLEGATO A		128
ALLEGATO B		130
ALLEGATO C		132

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2.1- SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE DI VARNES (1978).....	5
FIGURA 2.2- AREE PRINCIPALI DEL CORPO DI FRANA.....	8
FIGURA 2.3- SCHEMATIZZAZIONE DEI MOVIMENTI PRINCIPALI.....	9
FIGURA 2.4- TRAIETTORIE RICOSTRUITE E CALCOLATE DI UN BLOCCO PRODOTTO DAL CROLLO LITOIDE DI MONTAGNY (ASTÈ ET AL.,1984).....	9
FIGURA 2.5- SCHEMATIZZAZIONE TRAIETTORIE AEREE.....	10
FIGURA 2.6- SLIDING ROCK BLOCK MODEL (PARISEAU E VOIGHT, 1979).....	11
FIGURA 2.7- SCHEMA DI UN ESTENSIMETRO A BARRA, PER IL CONTROLLO DEL VETTORE SPOSTAMENTO.	16
FIGURA 2.8- SCHEMA DI UN ESTENSIMETRO A FILO, PER IL CONTROLLO DELLA COMPONENTE DI SPOSTAMENTO LINEARE.	17
FIGURA 2.9- SCHEMA DI UN DISTOMETRO A NASTRO INVAR, PER IL CONTROLLO MANUALE DELLA COMPONENTE DI SPOSTAMENTO LINEARE.	17
FIGURA 2.10- ESEMPIO DI FESSURIMETRO ELETTRICO E MODALITÀ DI POSIZIONAMENTO.	18
FIGURA 2.11- ESEMPIO DI STAZIONE TOTALE.	19
FIGURA 2.12- SCHEMATIZZAZIONE RETE TOPOGRAFICA.....	19
FIGURA 2.13- RADIO DETECTION AND RANGING.	20
FIGURA 2.14- SCHEMATIZZAZIONE DI UN INTERFEROMETRO TERRESTRE PER L'ACQUISIZIONE DI IMMAGINI SAR.	21
FIGURA 3.1- SCHEMATIZZAZIONE DEL CONTATTO TRA DUE BLOCCHI.....	30
FIGURA 3.2- (A) MODELLO DI UNA FRATTURA PER TRAZIONE IN UN MATERIALE ROCCIOSO ETEROGENEO (LABUZ ET AL. 1987). (B) MODELLO DELLA FRACTURE PROCESS ZONE (FPZ) DI HILLERBORG (HILLERBORG ET AL. 1976).	32
FIGURA 3.3- PROVA DI CARICO SU UNA BARRA CON FRATTURA INIZIALE (SENB; MALVAR & WARREN, 1987).	33
FIGURA 3.4- RAPPRESENTAZIONE DELLO SCENARIO DI TORGIOVANNETTO D'ASSISI.....	34
FIGURA 4.1- RAPPRESENTAZIONE DEL SITO DESCRITTO (GOOGLE EARTH).....	37
FIGURA 4.2- FOTO AEREA DEL MASSO INSTABILE.	38
FIGURA 4.3- FOTO AEREA DEL MASSO INSTABILE.	38
FIGURA 4.4- INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO IN ESAME (REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA).	39
FIGURA 4.5- ESTRATTO DELLA CARTA DEI DISSESTI DELLA REGIONE VALLE D'AOSTA.	40
FIGURA 4.6- ESTRATTO DELLA CARTA AREE DI PERICOLOSITÀ DELLA REGIONE VALLE D'AOSTA.	40

FIGURA 4.7- CARTA GEOLOGICA REGIONE VALLE D’AOSTA.	41
FIGURA 4.8- MARTINETTO UTILIZZATO PER IL DISGAGGIO.	42
FIGURA 4.9- STAZIONE TOTALE UTILIZZATA.	44
FIGURA 4.10- POSIZIONAMENTO PRISMA.	44
FIGURA 4.11- DISTANZA MISURATA DALLA STAZIONE TOTALE DURANTE LA PROCEDURA DI DISGAGGIO.	45
FIGURA 4.12- DISTANZA MISURATA DALLA STAZIONE TOTALE IN FUNZIONE DEL TEMPO DURANTE LA FASE DI DISGAGGIO.	46
FIGURA 4.13- POSIZIONAMENTO ESTENSIMETRO.....	47
FIGURA 4.14- SPOSTAMENTI ASSOLUTI REGISTRATI DALL’ESTENSIMETRO DURANTE IL DISGAGGIO.	48
FIGURA 4.15- MISURA COMPENSATA CON LA TEMPERATURA.	48
FIGURA 4.16- MISURE COMPENSATE CON LA TEMPERATURA.....	49
FIGURA 4.17- POSIZIONE INIZIALE MASSO MEDIANTE ORTOFOTO (GLOBAL MAPPER).....	52
FIGURA 4.18- POSIZIONI INIZIALE, INTERMEDIE E FINALI DEL MASSO NELLA TRAIETTORIA PRINCIPALE (GLOBAL MAPPER).....	53
FIGURA 4.19- SEZIONE DEL VERSANTE OTTENUTA CON GLOBAL MAPPER.....	53
FIGURA 4.20- CONFRONTO MODELLO 3D CON VERSANTE REALE.	54
FIGURA 4.21- PROFILO DI MASSIMA PENDENZA.	55
FIGURA 4.22- SCHEMATIZZAZIONE DELLE TRAIETTORIE DEI MASSI.	56
FIGURA 4.23- PROFILO TRAIETTORIA SECONDARIA.	57
FIGURA 5.1- PROFILO E TRAIETTORIE (ROCFALL).....	62
FIGURA 5.2- DISTRIBUZIONE DEI PUNTI DI ARRESTO LUNGO IL PENDIO.	63
FIGURA 5.3- ALTEZZA DI CADUTA DEI BLOCCHI LUNGO IL PENDIO.	64
FIGURA 5.4- ENERGIA CINETICA TOTALE LUNGO IL PENDIO.	65
FIGURA 5.5- VELOCITÀ TRASLAZIONALE LUNGO IL PENDIO.	65
FIGURA 5.6- PROFILO E TRAIETTORIE (ROCFALL).....	67
FIGURA 5.7- DISTRIBUZIONE DEI PUNTI DI ARRESTO LUNGO IL PENDIO.	68
FIGURA 5.8- ALTEZZA DI CADUTA DEI BLOCCHI LUNGO IL PENDIO.....	69
FIGURA 5.9- ENERGIA CINETICA TOTALE LUNGO IL PENDIO.	70
FIGURA 5.10- VELOCITÀ TRASLAZIONALE LUNGO IL PENDIO.	70
FIGURA 5.11- RAFFIGURAZIONE DELL’AREA DI LAVORO E DELLA NICCHIA DI DISTACCO.	76
FIGURA 5.12- RAPPRESENTAZIONE DEI POLIGONI DEL TERRENO IN BASE AL TIPO DI SUOLO (QGIS).....	77
FIGURA 5.13 - RAPPRESENTAZIONE DEI POLIGONI DEL TERRENO IN BASE ALLA DENSITÀ DEL MATERIALE (QGIS).	78

FIGURA 5.14- RAPPRESENTAZIONE DEI POLIGONI DEL TERRENO IN BASE ALLA VEGETAZIONE PRESENTE (QGIS).	79
FIGURA 5.15- TRAIETTORIE PERCORSE DAI BLOCCHI (QGIS).	81
FIGURA 5.16- RAPPRESENTAZIONE 3D DELLE TRAIETTORIE (GLOBAL MAPPER).	82
FIGURA 5.17- PUNTI DI ARRESTO DEI BLOCCHI (QGIS).	82
FIGURA 5.18- CONFRONTO DELLE TRAIETTORIE CON IL RISULTATO OTTENUTO TRASCURANDO LA VEGETAZIONE (QGIS).	83
FIGURA 6.1- COMPORTAMENTO E COMPONENTI REOLOGICHE DEL LINEAR PARALLEL BOND.	90
FIGURA 6.2- RAPPRESENTAZIONE DEL CONTATTO "FLAT-JOINT" E DEL MATERIALE "FLAT-JOINTED".	90
FIGURA 6.3- COMPORTAMENTO E COMPONENTI REOLOGICHE DEL MODELLO "FLAT-JOINT"	91
FIGURA 6.4- INVILUPPO DI ROTTURA SECONDO IL CRITERIO DI HOEK-BROWN.	94
FIGURA 6.5 RAPPRESENTAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL PROVINO IN PFC2D.	95
FIGURA 6.6- CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ.	96
FIGURA 6.7 – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DI RESISTENZA DEGLI ELEMENTI BOND.	97
FIGURA 6.8- FRATTURAZIONE DEL PROVINO A SEGUITO DELLA PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE.	98
FIGURA 6.9- FRATTURAZIONE DEL PROVINO A SEGUITO DELLA PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE	99
FIGURA 6.10- RISULTATO DELLA PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE.	99
FIGURA 6.11- SCHEMATIZZAZIONE DELLE SFERE COSTITUENTI IL MASSO (PFC2D 5.00).	100
FIGURA 6.12- RAPPRESENTAZIONE DELLA SEZIONE DELLA TRAIETTORIA PRINCIPALE (PFC2D 5.00).	101
FIGURA 6.13- POSIZIONE INIZIALE DEL MASSO E PUNTO DI APPLICAZIONE DELLA FORZA ESTERNA.	102
FIGURA 6.14- FASE DI SPINTA DEL MASSO.	103
FIGURA 6.15- FASE DI SPINTA DEL MASSO.	103
FIGURA 6.16- FASE DI SPINTA DEL MASSO.	104
FIGURA 6.17- FASE DI CADUTA LIBERA DEL MASSO.	105
FIGURA 6.18- (A) SIMULAZIONE DEL MASSO CON MODELLO PARTICLE BOND; (B) SIMULAZIONE DEL MASSO CON MODELLO FLAT-JOINT.	105
FIGURA 6.19- FASE INIZIALE DEL FENOMENO DI CADUTA LUNGO IL PENDIO.	108
FIGURA 6.20- PRIMO IMPATTO DEL MASSO CON IL PENDIO.	108
FIGURA 6.21- EVOLUZIONE DEL FENOMENO DI CADUTA LUNGO IL PENDIO.	109
FIGURA 6.22- FASE FINALE DEL FENOMENO DI CADUTA E PUNTI DI ARRESTO LUNGO IL PENDIO.	109
FIGURA 6.23- PRIMO TRATTO DI ARRESTO DEI BLOCCHI.	110
FIGURA 6.24- SECONDO TRATTO DI ARRESTO DEI BLOCCHI.	111
FIGURA 6.25- TRATTO FINALE DI ARRESTO DEI BLOCCHI.	111

FIGURA 6.26- TRAIETTORIA DELLA BALL NUMERO 16.....	113
FIGURA 6.27- TRAIETTORIA DELLA BALL NUMERO 31.....	113
FIGURA 6.28- TRAIETTORIA DELLA BALL NUMERO 6.....	114
FIGURA 6.29- ANDAMENTO DELLE VELOCITÀ REGISTRATE DURANTE LA SIMULAZIONE.....	115
FIGURA 6.30- ANDAMENTO DELL'ENERGIA CINETICA REGISTRATA DURANTE LA SIMULAZIONE.....	116
FIGURA 7.1- SEZIONE E TRAIETTORIE OTTENUTE MEDIANTE ROCFALL E PFC2D.	119
FIGURA 7.2- VELOCITÀ DEI BLOCCHI OTTENUTI MEDIANTE L'UTILIZZO DEL SOFTWARE ROCFALL.....	120
FIGURA 7.3- VELOCITÀ DEL BLOCCO OTTENUTA MEDIANTE L'UTILIZZO DEL SOFTWARE PFC2D 5.0.	121

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 4.1- POSIZIONE STRUMENTAZIONE.	43
TABELLA 4.2- COORDINATE DEI PUNTI NOTI	51
TABELLA 4.3- COORDINATE DEI PUNTI TRAIETTORIA PRINCIPALE.	55
TABELLA 4.4- COORDINATE DEI PUNTI TRAIETTORIA SECONDARIA.	56
TABELLA 5.1- PARAMETRI DEI MATERIALI SCELTI.	60
TABELLA 5.2- CONDIZIONI INIZIALI DEL BLOCCO LUNGO LA TRAIETTORIA PRINCIPALE.	61
TABELLA 5.3- NUMERO DI BLOCCHI ARRESTATI E CORRISPONDENTE POSIZIONE.	63
TABELLA 5.4- VALORI MASSIMI REGISTRATI LUNGO LA TRAIETTORIA PRINCIPALE.	64
TABELLA 5.5- CONDIZIONI INIZIALI DEL BLOCCO LUNGO LA TRAIETTORIA SECONDARIA.	66
TABELLA 5.6- NUMERO DI BLOCCHI ARRESTATI E CORRISPONDENTE POSIZIONE.	68
TABELLA 5.7- VALORI MASSIMI REGISTRATI LUNGO LA TRAIETTORIA SECONDARIA.	70
TABELLA 5.8- COORDINATE DELL'AREA DI LAVORO.	75
TABELLA 6.1-PARAMETRI CARATTERIZZANTI L'AMMASSO ROCCIOSO.	93
TABELLA 6.2- EQUAZIONI DEL TRATTO ELASTICO DELLA CURVA Σ -E AL VARIARE DEL MODULO EFFETTIVO E*	96
TABELLA 6.3- PARAMETRI UTILIZZATI PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL MASSO.....	100
TABELLA 6.4- PUNTI DI ARRESTO DEI BLOCCHI LUNGO LA TRAIETTORIA PRINCIPALE (ROCFALL).	106
TABELLA 6.5- MICROPARAMETRI DEI TRATTI OGGETTO DI CALIBRAZIONE.	107

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

La caduta massi è un fenomeno molto diffuso nelle regioni montuose e rappresenta una problematica di primaria importanza in quanto mette a rischio le infrastrutture e le attività presenti nel territorio. La necessità di mitigazione del rischio porta quindi ad un continuo monitoraggio dei versanti in roccia, ai fini di effettuare interventi di prevenzione, controllo e difesa delle aree potenzialmente instabili. Tali sistemi possono essere integrati con modelli numerici e probabilistici per uno studio più accurato del fenomeno in analisi, per effettuare ad esempio un procedimento di back analysis. Obiettivo della tesi è la modellazione numerica di un fenomeno realmente accaduto. L'utilizzo di più software, permette un confronto critico degli strumenti a nostra disposizione oltre che una descrizione delle realtà sotto punti di vista diversi.

Nel lavoro di tesi si analizza il sito di Antey-Saint-André in provincia di Aosta, situato nella bassa Valtournenche, valle laterale della Valle D'Aosta, in cui la presenza di un blocco instabile lungo il versante ha reso necessario un intervento di disaggio monitorato da opportuni strumenti.

L'elaborato si suddivide in tre parti: nella prima viene descritta la teoria necessaria per la comprensione delle analisi svolte, a cui segue una seconda parte in cui viene riportato in dettaglio il fenomeno del disaggio effettuato, riprodotto poi nell'ultima parte in quanto oggetto di modellazione numerica. Quest'ultima viene effettuata attraverso tre diversi software: Rockyfor 3D, RocFall e PFC2D. L'utilizzo del software Rockyfor 3D

richiede inoltre l'ausilio di QGIS per la creazione di immagini raster, rappresentanti i dati di input. La discretizzazione del profilo del versante da introdurre in RocFall e PFC2D è stata effettuata utilizzando il software Global Mapper.

Obiettivo della tesi è quindi quello di andare a riprodurre il comportamento del masso a seguito del disgreggio effettuato, confrontando i risultati ottenuti dai diversi modelli adottati con la risposta degli strumenti di monitoraggio posti in sito al momento del disgreggio. Ai fini di un confronto corretto si andranno inoltre ad evidenziare i vantaggi e le limitazioni di ogni tipo di modello adottato. A concludere il lavoro si riportano conclusioni ed osservazioni dedotte, indicando inoltre possibili sviluppi futuri.

1.1. Struttura dei capitoli

La tesi è strutturata in 7 capitoli. Oggetto del Capitolo 2 è una descrizione dei cinematismi possibili per le pareti instabili, con particolare attenzione alle pareti rocciose e ai crolli in roccia. L'analisi e la comprensione dei movimenti a cui sono soggette è fondamentale prima di procedere ad ogni tipo di intervento. Segue quindi la descrizione dei sistemi di monitoraggio e della strumentazione disponibile. Il corretto utilizzo di quest'ultima non solo è necessario per la conoscenza ed il controllo dei fenomeni di instabilità, ma anche per la loro previsione e per lo sviluppo di interventi di protezione efficaci. Nel Capitolo 2 sono descritti i metodi di analisi della dinamica di caduta massi, con particolare attenzione al metodo Lumped Mass e al Metodo agli Elementi Distinti, che saranno sviluppati nei capitoli successivi. Il Capitolo 3 è dedicato alla descrizione delle attività di disgreggio svolte nel comune di Antey-Saint-André. Nella prima parte viene effettuato un inquadramento territoriale del sito di interesse e una descrizione della geologia del territorio, con mappe rese disponibili dal sito della Regione Autonoma Valle D'Aosta a sostegno. Segue la descrizione dell'allestimento del cantiere, delle operazioni effettuate e degli strumenti utilizzati. Il capitolo si conclude con l'analisi dei risultati ottenuti, grazie ai quali è possibile procedere alla creazione dei modelli utilizzati successivamente. Nei capitoli finali vengono descritti i software utilizzati per le modellazioni, in particolare due modelli bidimensionale con RocFall e PFC2D 5.0 e un modello tridimensionale con Rockyfor3D. Il confronto dei risultati ottenuti permette di valutare i possibili fenomeni, la loro intensità e i possibili

parametri che caratterizzano il terreno del sito oggetto di studio. Inoltre nel Capitolo 6 viene effettuata la simulazione di una prova di compressione monoassiale, grazie alla quale è possibile ottenere dei parametri caratterizzanti il masso, necessari per la simulazione di caduta massi all'interno del software PFC2D 5.0. I risultati ottenuti vengono confrontati e commentati nel capitolo conclusivo.

CAPITOLO 2

CLASSIFICAZIONE E MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI FRANOSI

Introduzione

La comprensione dei cinematismi riguardanti l'instabilità di versanti è fondamentale ai fini dell'analisi del fenomeno di caduta massi oggetto del lavoro di tesi. Dopo un primo generale inquadramento sui possibili cinematismi che coinvolgono versanti instabili, l'attenzione verrà focalizzata sulle pareti rocciose e sull'analisi dei movimenti a cui sono soggette. Nella seconda parte del capitolo si affronta il tema del monitoraggio e il suo ruolo nella definizione di un modello geomeccanico, a cui segue la descrizione degli strumenti di monitoraggio, il cui utilizzo è necessario per la conoscenza ed il controllo dei fenomeni di instabilità.

2.1. Aspetti generali

Il movimento di versante, movimento franoso, o semplicemente frana, è il movimento di una massa di roccia, detrito o terra lungo un pendio. I movimenti franosi sono fenomeni complessi, molto spesso di difficile classificazione. Un sistema frequentemente utilizzato è quello proposto da Varnes nel 1978, il quale definisce questi movimenti come: fenomeni di massa coinvolgenti rocce, detriti o terre, attraverso i quali si manifesta tendenza, da parte di un corpo, al raggiungimento di un minimo di energia potenziale (Varnes D.J., 1978).

Allo sforzo gravitativo causa del distacco e del movimento, si oppongono le forze di attrito meccanico e la coesione. L'attrito è la resistenza che l'oggetto oppone alla gravità, mentre la coesione rappresenta le forze di legame tra gli elementi. La stabilità dell'elemento è quindi garantita dall'equilibrio di queste tre forze, quando la gravità prevale si ha il movimento. I fattori che possono intervenire a turbare questo equilibrio sono molteplici, variando l'attrito o la coesione o intervenendo sul peso del materiale. Il tipo, la velocità di movimento e il volume del materiale dipendono proprio da questi fattori. Per ogni superficie di rottura ipotetica è possibile definire quindi un coefficiente di sicurezza, dato dal rapporto tra sforzi agenti che provocano la deformazione e sforzi resistenti che si oppongono a questa. La condizione di equilibrio statico limite è identificata con il valore unitario del coefficiente.

2.2. Classificazione dei fenomeni franosi

Data la complessità del fenomeno esistono molteplici sistemi di classificazione che prendono in considerazione diversi aspetti. Una delle prime e più frequentemente utilizzata è la classificazione di Varnes (1978), riportata in Figura 2.1, nella quale hanno un ruolo primario il tipo di materiale e il tipo di movimento.

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	Earth flow (soil creep)
COMPLEX		Combination of two or more principal types of movement		

Figura 2.1- Sistema di classificazione di Varnes (1978).

I materiali considerati sono roccia (rock), terra (earth) e detrito (debris), in cui la terra è costituita da almeno l'80% di materiale a grana fine, mentre il detrito è costituito da una

percentuale di materiale a grana grossa compresa tra il 20% e l'80%. I movimenti sono stati suddivisi in 6 tipologie: crolli, ribaltamenti, scorrimenti, espansioni laterali, flussi e complessi.

- Crolli in roccia: Sono fenomeni in cui si verifica il distacco e la caduta di materiale o di blocchi da pendii molto ripidi. Il materiale discende in caduta libera finché non raggiunge il versante, a cui seguono rimbalzi e rotolamenti. Il materiale coinvolto è prevalentemente roccia.
- Ribaltamenti: Il cinematismo prevalente è la rotazione di un blocco attorno ad un punto o asse, che può evolvere in altre tipologie ed è spesso associato a crolli, scorrimenti e frammentazione delle masse coinvolte. Sono fenomeni tipici degli ammassi rocciosi.
- Scorrimenti: Il fenomeno prevede lo scivolamento di un volume di roccia o terreno lungo una o più superfici. Si distinguono gli scorrimenti di rotazione (rotational slide) da quelli di traslazione (translational slide).
- Espansioni laterali: Il movimento è prevalentemente orizzontale. Non si identifica né una superficie basale di scorrimento né una zona di deformazioni plastiche ben definita, ma solitamente si manifesta dove una massa rocciosa giace su materiali soffici.
- Colate: Sono fenomeni in cui le superfici di scorrimento interne alla massa in movimento sono molteplici e variabili. Le colate possono essere assimilate al movimento di un fluido viscoso e avvengono in ammassi rocciosi o terreni sciolti.
- Fenomeni complessi: Questi movimenti presentano caratteristiche di innesco ed evoluzione nel tempo e nello spazio non riconducibili ad una sola tipologia. Il fenomeno relativo avviene combinando due o più tipi di movimento in successione temporale.

2.3. Caduta massi

Con il termine “caduta massi” si indicano tutti quei fenomeni caratterizzati dal distacco di singoli blocchi isolati, di volume ridotto, da pareti rocciose. Nonostante la porzione

di materiale coinvolta sia molto limitata rispetto alle altre situazioni di rischio, come grandi frane o valanghe, sono tra i fenomeni più pericolosi in Italia. Questo è dovuto in particolar modo alla loro imprevedibilità. Le caratteristiche sono estremamente variabili soprattutto in termini di ricorrenza ed intensità, inoltre, essendo processi estremamente rapidi, si riscontrano difficoltà nel monitoraggio del fenomeno o nell'installazione di strumenti di allarme.

In un territorio montuoso e notevolmente antropizzato come quello italiano, i rischi sono notevoli, quindi nasce la necessità di valutare la diffusione spaziale e l'intensità della caduta massi.

Il problema è dovuto principalmente ad una perdita di equilibrio per influenze sia esterne che interne al pendio, comunque subordinate alla forza di gravità.

I fattori predisponenti principali sono:

- Morfologia del versante: pendenza, forma del rilievo ed esposizione;
- Scistosità: grado e piani di fatturazione, orientazione e localizzazione;
- Geologia: tipologie di rocce e dei depositi, variabilità della struttura geologica, substrato detritico, orientazione e distribuzione;
- Proprietà geomeccaniche delle rocce e del suolo: attrito, coesione, resistenza al taglio;
- Attività: riattivazioni di movimenti precedentemente avvenuti;
- Idrogeologia: effetti dovuti alla permeabilità del terreno come ad esempio l'espansione e la diminuzione della coesione;
- Clima: effetti dovuti a cicli di gelo e disgelo e all'escursione termica.

In particolar modo, di notevole importanza nelle pareti rocciose caratterizzate da un'elevata pendenza e scistosità è il passaggio gelo-disgelo (Grove, 1972; Porter e Orombelli, 1980-1981; Coutard e Francou, 1989; McCarrol et al., 1998, Matsuoka e Sakai, 1999). Il distacco dei blocchi rocciosi avviene anche in seguito a movimenti sismici e attività tettonica (Broili, 1974). Ulteriori elementi che provocano il distacco sono gli scalzamenti dei piedi del versante ad opera degli alvei fluviali e l'azione della vegetazione come la spinta meccanica delle radici e l'emissione di sostanze chimiche

acide in grado di disgregare le rocce, la presenza di animali e dell'uomo non rappresenta una causa scatenante di valore rilevante (Selby, 1982).

È possibile distinguere tre grandi aree in cui si manifesta il fenomeno, schematizzate nella Figura 2.2.

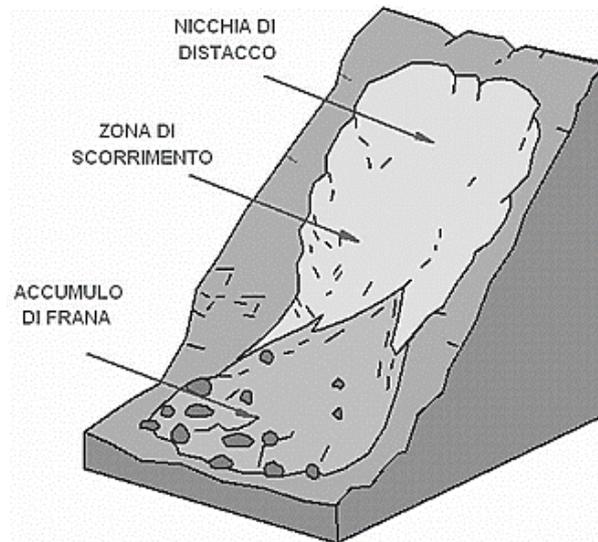


Figura 2.2- Aree principali del corpo di frana.

- zona di innesco, rappresentata dalla nicchia di distacco da cui partono i massi;
- zona di trasporto, localizzata tra la zona in cui ha origine la frana e la zona di deposito.
- zona di arresto, area in cui si deposita la maggiore quantità di materiale.

L'intero processo di distacco e arresto è il risultato di una rapida sequenza di fenomeni diversi: il blocco può precipitare quando si distacca da una parete sub-verticale oppure può muoversi a contatto con il pendio prima di raggiungere la condizione di caduta libera. Quindi in prima approssimazione, i tipi di moto possono essere limitati a quattro: scivolamento, rotolamento, rimbalzo e caduta libera (Figura 2.3).

Il fenomeno franoso consiste in un movimento contemporaneo di più elementi di roccia aventi forma, massa e velocità proprie, le quali possono subire modifiche durante il percorso a causa degli impatti che provocano frammentazioni. Le singole porzioni hanno comportamento dinamico sostanzialmente indipendente le une dalle altre. Alla fine del processo è possibile riconoscere le superfici lungo le quali è avvenuto il distacco e i depositi detritici.

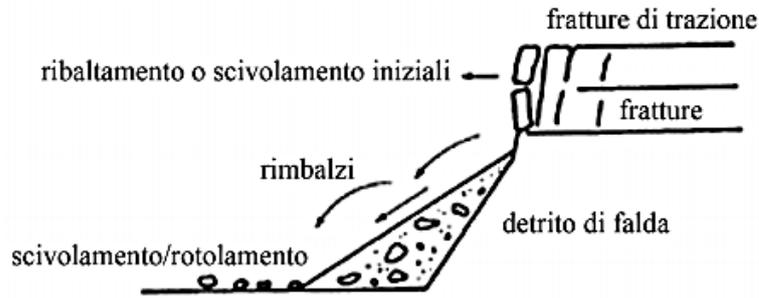


Figura 2.3- Schematizzazione dei movimenti principali.

2.3.1. Analisi della dinamica del fenomeno

Si procede ora con la descrizione delle varie fasi del moto successive alla fase di distacco del masso. In prima istanza si distinguono due fasi: la traiettoria aerea e l'interazione blocco-pendio. Quando il blocco si muove nell'aria, il cinematismo può essere di caduta a gittata o di caduta libera, mentre per i fenomeni di interazione è possibile distinguere scivolamento, rotolamento, impatto e frantumazione del blocco (Figura 2.4).

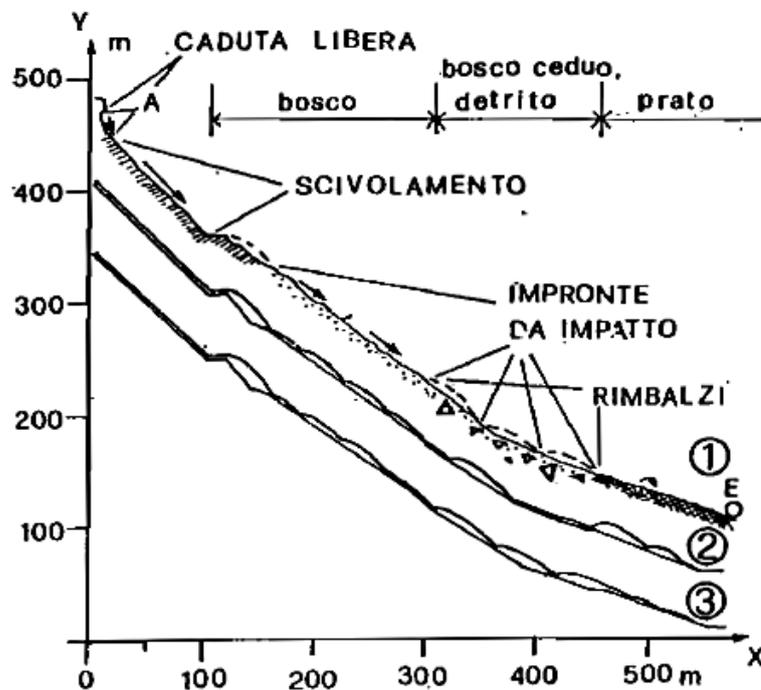


Figura 2.4- Traiettorie ricostruite e calcolate di un blocco prodotto dal crollo litoide di Montagny (Astè et al.,1984).

La *caduta a gittata* avviene quando sono presenti sollecitazioni che conferiscono al blocco una velocità iniziale non nulla. In questo caso il blocco segue una traiettoria parabolica e le componenti orizzontale e verticale della velocità sono entrambe diverse da zero (Figura 2.5). Date la posizione iniziale (x_0, y_0) e la velocità iniziale (v_{0x}, v_{0y}) , è possibile scrivere l'equazione al generico istante t :

$$x = v_{0x} \cdot t + x_0 \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_{0y} \cdot t + y_0 \quad (2)$$

essendo g l'accelerazione di gravità. 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:

$$\begin{cases} y = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{(x - x_0)^2}{v_{0x}^2} + v_{0y} \cdot \frac{x - x_0}{v_{0x}} + y_0 & (3) \\ \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & (4) \end{cases}$$

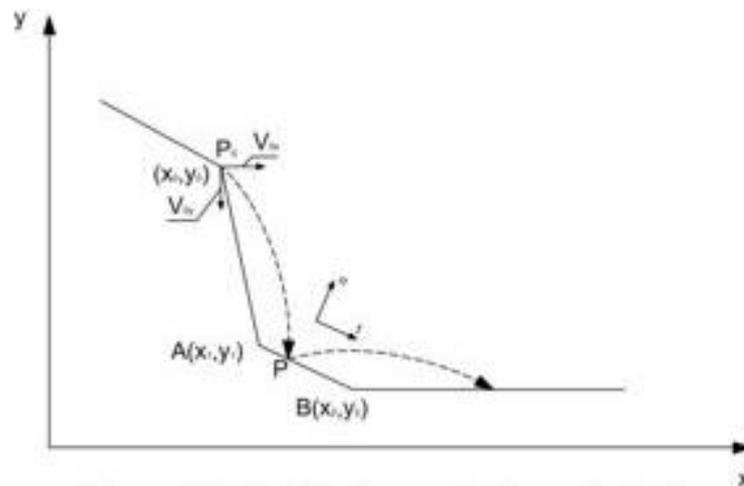


Figura 2.5- Schematizzazione traiettorie aeree.

La *caduta libera* può essere considerata equivalente ad una caduta a gittata per la quale la componente orizzontale della velocità iniziale è nulla e quindi il blocco è soggetto alla sola forza di gravità. In questo caso è possibile ipotizzare trascurabile la resistenza offerta dall'aria al moto, data la sua scarsa rilevanza. Le velocità raggiungibili dai massi in caduta tipicamente variano tra 20 m/s e 40 m/s. Questo tipo di moto si conclude con l'impatto della massa alla base della parete, sono comunque possibili impatti intermedi durante la caduta. L'impatto induce importanti fenomeni di scoppio e di disgregazione dei volumi rocciosi (Broili, 1973 e 1974), con conseguente riduzione degli elementi di volume e dissipazione dell'energia cinetica accumulata durante la fase di caduta.

Per quanto riguarda il moto a contatto con il pendio, i fattori che hanno una maggiore rilevanza e che vengono presi in considerazione per procedere allo studio del moto sono le caratteristiche del blocco in esame (peso, forma e geometria), topografia del pendio e natura e caratteristiche meccaniche dei materiali a contatto.

Lo *scivolamento* è caratterizzato da una velocità angolare del blocco nulla e velocità di traslazione dipendente dal coefficiente di attrito dinamico e dall'inclinazione del piano.

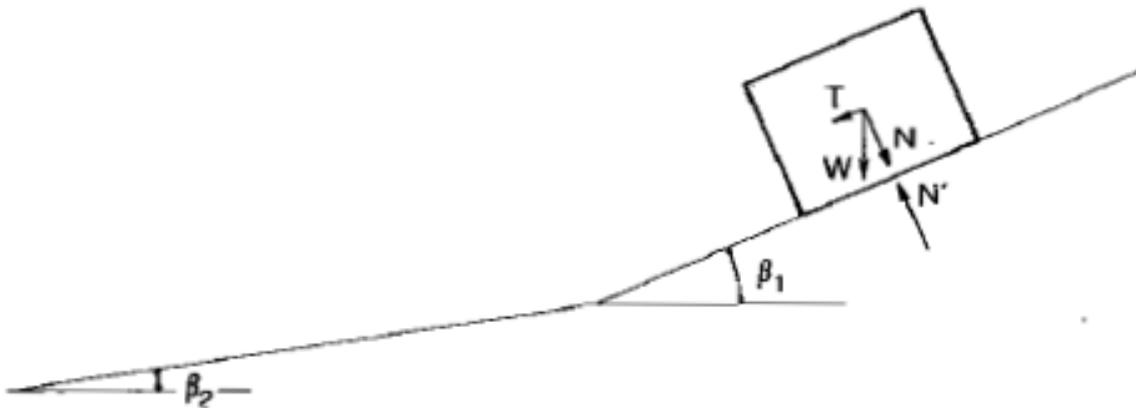


Figura 2.6- Sliding rock block model (Pariseau e Voight, 1979).

L'approccio geomeccanico più semplice corrisponde alla versione convenzionale dello sliding rock block model (Pariseau e Voight, 1979) (Figura 2.6). Secondo questo modello l'accelerazione del blocco che scivola sul piano inclinato è pari a:

$$a = g(\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{sl}) \quad (5)$$

in cui a è l'accelerazione tangenziale del blocco, g è l'accelerazione di gravità, δ_{sl} è l'angolo di attrito dinamico allo scivolamento e β è l'inclinazione del piano. Mentre le velocità tangenziali in funzione dei tempi e dei percorsi sono rispettivamente:

$$v = v_0 + g \cdot t \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{sl}) \quad (6)$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g \cdot s \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{sl})} \quad (7)$$

dove v è la velocità lineare al tempo t e alla distanza percorsa s e v_0 è la velocità iniziale. Da queste equazioni è possibile osservare che il moto è uniformemente accelerato con incrementi e decrementi di velocità quando rispettivamente si ha $\delta_{sl} < \beta$ e $\delta_{sl} > \beta$. Nel caso particolare in cui $\delta_{sl} = \beta$ il moto non è accelerato.

Il *rotolamento* è il tipo di moto predominante rispetto agli altri, il blocco inizia ad assumere una certa velocità angolare e allo stesso tempo si riduce la velocità di traslazione. Il modello utilizzato per ricavare la velocità v deriva dalla cinematica rotazionale del corpo rigido (Paiola, 1978; Bassato, Cocco e Silvano, 1985), ipotizzando il rotolamento di una sfera piena equivalente si ottiene:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{10}{7} g \cdot s \cdot (\tan \beta - \tan \delta_{sl}) \cdot \cos \beta} \quad (8)$$

Mentre, ipotizzando il rotolamento di un cilindro pieno equivalente, si ottiene:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{4}{3} g \cdot s \cdot (\tan \beta - \tan \delta_{sl}) \cdot \cos \beta} \quad (9)$$

Inoltre è possibile considerare anche una combinazione dei due moti precedentemente descritti: la *rototraslazione*. Per stabilire la velocità di cui è dotato il blocco che percorre un tratto rettilineo di pendio, tra le diverse formule su base empirica, si ritiene particolarmente significativa la formula di Hoek (1987):

$$v = \sqrt{(v_0^2 + 2 \cdot g \cdot s \cdot K)} \quad (10)$$

Dove v_0 è la velocità iniziale di discesa, s la distanza percorsa, g l'accelerazione di gravità e K è una costante la quale può essere approssimata considerando il seno dell'angolo rappresentante la pendenza del versante. Tale parametro, a rigore, non dipende solo dalla geometria del versante ma anche dall'angolo di attrito del materiale a contatto. La relazione di Hoek non prende in considerazione la dimensione e la forma propria del blocco, quindi è possibile usare questa formula, presupponendo che queste non influenzino il moto di rotolamento e scivolamento. Questa è una semplificazione accettabile, in quanto risulta difficile definire all'interno di una modellazione l'esatta forma del blocco, la quale, come precedentemente detto, può variare durante l'azione dinamica per effetto degli urti che causano la rottura oppure il semplice smussamento degli spigoli.

Il *rimbalzo* è la fase transitoria di impatto del blocco sul pendio. In questa fase le componenti di velocità sono influenzate dalla pendenza locale e dalle caratteristiche del materiale. Per descrivere questo tipo di moto è importante conoscere la velocità e la forma del blocco prima e dopo l'impatto e il coefficiente di restituzione R .

Il coefficiente R viene utilizzato per semplificare il problema dell'interazione tra due corpi in collisione, di per sé molto complicato, e per descrivere in modo completo l'azione dinamica di impatto e rimbalzo. Il calcolo viene effettuato considerando la variazione di velocità dovuta all'urto:

$$R = \frac{v'}{v} \quad (11)$$

Dove al numeratore è presente la velocità del blocco dopo il rimbalzo e al denominatore la velocità prima dell'impatto, espresse mediante le equazioni. Il coefficiente di restituzione R in pratica definisce la perdita di energia cinetica che avviene durante l'impatto con il pendio. Inoltre, ai fini pratici, è utile distinguere due coefficienti omologhi di restituzione, r_n e r_t , rispettivamente in direzione normale e tangenziale al piano di impatto. Per la scelta dei coefficienti è possibile fare riferimento a valori disponibili in letteratura a seconda dei materiali costituenti il sito in esame. Tuttavia, qualora sia possibile, la scelta migliore è quella di utilizzare una *back analysis*, cercando i valori che permettano di riprodurre fenomeni già avvenuti in passato.

Alla luce di ciò, la comprensione di un fenomeno così complesso come l'instabilità di un versante in roccia assume una grande importanza, non solo per l'elevata pericolosità associata al fenomeno, ma anche per le difficoltà legate alla corretta previsione del comportamento. È importante quindi prevedere e allo stesso tempo caratterizzare la porzione di versante potenzialmente instabile, creando un modello geomeccanico in cui confluiscono tutti gli elementi determinanti del fenomeno.

2.4. Monitoraggio dei movimenti franosi

Il punto di partenza nell'analisi dei fenomeni di instabilità consiste nell'individuazione dell'*area potenzialmente instabile*. Questo può essere realizzato individuando segni di dissesto, fratture nel terreno e nei manufatti, interruzioni di strade, mediante l'utilizzo di foto aeree e indagini SAR e infine mediante indagini storiche. Quindi un'ottima conoscenza del territorio risulta imprescindibile per affrontare il problema. All'area potenzialmente instabile si associa un volume mediante l'utilizzo di carte topografiche e di un Modello Digitale del Terreno (DTM). L'informazione inizialmente a disposizione è di superficie, cartografica digitalizzata (DM), discretizzata su una maglia regolare di punti nei quali risiede l'informazione. All'interno di questa maglia di nodi si individua l'area instabile, per conoscere la volumetria del problema occorre associare all'area una superficie di scivolamento o più in generale un *piano di instabilità*. Quest'ultima viene individuata mediante l'utilizzo di sondaggi e sistemi di monitoraggio degli spostamenti in profondità, a cui possono essere associate tecniche meno invasive come i metodi geofisici. Una volta definito il *volume instabile* si procede con lo studio degli spostamenti e quindi dell'evoluzione del *cinematismo*, sempre attraverso l'utilizzo di strumenti di monitoraggio di profondità e superficie e, nel caso di pendii in roccia, attraverso l'individuazione dei sistemi di discontinuità, qualora siano facilmente individuabili. Al cinematismo vengono associate le cause determinanti, già viste nel paragrafo 2.3. Per uno studio corretto della stabilità del versante occorre avere a disposizione quanti più dati possibile. Molte delle informazioni che risultano utili a tal fine, si possono ottenere mediante un'osservazione continua nel tempo del fenomeno di dissesto che vogliamo analizzare. Per raggiungere tale scopo occorre predisporre un sistema che permetta, per l'appunto, l'acquisizione di misure quali la profondità e la

forma della superficie del movimento franoso per valutarne il volume, la collocazione spazio-temporale di eventuali movimenti in atto, gli aspetti idrogeologici del sito ecc. Tale sistema è un cosiddetto sistema di monitoraggio. Per monitoraggio si intende l'osservazione diretta dell'evoluzione di una grandezza variabile nel tempo, quantificata in situ mediante opportuni strumenti di misura di vario tipo. Gli scopi del monitoraggio sono molteplici, ma si ne evidenziano soprattutto tre:

- prevenzione: la grandezza viene misurata nel tempo per prevedere l'evoluzione futura di un potenziale fenomeno non voluto poiché potrebbero verificarsi conseguenze catastrofiche;
- sorveglianza: si tratta di un sistema diretto di visualizzazione di alcune grandezze critiche o di segnalazione di eventi già avvenuti;
- verifica: la grandezza viene misurata con lo scopo di valutare l'efficacia di un intervento o di indagarne gli effetti.

In particolare, andando a vedere più nel dettaglio le funzionalità, grazie al monitoraggio è possibile:

- controllare l'evoluzione del fenomeno;
- determinare il meccanismo di innesco;
- definire i rapporti tra movimento e condizioni idrauliche;
- verificare l'efficacia degli interventi di stabilizzazione;
- supportare le decisioni in ambito di pianificazione;
- allertare le popolazioni esposte a rischio;
- prevedere l'evoluzione temporale del fenomeno franoso.

I principali aspetti da valutare riguardano:

- superfici e volumi coinvolti (magnitudo);
- meccanismo di rottura;
- istante di rottura;
- tipo di movimento;
- distanza di propagazione.

2.4.1. Strumenti di monitoraggio

Ai fini dell'analisi di studio del movimento di caduta massi in esame è necessario avere quanti più dati possibili l'ausilio di strumenti di monitoraggio. Occorre pertanto illustrare i principi di funzionamento degli strumenti maggiormente utilizzati per il monitoraggio di tale fenomeno. In particolare si utilizzano strumenti di monitoraggio superficiale, divisi in tre principali categorie: misure dirette, misure topografiche e radar.

Per quanto riguarda le misure dirette sulla parete rocciosa, si distinguono tre principali categorie di strumenti: estensimetri, distometri e fessurimetri.

Gli *estensimetri* vengono utilizzati per misurare lo spostamento relativo tra due punti di misura posti ai due lati di una frattura grazie all'unione delle due estremità con il terreno o roccia oggetto d'osservazione. Per misure di brevi distanze, dell'ordine di 1-3 m si utilizzano gli estensimetri a barra (Figura 2.7), mentre per distanze maggiori, fino ai 50 m si utilizzano estensimetri a filo (Figura 2.8). Il principio di funzionamento si basa sulla misura di spostamento di uno dei due punti di misura, che modifica quindi la lunghezza del filo o, in caso di estensimetri a barra, l'estensione di quest'ultima. Lo spostamento, di risoluzione dell'ordine dei centesimi di millimetro, viene registrato da un sensore e trasmesso ad una centralina.

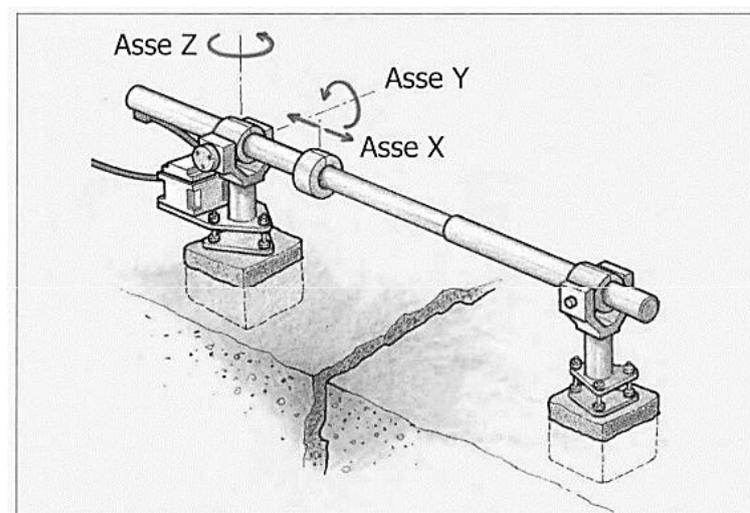


Figura 2.7- Schema di un estensimetro a barra, per il controllo del vettore spostamento.

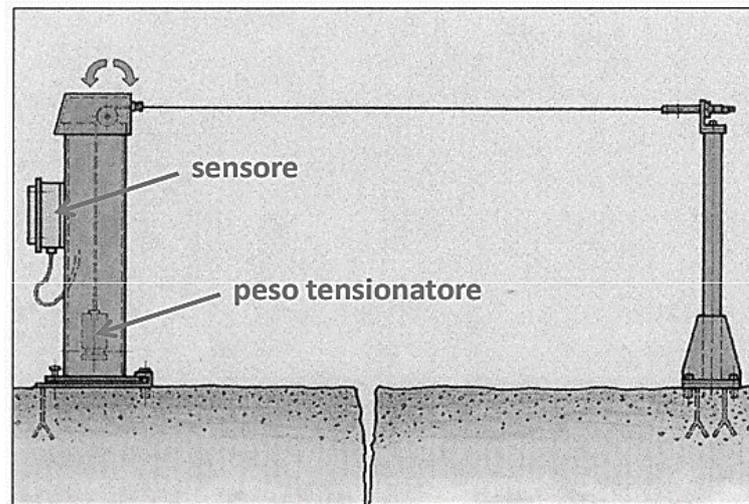


Figura 2.8- Schema di un estensimetro a filo, per il controllo della componente di spostamento lineare.

Per quanto riguarda gli ammassi rocciosi, un'altra tipologia di monitoraggio superficiale prevede l'utilizzo di *distometri a nastro* (Figura 2.9). L'utilizzo di tale strumento consiste nel misurare manualmente le variazioni di distanza tra due punti fissi, come possono essere le pareti che delimitano una frattura di ampiezza considerevole. Esso si compone di un corpo cilindrico in lega leggera che, con l'ausilio di ulteriori strumenti, consiste di compiere misure con precisione dell'ordine di un centesimo di mm. La media di tre misure fornisce il risultato finale.

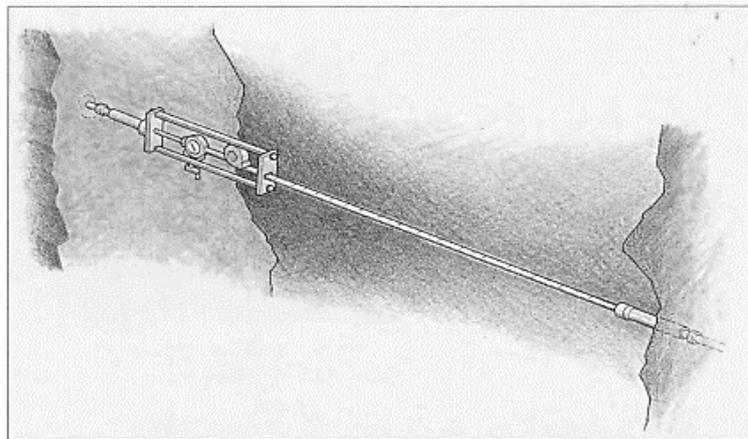


Figura 2.9- Schema di un distometro a nastro invar, per il controllo manuale della componente di spostamento lineare.

In caso di fratture di modesta entità è possibile invece utilizzare dei *fessurimetri* (Figura 2.10), posti a cavallo della fessura in esame. Possono essere di vario tipo, a seconda della metodologia di misura e acquisizione di dati (lineari, elettrici, misuratori di giunto monoassiali). La precisione varia tra il centesimo di mm per i misuratori elettrici al mm, per i fessurimetri a misura lineare. I dati vengono restituiti in termini di spostamenti nel tempo.



Figura 2.10- Esempio di fessurimetro elettrico e modalità di posizionamento.

Il *rilievo topografico* è invece uno dei più classici ed antichi strumenti di misurazione. Si basa sul controllo nel tempo degli spostamenti, misurati come variazioni angolari e spaziali, di punti e parti strutturali noti tramite la sistemazione di cosiddetti “capisaldi” sulla superficie del terreno. A tal scopo vengono utilizzati ad esempio teodoliti, tacheometri, distanziometri laser e stazioni totali. Queste ultime, costituite da un distanziometro ed un teodolite compattati all’interno di un unico strumento, sono le più utilizzate nel campo del rilievo topografico. La misura della distanza è elettronica, mentre le misure angolari sono ottiche. Un esempio di stazione totale è riportato nella Figura 2.11.



Figura 2.11- Esempio di stazione totale.

Dei prismi riflettenti vengono sistemati sul corpo di frana: tali punti sono mobili, in quanto oggetto di un possibile cinematismo. Al di fuori del corpo di frana vengono fissati dei punti di riferimento, i quali non sono caratterizzati da alcun tipo di movimento. In tal modo si determinano quindi gli spostamenti, attraverso misure ripetute nel tempo, che possono essere anche effettuate ad opportuna distanza di sicurezza (Figura 2.12).

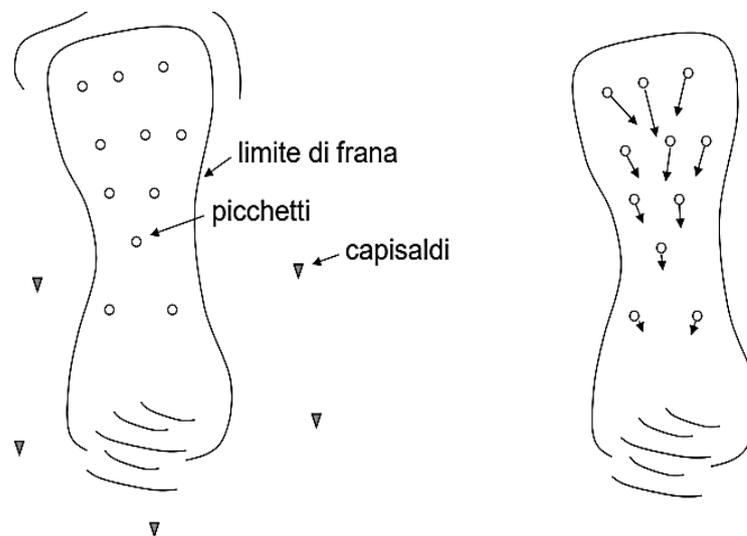


Figura 2.12- Schematizzazione rete topografica.

In caso non sia possibile la determinazione punti fissi in un raggio di pochi chilometri dalla zona oggetto di frana, la soluzione migliore è ricorrere a misure *GPS* (*Global*

Positioning System), in grado di superare questa limitazione. Questo permette, grazie ad un sistema di satelliti che orbitano intorno alla terra, di determinare la posizione di punti in qualunque parte della superficie terrestre si trovino.

A questi sistemi si uniscono inoltre i *rilievi fotogrammetrici*. La fotogrammetria è una scienza che consente di ottenere informazioni metriche di oggetti fisici attraverso processi di registrazione, misura e interpretazione di immagini fotografiche. Grazie a tale processo è possibile individuare e misurare i cambiamenti morfologici mediante il confronto di fotografie aeree e satellitari stereoscopiche.

Un'altra categoria di strumenti di fondamentale importanza e di grande impiego adibiti al monitoraggio di superficie coinvolge gli *strumenti radar*, che possono essere di vario tipo. In particolare occorre fare riferimento al sistema SAR (Radar ad apertura sintetica), che si avvale di un'antenna radar montata su una piattaforma mobile in grado di effettuare una scansione su un'area sufficientemente ampia con una risoluzione sufficiente (Figura 2.13).

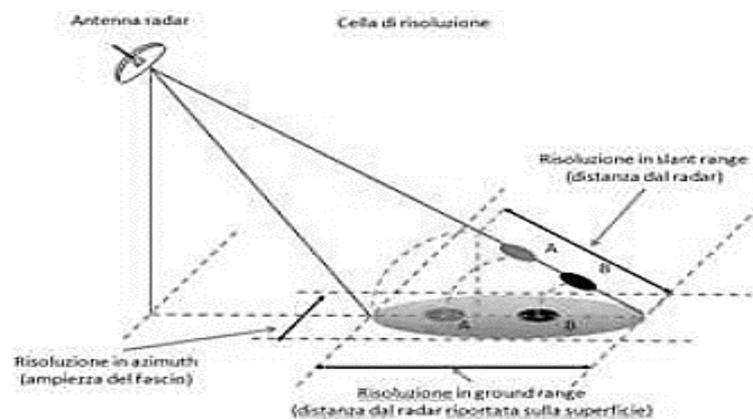


Figura 2.13- *Radio Detection And Ranging*.

Esistono diverse tecniche SAR, in particolare si fa riferimento all'interferometria SAR, la quale è una tecnica di trattamento dei dati che permette di ricostruire l'andamento altimetrico della superficie terrestre, calcolando la differenza di fase tra due immagini SAR acquisite in analoghe condizioni geometriche. Questo consente di misurare lo spostamento di uno scenario monitorato inviando verso di esso segnali di microonde in tempi diversi, registrandone ampiezza e fase del segnale ai fini di definirne la posizione

attraverso la misura dello sfasamento tra le due misurazioni. Le immagini SAR sono costituite da pixel, le cui dimensioni e quantità sono legate al tipo di strumento e alla distanza di quest'ultimo con lo scenario da monitorare. È possibile stimare lo spostamento d lungo la linea di vista dello strumento andando a confrontare le informazioni di fase dei pixel omologhi di due immagini acquisite in tempi successivi:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (12)$$

dove λ è la lunghezza d'onda del segnale radar e $\Delta\varphi$ è la differenza di fase tra due acquisizioni. In particolare si fa riferimento alla tecnica Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar o GB-InSAR.

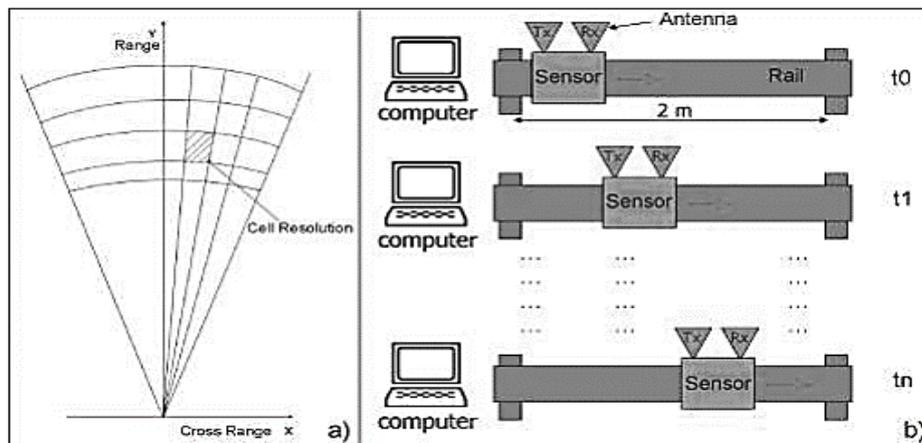


Figura 2.14- Schematizzazione di un interferometro terrestre per l'acquisizione di immagini SAR.

Il sensore viene movimentato su di un binario rettilineo, simulando in questo modo un'antenna ad apertura sintetica (SAR) di pari lunghezza, come riportato nella Figura 2.14 (Mazzanti P., 2012). Tale strumentazione presenta una serie di vantaggi quali:

- misure continue nello spazio, questo permette di elaborare mappe di spostamento bidimensionali, quindi superare la limitazione degli strumenti puntuali, che restituiscono solamente dati puntuali sparsi;
- precisione sub-millimetrica;
- risoluzione spaziale elevata;
- elevata frequenza di campionamento;

- possibilità di effettuare il monitoraggio a distanza, senza accedere direttamente alla zona di rischio di frana;
- gestione dello strumento in remoto;
- adattamento a qualunque condizione atmosferica e di luminosità;
- operatività 24h/24.

D'altro canto, il raggio di azione di questo sistema, se comparato con sistemi satellitari, risulta ridotto. Nonostante ciò si evince come l'interferometria terrestre presenti notevoli potenzialità nello studio di singoli fenomeni che si estendono su porzioni di territorio arealmente poco estese e che presentano un'evoluzione rapida. Nel caso in esame esso è pertanto riconosciuto come il sistema più adatto.

Il *laser scanner* è un altro strumento in grado di rilevare le coordinate spaziali 3D di un oggetto osservato, attraverso nuvole di punti tridimensionali che costituiscono inoltre, una buona base per ricavare accurati modelli digitali del terreno (DTM). Tale sistema è caratterizzato da precisioni nella misura degli spostamenti, che si aggirano attorno a 0,5-1 cm, da lunghe portate (possono anche superare il km) e da elevate velocità di acquisizione. La misura della variazione nel tempo della posizione di punti in superficie permette di osservare il movimento. I vantaggi di questo sistema sono l'elevata risoluzione e la possibilità di ottenere dati areali, senza necessità di accesso diretto al sito di interesse.

Una volta note le tipologie di instabilità di un versante si proceda con la scelta degli opportuni strumenti utilizzati per monitorare l'innescò ed evoluzione del cinematisimo. Il caso studio che verrà affrontato nel lavoro di tesi tratta di una caduta massi provocata dal disgiungo di un blocco in roccia tramite spinta di un martinetto. L'istante di innescò e il successivo moto sono controllati mediante strumenti posizionati ai piedi della parete rocciosa e in corrispondenza della nicchia di distacco. Questa parte verrà affrontata nel dettaglio nel capitolo 4.

CAPITOLO 3

METODI PER LA MODELLAZIONE NUMERICA DEI FENOMENI DI CADUTA MASSI

Introduzione

Nel seguente capitolo vengono descritti i metodi numerici e probabilistici utilizzati per la modellazione della caduta massi. L'adozione di questi per la simulazione e lo studio del fenomeno presenta diversi vantaggi. Anzitutto non si devono fare ipotesi preliminari su forma e posizione della superficie di scivolamento, poiché se non definita su basi note si genera automaticamente dove la resistenza a taglio non è in grado di far fronte agli sforzi applicati. Inoltre, se i parametri caratteristici sono realistici, è possibile avere un quadro dell'evoluzione degli sforzi e delle deformazioni; nel caso in cui si analizzi il blocco come insieme di particelle è anche possibile avere un quadro della rottura. La conoscenza del fenomeno in esame permette inoltre di andare a studiare la dinamica utilizzando approcci che coinvolgono diversi metodi numerici. Ognuno è contraddistinto da alcune semplificazioni o assunzioni, il che rende molto importante la definizione del metodo per la modellazione numerica, che deve essere scelto in funzione delle condizioni fisiche che devono essere modellate o in base alla capacità di restituire un risultato più o meno adeguato. Questo va ad influenzare la validità del metodo di

calcolo, che è funzione della sua analogia con il fenomeno reale. A tal fine è necessario andare a vedere i principali metodi di analisi della dinamica sfruttati da questi software.

3.1. Metodi di analisi della dinamica

I metodi di analisi della dinamica si raggruppano in diverse categorie, a seconda di come viene rappresentato il blocco e delle dimensioni spaziali che consentono di analizzare.

Nel caso della caduta massi, a seconda della rappresentazione del blocco si può adottare un modello lumped mass o a blocco rigido. La scelta dipende da dimensioni e forma del blocco, così come dal comportamento che può avere durante il cinematisimo. L'adozione di un modello troppo semplificato porterebbe ad analisi errate, critiche soprattutto per la fase di previsione ed analisi di rischio.

I due approcci nominati si collegano inoltre ad altre due macro categorie in cui vengono raggruppati i metodi di analisi della dinamica, che si basano invece sulle dimensioni spaziali analizzabili attraverso i software di analisi numerica. Ci si riferisce infatti a metodi bidimensionali (2D) o tridimensionali (3D).

Nei metodi bidimensionali le traiettorie del blocco sono simulate lungo un piano, definito da due assi rappresentanti uno la distanza progressiva e l'altro l'elevazione. Su tale piano viene dunque definito il profilo del versante, tralasciando quindi la terza dimensione spaziale. Il terzo spostamento viene dunque assunto come trascurabile, che viene invece valutata in caso di analisi 3D, in cui la traiettoria dipende anche da un'altra coordinata. Tale aggiunta comporta quindi una variazione del cinematisimo più o meno sostanziale, dettata dalle caratteristiche morfologiche dell'area in analisi. Il blocco analizzato può inoltre essere trattato attraverso un modello lumped mass o a blocco rigido.

La tridimensionalità va ad influenzare, considerando una generica superficie topografica, la dispersione laterale, ovvero la deviazione della traiettoria dalla direzione di massima pendenza. Tale fattore è tanto più rilevante sui risultati dell'analisi quanto più è estesa la traiettoria di propagazione e più articolato il pendio dove avviene la

caduta. Se la superficie è irregolare tale dispersione può essere molto elevata, tale da comportare la necessità di adottare un modello 3D. Alla luce di tali anticipazioni, occorre dunque andare ad approfondire alcuni concetti fondamentali per la scelta del modello da adottare.

Ogni metodo descritto parte comunque dalla definizione di un *profilo*. Nel caso più semplice bidimensionale, il profilo è una sequenza di segmenti che devono rappresentare il percorso più probabile che il masso farà lungo il versante. Tale percorso può essere ricavato ad esempio da dati storici, oppure basandosi sulla morfologia di versante tramite l'osservazione di una mappa topografica. In caso di previsione del percorso, occorre invece osservare che esso è influenzato da molti fattori, quali la morfologia del versante, le superfici di versante, le caratteristiche meccaniche del suolo e del blocco ed il cinematismo che possiede il blocco in ogni tratto di versante. Andando ad analizzare i principali punti da inserire all'interno di un profilo 2D, si andranno in primo luogo a definire la nicchia di distacco e il volume e la forma del blocco, per poi proseguire con la definizione dell'inclinazione del versante e con esso le caratteristiche della superficie d'impatto.

Con il termine *nicchia di distacco* si indica il punto in cui si ha il distacco del masso dalla parete retrostante oppure, nel caso in cui questo non sia ancora avvenuto, delle possibili aree in cui può avvenire, tramite osservazioni sulla morfologia o segni sulla parete rocciosa. Nei metodi 2D la nicchia viene inserita come puntuale o lineare, individuando quindi un punto o un segmento. Definendo un'analisi probabilistica, tale segmento rappresenta una distribuzione uniforme di punti di sorgente, dal quale verrà estratto casualmente un punto di distacco.

Noto il punto di distacco, occorre procedere nella definizione delle caratteristiche del blocco, tenendo conto che il *volume e la forma* del blocco vanno ad influenzare la perdita di energia durante l'impatto di esso sulla superficie, così come il tipo di moto (rotolamento, scivolamento, rimbalzo). È importante inoltre la relazione tra la forma del blocco e la scabrezza della superficie del versante, che induce un incremento o una riduzione in numero e in altezza dei rimbalzi, e quindi dell'energia d'impatto.

Se è nota la dimensione del blocco, è possibile procedere alle analisi numeriche adottando forma e dimensioni note, o più semplicemente riducendolo a puntiforme, come già accennato precedentemente, seguendo un modello lumped mass.

Se il volume del blocco è tale da far cadere l'assunzione di massa puntiforme occorre andare a valutare se questo si comporterà come blocco rigido o sarà necessario considerare un insieme di particelle. Vengono pertanto illustrati questi concetti, fondamentali per comprendere le successive applicazioni.

3.1.1. Analisi del fenomeno mediante approccio Lumped mass

Come già accennato, i metodi lumped mass non considerano forma e dimensione del blocco, che viene pertanto assunto come puntiforme. La traiettoria è quindi indipendente dalla massa del blocco. Trascurando inoltre la resistenza dell'aria, si può evincere come il cinematiso dipenda solo dall'impatto con il terreno, rappresentato dai coefficienti di restituzione K_t e K_n , rispettivamente i coefficienti di restituzione trasversale e normale (Piteau & Clayton, 1976).

Adottando questo metodo si possono fare delle assunzioni quali:

- Traiettorie indipendenti dal volume del blocco;
- Rotazione e scivolamento non vengono considerate;
- Il volume del blocco viene considerato tenendo conto della variazione del coefficiente di restituzione normale, solitamente secondo relazioni empiriche.
- Il calcolo della massa, noto il volume, viene dato dal rapporto tra esso ed il peso unitario del materiale.

La *velocità iniziale* del blocco al distacco invece è un altro punto fondamentale. Solitamente viene assunta velocità nulla in caso in cui il blocco si mobilita da fermo, mentre in caso di azioni dinamiche o statiche quali pressioni o sismi viene assunta pari a valori intorno ad 1 m/s. L'analisi numerica, se attendibile, può portare a determinare la velocità del blocco con precisione più elevata.

La *velocità con cui il blocco impatta* influenza sia la dissipazione energetica che la tipologia di moto dopo il rimbalzo. Essa dipende dalle caratteristiche del blocco, che determinano la velocità pre-impatto e l'angolo di incidenza della velocità pre-impatto. Nel caso di successivi rimbalzi, anche le caratteristiche della superficie d'impatto andranno ad influenzare i successivi rimbalzi.

Il passaggio tra la fase di rimbalzo a quella di rotolamento avviene quando il rapporto tra la variazione di energia e l'ampiezza del tratto orizzontale tra due rimbalzi è maggiore del valore del coefficiente di attrito al rotolamento (Hunger e Evans, 1988). Questa relazione viene spiegata dal fatto che l'energia cinetica è minore di quella dissipata dai rimbalzi.

Particolare attenzione va posta ai coefficienti di restituzione, K_n e K_t . Solitamente sono dati dal rapporto tra le velocità pre e post impatto, ma in caso di simulazione, occorre tenere conto anche del materiale. Diversi autori hanno posto coefficienti di restituzione diversi a seconda del tipo di materiale (Richards, 1988; Pfeiffer e Bowen, 1989; Rocscience, 2000). Tali valori si possono poi tarare mediante analisi a ritroso.

Uno dei software utilizzati, RocFall (Rocscience), adotta questo approccio per l'analisi dinamica della caduta massi. Il principio di funzionamento di questo software verrà visto più nel dettaglio nei paragrafi successivi.

3.1.2. Analisi del fenomeno mediante blocchi rigidi

Il masso può anche essere trattato come corpo rigido, di dimensioni e caratteristiche note, o come insieme di particelle. In questo ultimo caso è possibile inoltre andare a simulare eventuali rotture del blocco. Considerando blocchi rigidi si parla di modelli a particelle, i quali si basano sulle seguenti assunzioni:

- Le particelle sono di forma circolare;
- Le particelle sono considerate come corpi rigidi. Non sono quindi in grado di deformarsi;
- Il contatto tra particelle avviene su un'area molto piccola (puntuale);
- La sovrapposizione è consentita grazie alla condizione di soft-contact;

- L'entità della sovrapposizione è relazionata alle forze di contatto tramite relazioni forza-spostamento, e tale sovrapposizione è di dimensioni molto ridotte se comparata alle dimensioni delle particelle;

La particolarità di questa semplificazione è la possibilità di rottura, durante il cinematismo in atto, dei legami tra le particelle che costituiscono il masso. Questo è reso possibile tramite la definizione dei parametri dei giunti tra le particelle, ovvero resistenza a trazione e compressione, taglio, torsione e momento. Una volta rotti questi legami non è più possibile ricostruirli.

La costruzione e l'assemblaggio di blocchi di particelle in grado di simulare l'ammasso reale richiede un insieme di parametri talvolta difficili da determinare nel caso in cui non si tratti di roccia occorre infatti definire una distribuzione granulometrica, un valore di porosità e dei micro-parametri che controllino il contatto tra le particelle, con conseguenti aumenti dei tempi di calcolo.

A differenza dei modelli più comunemente usati che si basano perlopiù su una simulazione numerica che adotta un approccio continuo, modello a blocchi rigidi considera quindi l'ammasso come discontinuo. Occorre pertanto illustrare più nello specifico questi concetti.

3.2. Modelli numerici agli Elementi Distinti (DEM)

Per la scelta del metodo numerico da adottare, il primo passo consiste nella scelta tra modello continuo o discontinuo. Esistono anche modelli ibridi, ma l'implementazione di essi è più complessa e spesso non necessaria per analisi di fenomeni quali quello in analisi. Viene adottato un modello *continuo* quando non si ha un'evidente presenza di macrostrutture che governano la risposta deformativa, per cui non si ha ad esempio intersezione di giunti, ma il materiale è appunto continuo in tutta la zona considerata. Quando invece le discontinuità sono determinanti ai fini della determinazione del comportamento tensio-deformativo, occorre entrare in campo *discontinuo*. In tal caso l'ammasso roccioso è diviso tra materiale e discontinuità. L'approccio alla teoria del discontinuo consiste nel considerare una natura a blocchi del sistema in analisi, dove ogni blocco può interagire con quello vicino attraverso i giunti. Le caratteristiche di

deformabilità e resistenza del materiale roccioso e le discontinuità vengono definite separatamente trattando quindi:

- Il comportamento dei blocchi caratterizzanti l'ammasso roccioso, il quale può essere rigido o deformabile. In caso di blocco deformabile occorrerà definire la legge di comportamento della roccia intatta;
- Le discontinuità ed i giunti, fondamentali per la definizione della geometria dei blocchi, determinata dall'ubicazione e dall'orientazione di essi. È pertanto necessario definire la resistenza a taglio dei giunti, che può seguire ad esempio il criterio di Mohr Coulomb o Barton-Bandis. È inoltre necessario definire il modello di comportamento che seguono i giunti, che solitamente è di tipo elasto plastico. Essi possiederanno una deformabilità, definita grazie ai coefficienti di rigidità assiale e trasversale (k_n e k_s);
- La legge di creep, la quale permette di analizzare l'evoluzione degli spostamenti nel tempo. Può essere effettuata mediante analisi a ritroso di spostamenti passati, misurati grazie a strumenti di monitoraggio (ad esempio grazie all'utilizzo dei risultati del monitoraggio GB-InSAR o con previsione di spostamenti futuri.

È possibile effettuare tale assunzione utilizzando un modello ad elementi discreti, meglio conosciuto come DEM (Metodo ad Elementi Distinti), introdotti da Cundall nel 1971. Tale metodo ha la capacità di riprodurre spostamenti finiti e rotazione di elementi, definiti come blocchi e particelle. In tal modo è possibile simulare il completo distacco di elementi originariamente uniti, o viceversa. I blocchi quindi seguono il principio dell'approccio discontinuo: sono rigidi, con interfacce che possono sovrapporsi tra loro. Successivamente sono stati introdotti anche blocchi deformabili, i quali possono essere rappresentati sia 2D che 3D e le particelle usate sono tipicamente dischi e sfere.

Nel DEM la risposta del sistema è data dall'equilibrio dinamico di ogni blocco, con forze di contatto che sono trovate attraverso calcoli che tracciano il movimento dei blocchi. Il movimento è dettato quindi dalla propagazione, tra tali blocchi, dei disturbi dovuti a eventuali carichi applicati o forze peso esercitate su di essi. Tale processo dipende dalle proprietà fisiche del sistema. I modelli agli elementi discreti risolvono il moto di ciascuna particella considerando le forze e i momenti agenti su di essa, usando

la seconda legge di Newton e le leggi della dinamica del corpo rigido. L'equazione del moto è risolta con un approccio alle differenze finite, definendo gli intervalli di tempo di ampiezza limitata e data dall'assunzione del fatto che le accelerazioni sono costanti durante ogni step. Integrando quest'ultime si ottengono le posizioni, velocità e rotazioni e quindi si ha la descrizione della dinamica.

I disturbi non si possono propagare, tra un blocco e l'altro e si necessita pertanto di più tempo. Le proprietà della discontinuità devono essere definite insieme alle caratteristiche dei blocchi.

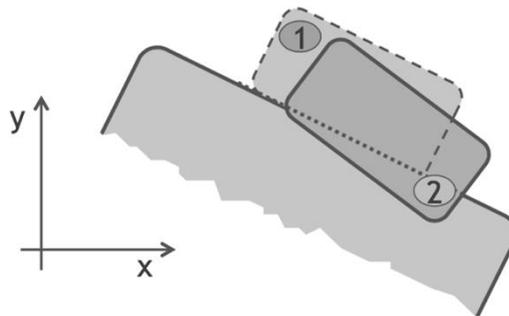


Figura 3.1- Schematizzazione del contatto tra due blocchi.

I giunti sono riprodotti come superfici di contatto, lungo segmenti o spigoli, tra il contorno di due blocchi adiacenti. Il contatto può essere espresso in diversi modi, in relazione alla forma delle particelle e alla complessità del modello (Figura 3.1).

Per la definizione di un modello ad elementi discreti è necessario considerare le caratteristiche geometriche e meccaniche dell'ammasso, con le proprietà annesse dei giunti. I rilievi in sito sono indispensabili talora sia necessario analizzare una superficie.

I software DEM sono adatti alla simulazione di movimenti di ammassi rocciosi, quali scivolamento e caduta. I vantaggi principali sono appunto la possibilità di simulare distacchi tra particelle, generandone di nuovi durante la fase computazionale. Può essere quindi utilizzato per studiare l'evoluzione della caduta massi, non solo per l'innescio. Questo significa che è possibile separare cause ed effetti, rappresentandoli entrambi. I

problemi principali risiedono, come già accennato, nell'elevato dispendio computazionale e nella difficoltà di determinazione dei microparametri.

Tra i principali software commerciali che adottano questo tipo di simulazione vi sono UDEC6.0, 3DEC5.0 e PFC5.0.

3.2.1. Finite Discrete Element Method (FDEM)

È possibile ottenere ulteriori vantaggi grazie all'utilizzo del Metodo combinato agli Elementi Finiti e Discreti (FDEM), introdotto da A. Munjiza nel 1990. Attraverso questo metodo è possibile combinare i vantaggi dei modelli FEM e DEM: il comportamento continuo viene modellato attraverso gli elementi finiti, mentre il comportamento discontinuo attraverso gli elementi discreti, questo significa che è presente una mesh associata ad ogni elemento discreto. La deformabilità del materiale viene rappresentata mediante il metodo FEM, mentre il contatto tra i blocchi con il metodo DEM. Il vantaggio di questo metodo sta nella possibilità di considerare la transizione da FEM a DEM, la quale permette di esprimere il processo di fratturazione e frammentazione del materiale.

Il processo di fratturazione è caratterizzato da un comportamento iniziale elastico fino al limite di resistenza dato dal criterio di Mohr-Coulomb, seguito da un graduale decremento dello sforzo dovuto al softening. La fratturazione può avvenire sia per l'azione di sforzi normale, per cui si parla di "opening mode", sia per l'azione di sforzi di taglio che danno origine ad uno "sliding mode", in Figura 3.2 si riporta una schematizzazione del processo.

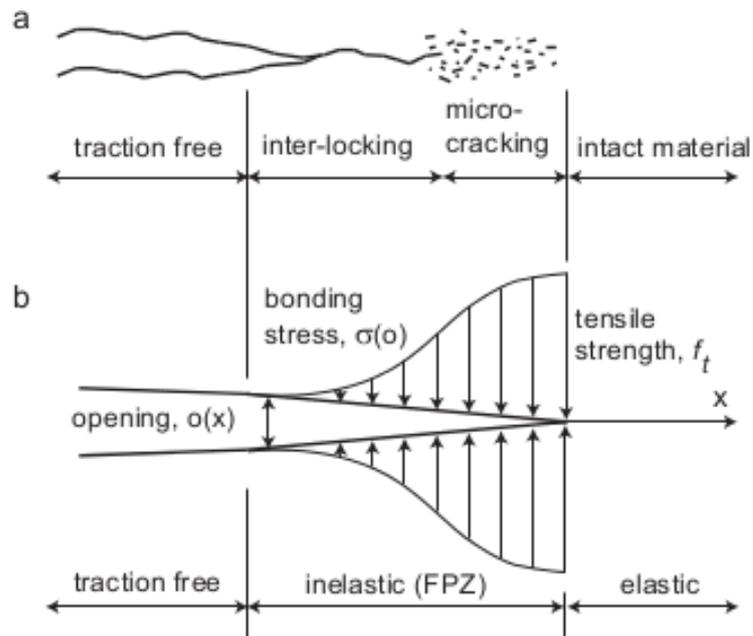


Figura 3.2- (a) Modello di una frattura per trazione in un materiale roccioso eterogeneo (Labuz et al. 1987). (b) Modello della Fracture Process Zone (FPZ) di Hillerborg (Hillerborg et al. 1976).

Per caratterizzare il materiale si definiscono sia i parametri del materiale intatto (E , ν , ρ , c_i , ϕ_i , σ_t e G_f) che delle discontinuità (c e ϕ) mediante prova di laboratorio. Il parametro G_f rappresenta l'energia di fratturazione, che può essere determinata mediante l'equazione di Whittaker et al. (1992):

$$G_f = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (13)$$

Con $K_{IC} = 0,271 + 0,107\sigma_t$.

È possibile ottenere l'energia di fratturazione anche da una prova di laboratorio su una barra che presenta una frattura iniziale, come riportato in Figura 3.3.

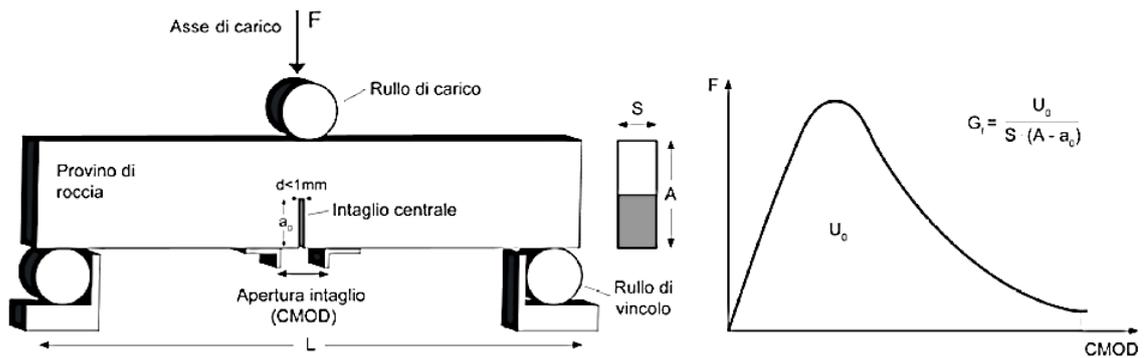


Figura 3.3- Prova di carico su una barra con frattura iniziale (SENB; Malvar & Warren, 1987).

Ogni elemento discreto interagisce con quelli vicini, attraverso uno schema esplicito in cui la stabilità è garantita dalla soluzione determinata adottando un appropriato incremento di tempo. L'equazione del moto risulta pertanto essere:

$$Kx + M\ddot{x} + C\dot{x} = p \quad (13)$$

Attraverso un modello FDEM è possibile simulare fenomeni di propagazione e frammentazione riguardanti la fratturazione di elementi stratificati ma anche affrontare problemi di stabilità di versante, andando a studiare non solo le condizioni di innesco come comunemente fatto dai software FEM, ma anche l'evoluzione di un fenomeno di scivolamento.

Un'applicazione di tale metodo viene riportata nella Figura 3.4, in cui viene analizzato un caso di una ex miniera situata a Torgiovanetto d'Assisi, per cui è possibile andare a studiare l'evoluzione del fenomeno di instabilità di una grande porzione di terreno andando a definire i parametri della roccia e dei giunti.

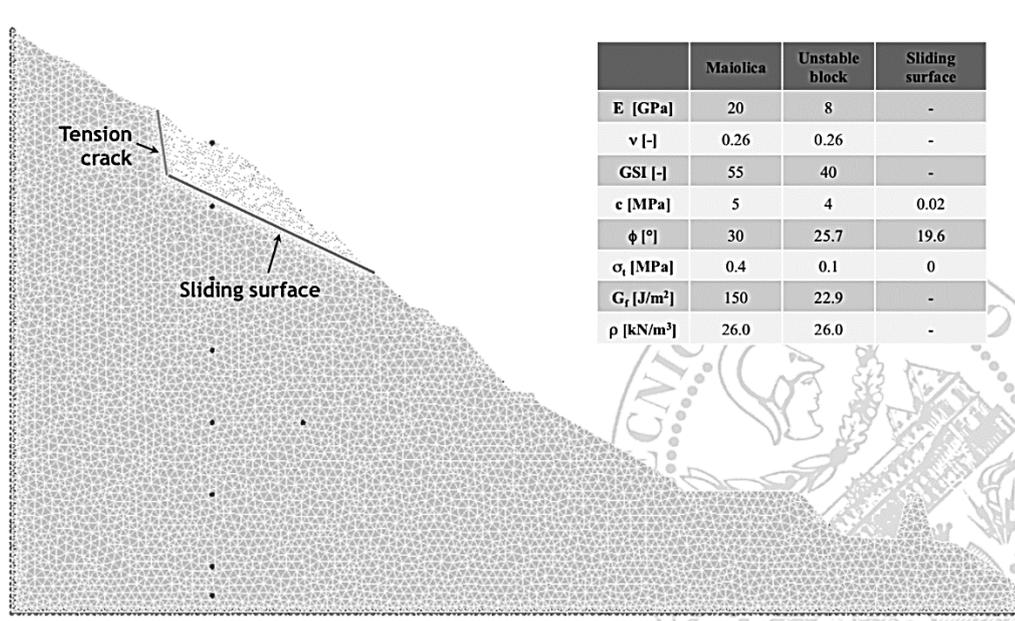


Figura 3.4- Rappresentazione dello scenario di Torgiovanetto d'Assisi.

La caratterizzazione geotecnica di questo caso studio comporterebbe un notevole numero di test di laboratorio ed in sito per andare a valutare i parametri meccanici caratterizzanti il terreno. È però possibile andare a simulare, attraverso un metodo FDEM, una prova di compressione uniassiale e una prova di carico su tre punti, evitando così di effettuare prove onerose in termini di tempo e costi.

Sulla base delle considerazioni fatte, l'adozione di un modello numerico deve essere valutata attentamente, andando a considerare tutte le caratteristiche note dello scenario in esame. La tipologia e l'entità del fenomeno influenzano notevolmente la scelta, così come il numero di parametri a disposizione. Per quanto riguarda lo studio dell'evoluzione del fenomeno, il modello DEM è il più adatto per quanto riguarda analisi di fenomeni quali crolli in roccia, in cui è possibile andare ad associare il materiale ad un insieme di particelle rigide collegate tra loro, senza studiarne la deformabilità. In caso di terreni di natura eterogenea o fenomeni di instabilità che coinvolgono grandi porzioni di terreno di cui non sono note le proprietà meccaniche, il modello FDEM risulta il più adatto.

Come si vedrà nel capitolo 6, l'analisi del crollo in roccia in esame verrà effettuata adottando sia un metodo lumped mass (RocFall) sia un modello ad elementi distinti (PFC2D).

CAPITOLO 4

IL SITO DI ANTEY-SAINT-ANDRÉ

Introduzione

In questo capitolo viene descritta la procedura di disgaggio di un masso instabile, isolato dalla retrostante parete rocciosa. Dopo un primo inquadramento territoriale, in cui vengono illustrati la geomorfologia e i potenziali fenomeni di instabilità, viene descritta la strumentazione utilizzata e l'organizzazione del cantiere. In seguito alle operazioni di disgaggio vengono analizzati i dati misurati dagli strumenti di monitoraggio. Nella seconda parte del capitolo si analizzano le possibili traiettorie del masso mediante la costruzione di un modello altimetrico e l'utilizzo di materiale fotografico del sito.

4.1. Descrizione del sito in esame e inquadramento geologico

Il 30 maggio 2016 si è verificato un fenomeno di caduta massi dalle pareti rocciose sovrastanti l'area sportiva-ricreativa in località Filey. In un primo sopralluogo da terra si è stimato un volume del materiale lapideo caduto circa pari a 10-15 m³. L'individuazione della nicchia di distacco risulta in questo caso difficoltosa, data la natura fortemente fratturata della parete rocciosa. Un secondo sopralluogo aereo avvenuto il 31 maggio ha permesso di individuare la nicchia in corrispondenza al settore sommitale della parete. A seguito dell'impatto con il pendio detritico posto al piede

della parete rocciosa, il masso si è suddiviso in una serie di elementi di dimensioni minori, alcuni dei quali sono arrivati in corrispondenza del sentiero e del maneggio situati a valle del detrito di falda, come è possibile osservare nella Figura 4.1.



Figura 4.1- Rappresentazione del sito descritto (Google Earth).

La causa di questo crollo è imputabile, come detto nel paragrafo precedente, alla natura altamente fratturata della parete dovuta alla presenza di famiglie di discontinuità e alle loro reciproche orientazioni. Il cinematisimo, molto probabilmente, è stato innescato dall'aumento delle spinte idrauliche nell'ammasso roccioso provocato dalle precipitazioni dei giorni precedenti l'evento. Dal secondo sopralluogo si riscontra inoltre la presenza di un ulteriore blocco isolato dalla parete di circa 25 metri cubi e collegato ad essa solo mediante un ponte di roccia alla base (Figure 4.2 e 4.3). Sebbene non coinvolto nel fenomeno di crollo, il masso può rappresentare causa di future instabilità e di rischio per le infrastrutture presenti alla base della parete, per questo è stato necessario procedere con la sua rimozione.



Figura 4.2- Foto aerea del masso instabile.



Figura 4.3- Foto aerea del masso instabile.

Il fenomeno di instabilità oggetto di questa analisi è situato nel comune di Antey- Saint-André in provincia di Aosta, situato nella bassa Valtournenche, valle laterale della Valle D'Aosta, riportato in Figura 4.4. Il territorio del comune ricopre una superficie di 11,8 km² ed è inserito nella parte mediana del bacino idrografico del torrente Marmore,

compreso tra le quote di 680 m e 2100 m. Il capoluogo è situato ad una quota di circa 1080 m s.l.m. in sinistra orografica del torrente Marmore, mentre le numerose frazioni sono disposte essenzialmente lungo gli assi stradali più importanti. In particolare la frazione di Filey, dove è situato il versante oggetto di analisi, si trova lungo l'asse della S.R. numero 46.



Figura 4.4- Inquadramento territoriale del sito in esame (Regione Autonoma Valle d'Aosta).

Il versante destro del torrente, compreso tra le località Gran Moulin e Filey e il tratto immediatamente a nord, è caratterizzato dalla presenza di pareti rocciose altamente fratturate, di altezza fino ad alcune centinaia di metri, comprese approssimativamente tra le quote 1100 e 1500 m s.l.m.. Lungo queste pareti è possibile riscontrare numerosi blocchi di forma prismatica, parzialmente isolati da fratture aperte con conseguente possibilità di crollo, il cui volume raggiunge alcune decine di metri cubi. Lungo la strada, nel bosco sottostante le pareti rocciose ed in prossimità degli edifici, è possibile osservare numerosi blocchi franti di dimensioni variabili, i quali testimoniano come in passato si siano verificati numerosi crolli. Nelle successive figure (Figura 4.5 e Figura 4.6), viene rappresentata la situazione descritta. In primo luogo è possibile osservare un'area molto estesa lungo il versante sinistro del torrente, a sud di Antey- Saint-André, indicata come frana complessa. Spostando l'attenzione più a nord, si individua un'area in cui si ha la presenza sia di una frana complessa, indicata come dissesto lineare in Figura 2, sia la presenza di un debris flow, indicato come dissesto poligonale. Nel

versante destro, in corrispondenza della località Filey, è riportata la presenza di caduta massi indicata come dissesto puntuale. Quest'ultima non riguarda solo la località oggetto di studio, è possibile infatti osservare come questa riguardi diverse aree del comune. Infine in Figura 4.5 viene specificata anche l'eventualità di una possibile esondazione nella valle lungo la strada regionale. Da questo studio segue la costruzione di una carta di pericolosità (Figura 4.6) in cui vengono riportate le zone a rischio del comune. I versanti sono caratterizzati da un'elevata copertura boschiva. In corrispondenza dei dissesti evidenziati si ha la presenza di zone ad alta pericolosità alle quote maggiori, mentre verso valle la pericolosità diminuisce fino ad arrivare ad aree a bassa pericolosità (in verde).



Figura 4.5- Estratto della Carta dei dissesti della Regione Valle d'Aosta.

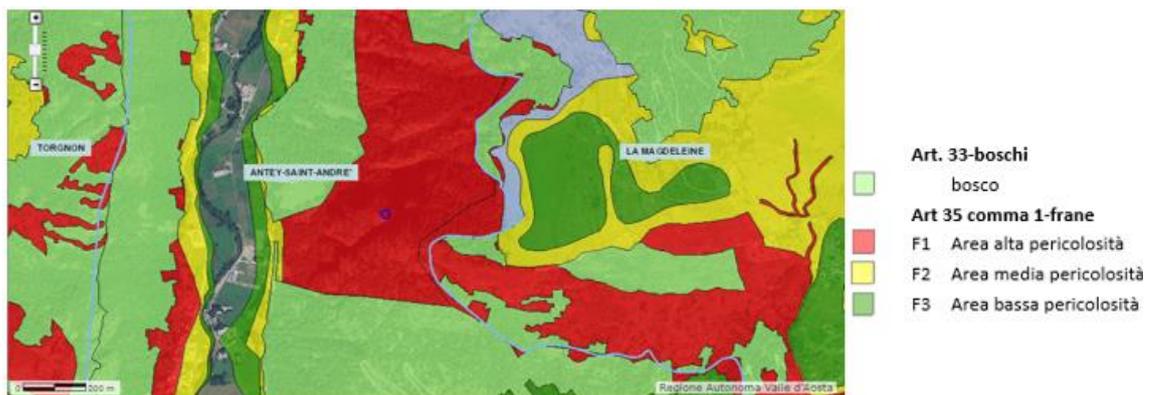


Figura 4.6- Estratto della Carta aree di pericolosità della Regione Valle d'Aosta.

Dal punto di vista geologico, il settore superiore del versante in esame è caratterizzato dalla presenza di elementi litologici ascrivibili alla Zona Piemontese, in particolare da

metagabbri massicci dell'Unità Zermatt-Saas. Il versante è caratterizzato, nella parte alta, da pareti rocciose sub-verticali fortemente fratturate, con presenza di blocchi lapidei isolati in condizioni di equilibrio precario. Come si può vedere in Figura 4.7, il settore oggetto di analisi fa parte di un conoide di origine gravitativa, al di sotto del quale si ha un accumulo di frana (a1). Nella parte medio-inferiore sono presenti depositi detritici di falda. Infine nella parte inferiore, al piede del versante, si ha un deposito alluvionale e fluvioglaciale.

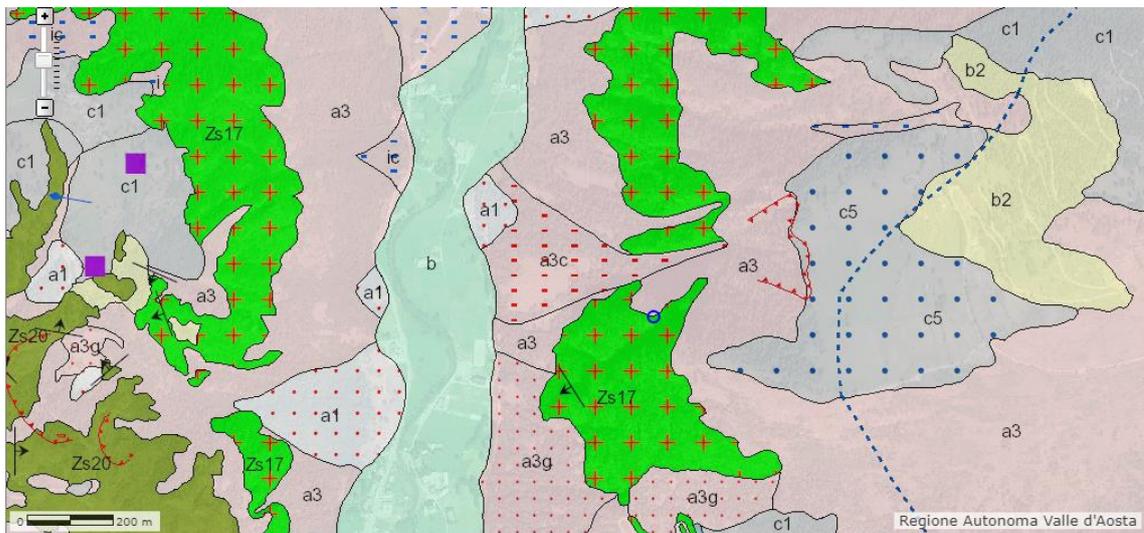
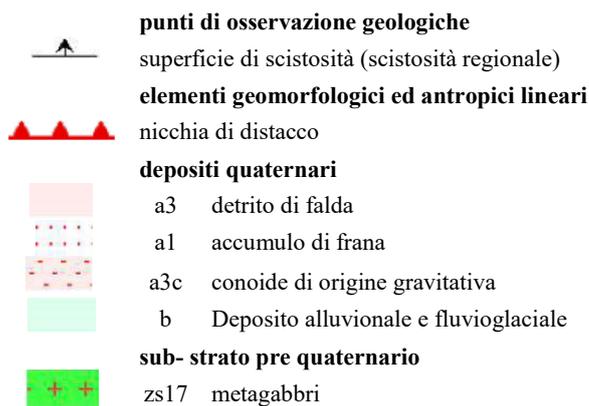


Figura 4.7- Carta geologica Regione Valle d'Aosta.



4.2. Disgaggio controllato del masso

Il giorno 5 maggio 2017 è stato eseguito il disgaggio controllato del masso. L'allestimento del cantiere prevede diverse fasi. Il giorno precedente le operazioni sono

stati posizionati gli strumenti necessari al disaggio in corrispondenza della nicchia di distacco, raggiungibile esclusivamente per via aerea. Nella mattinata del 5 maggio la prima fase operativa è consistita nella messa in sicurezza del cantiere. Si è proceduto quindi con la chiusura della strada e del percorso vita sottostanti la parete.

In una seconda fase sono stati posizionati gli strumenti utilizzati a terra per il controllo del masso. Il disaggio vero e proprio è iniziato nel pomeriggio alle 14:30. L'operazione non si è limitata solamente alla bonifica della parete, ma anche al monitoraggio del masso in ogni fase di tale procedura, in modo da poter controllare il suo movimento e studiare successivamente le sue traiettorie.

Per il disaggio del masso è stato utilizzato un martinetto a spinta (Figura 4.8), posizionato tra la parete e la sommità del masso stesso. Prima di perdere la stabilità e iniziare il moto verso il basso il masso ha subito 4 spinte.



Figura 4.8- Martinetto utilizzato per il disaggio.

Per quanto riguarda invece il monitoraggio gli strumenti utilizzati sono: estensimetro a filo con campionamento ogni 30 s, stazione totale e radar. Il primo è stato posizionato in corrispondenza del masso, mentre gli ultimi due strumenti sono stati posizionati nel

prato alla base del versante. Nella Tabella 1.1 sono riportate le coordinate degli strumenti utilizzati a terra, individuate mediante rilievo RTK con GPS.

Tabella 4.1- Posizione strumentazione.

	Radar Hydra	Stazione Totale
Coordinate WGS84		
Latitudine	45°48'56.09238"N	45°48'55.98868"N
Longitudine	7°35'23.30589"E	7°35'23.18511"E
Quota ellissoidica	1091.323 m	1083.773m
X	4414783.321m	4414780.035m
Y	588258.516m	588255.447m
UTM Ed50		
Latitudine	390523,29	5074720,08
Longitudine	390525,96	5074723,21

Per poter rilevare i movimenti tramite stazione totale (Figura 4.9) è stato posizionato il prisma da collimare in testa al masso (Figura 4.10). Le prime quattro misure sono di prova, mentre le misure successive vengono eseguite ad intervalli regolari di tempo. Le prime misure, dalla 5 alla 16, sono state eseguite ogni 10 minuti. Con l'inizio della sperimentazione, dalla misura 17 alla 24, l'intervallo di campionamento viene ridotto a 30 secondi, fino al primo movimento registrato alle 14:34, in cui le misure vengono prese con una frequenza maggiore, ogni 5 secondi, in modo da avere una descrizione ancora più dettagliata del movimento.



Figura 4.9- Stazione totale utilizzata.



Figura 4.10- Posizionamento prisma.

Nel grafico della Figura 4.11 è possibile osservare le misure effettuate dalla stazione totale. In ordinata è presente la distanza “misurata”, ovvero la distanza inclinata tra la stazione totale e il prisma collimato. Si può osservare che la distanza della nicchia di distacco rispetto alla posizione di misura è di circa 450 m. In questo grafico è possibile distinguere chiaramente i quattro step di carico precedentemente nominati. L’ultima misura rappresenta l’ultimo punto collimato prima che il masso si distacchi e cada. Infatti il prisma è a perdere e nel momento in cui il masso comincia la caduta verso il basso la stazione totale non è più in grado di effettuare le misure, in quanto non collima più il prisma.

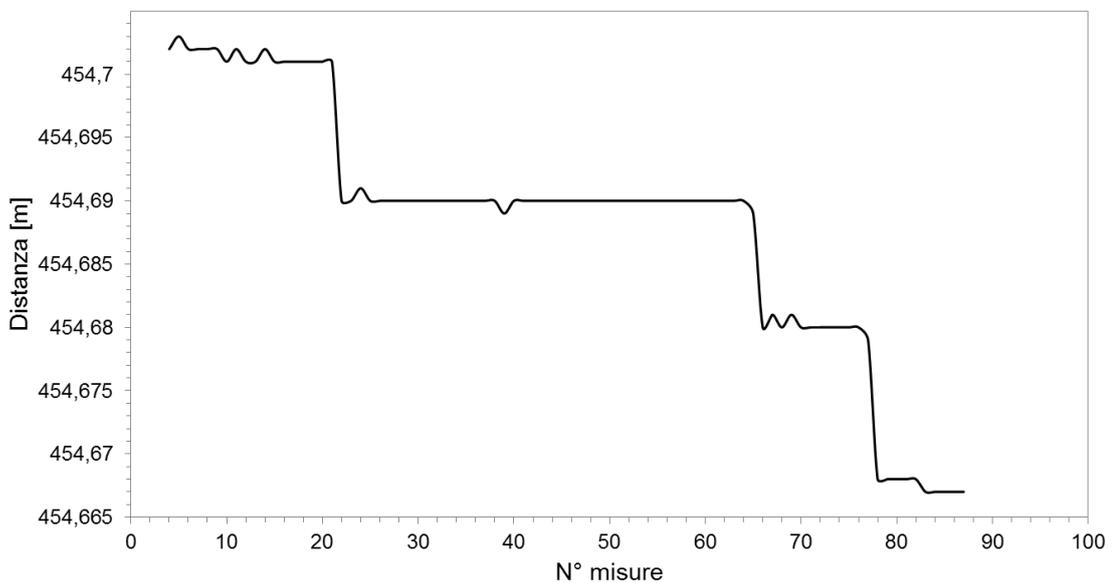


Figura 4.11- Distanza misurata dalla stazione totale durante la procedura di disgaggio.

Nel grafico in Figura 4.12 si riportano invece le misure in funzione dell’orario di misura. Le osservazioni fatte precedentemente valgono anche in questo caso, in più è importante ricordare gli intervalli di misura, i quali diminuiscono all’avvicinarsi del momento del distacco del masso. Il primo istante di misura riportato è alle 14:30, ora di inizio della sperimentazione, l’ultimo è, anche in questo caso, quello in cui la stazione non riesce a collimare più il prisma. Nel grafico sono distinti i due diversi intervalli di campionamento, attraverso le due linee tratteggiate verticali, il primo dalle 14:30 alle 14:34 in cui la misura viene effettuata ogni 30 secondi ed il secondo a partire dalle

14:34, in cui la misura viene effettuata ogni 5 secondi. Anche in questo caso i quattro gradini di carico sono facilmente individuabili.

Sebbene la stazione totale, in questo caso, non sia utile per seguire il masso nella sua traiettoria lungo la parete, è possibile notare come riesca a seguire bene e registrare tutte le spinte che il masso subisce e quindi permetta di descrivere la risposta del masso alla spinta imposta.

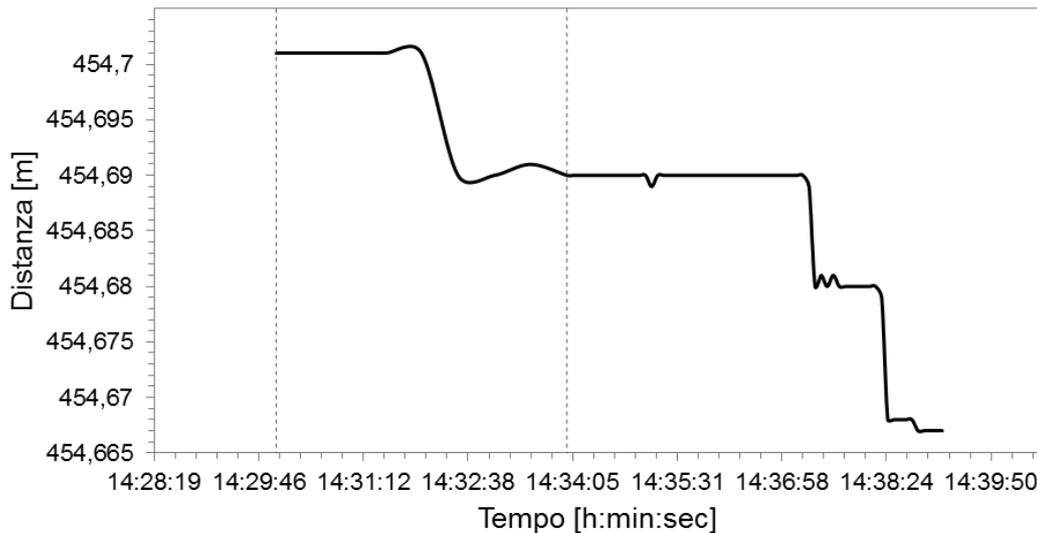


Figura 4.12- Distanza misurata dalla stazione totale in funzione del tempo durante la fase di disaggio.

Il secondo strumento utilizzato è l'estensimetro. Questo viene posizionato nella parete al di sopra del masso. In questo caso è importante osservare la differenza tra il posizionamento ottimale e quello effettivamente realizzato (Figura 4.13). A causa della limitata accessibilità alla nicchia di distacco, si ha l'impossibilità operativa di collocare lo strumento in prossimità del masso. Questo comporta che il cavo dell'estensimetro sia inclinato rispetto l'orizzontale e quindi la misura degli spostamenti si discosta da quella ottimale, ovvero la misura lungo la direzione orizzontale.



Figura 4.13- Posizionamento estensimetro.

Nella Figura 4.14 si riportano in ordinata gli spostamenti durante l'operazione di disgaggio.

Nella Figura 4.15 si riportano invece gli spostamenti compensati con la temperatura. Sebbene non in maniera immediata, come nel caso della stazione totale, è possibile notare quattro linee di tendenza discendenti che denotano i quattro step di carico imposti. Si può dedurre quindi che lo studio della risposta del masso al carico imposto è meno immediata e più difficoltosa rispetto a ciò che si è registrato con la stazione totale.

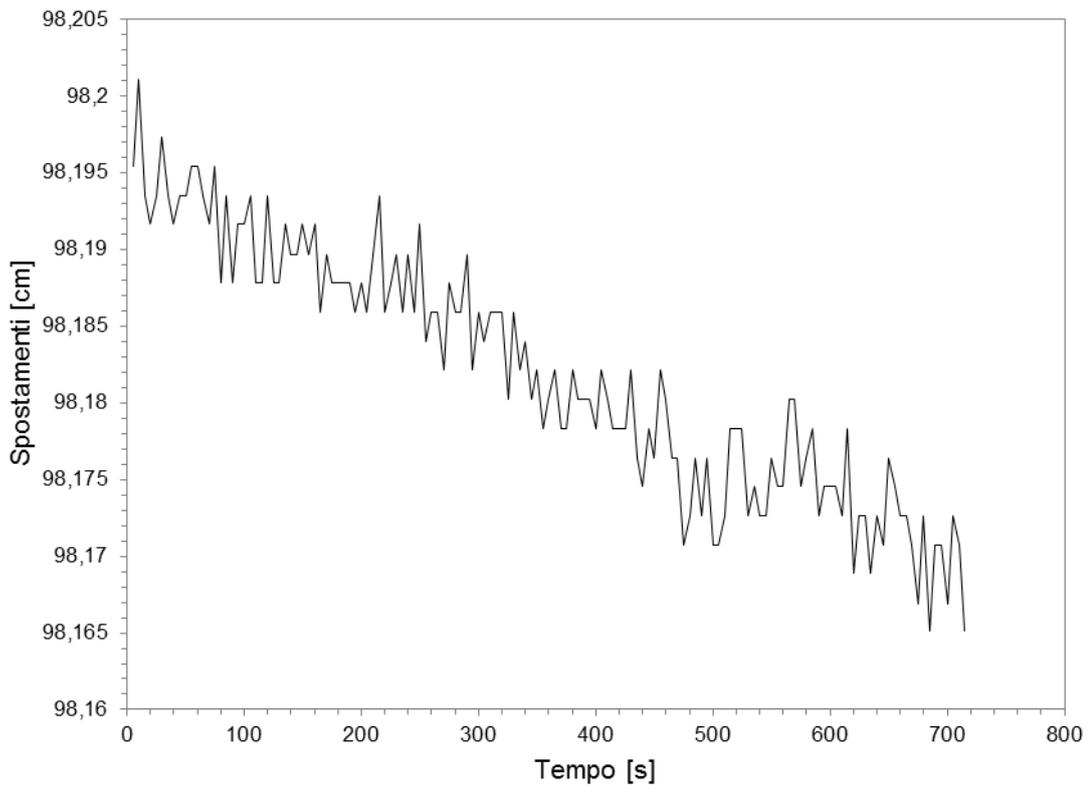


Figura 4.14- Spostamenti assoluti registrati dall'estensimetro durante il disaggio.

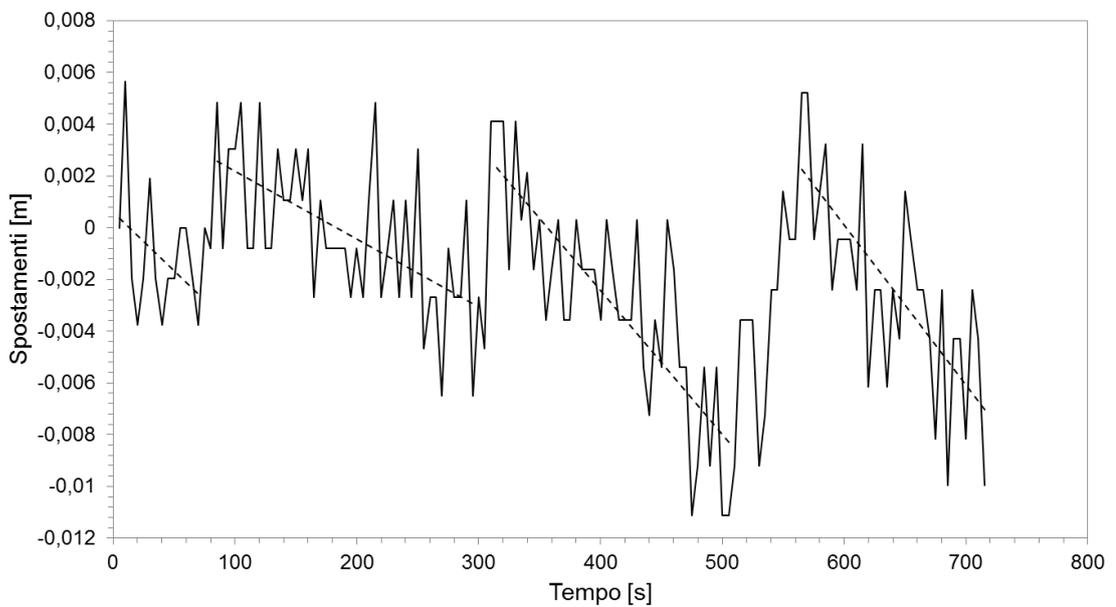


Figura 4.15- Misura compensata con la temperatura.

I dati riportati nei grafici sono quelli ottenuti durante la fase di disaggio. I dati riguardanti la fase precedente sono esclusi in quanto ritenuti poco significativi. Mentre si è riscontrata l'impossibilità di raccogliere i dati immediatamente successivi al disaggio, in quanto nel momento in cui il masso ha iniziato il suo movimento di caduta, si è verificata la rottura del cavo. Questo è facilmente osservabile nel grafico della Figura 4.16, nel quale vengono riportate le misure complete, il quale ha il tipico andamento di un cavo estensimetrico che ha subito la rottura. Nell'intervallo compreso tra 0 e 150 si hanno le misure che sono state riportate nel grafico di Figura 4.16, mentre a seguire si riscontrano ampi spostamenti, con un andamento che conferma appunto la rottura dello strumento.

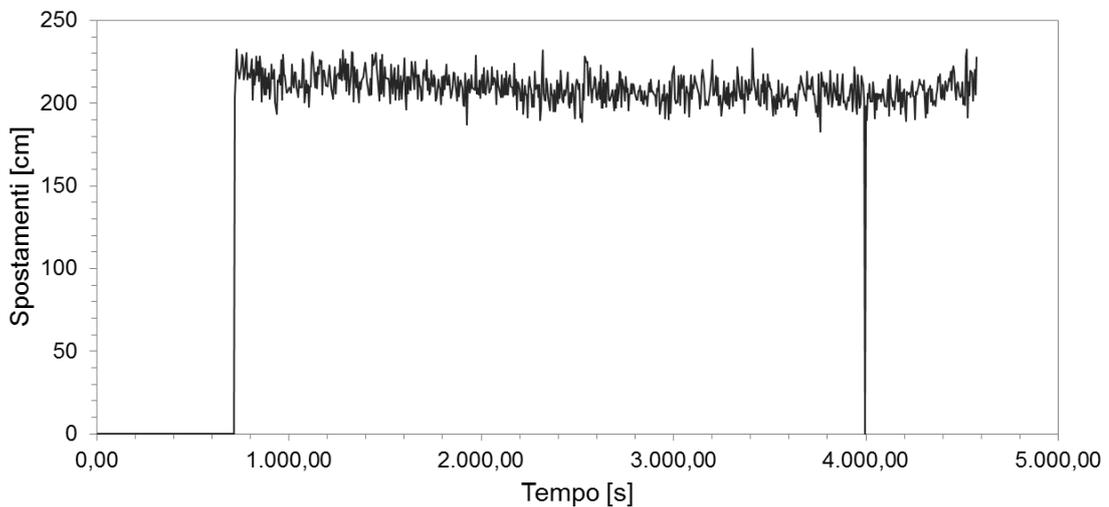


Figura 4.16- Misure compensate con la temperatura.

4.3. Analisi e ricostruzione delle traiettorie di caduta

Si procede con la realizzazione di uno studio successivo alle operazioni di disaggio delle traiettorie percorse dal masso. È possibile ricostruire quest'ultime mediante la creazione di un modello digitale del terreno.

La fase preliminare consiste nell'osservazione di materiale fotografico e video, con l'ausilio dei quali è possibile, seppur in maniera approssimata, individuare il percorso del masso, osservare i punti di impatto durante la caduta, i punti in cui ha subito diminuzioni di volume e disgregazione ed infine un possibile punto di arresto. La

problematica maggiore riscontrata, infatti, è proprio l'individuazione di quest'ultimo. Le difficoltà derivano dalla conformazione del sito: ai piedi della parete si ha la presenza dei detriti di falda dei massi precedentemente caduti, i quali si sono accumulati grazie alla presenza di una folta vegetazione che ne ha permesso l'arresto. Un'altra caratteristica del versante è infatti la presenza di vegetazione ad alto fusto, che separa il detrito di falda dalla strada sottostante e lo rende difficilmente accessibile. Sebbene sia difficile stabilire con esattezza il punto di arresto del masso, o meglio i punti di arresto dei blocchi in cui questo si è fratturato, è possibile fornirne una buona stima. Questo grazie alla ricostruzione delle traiettorie dei massi caduti in passato, alla presenza del blocco sul percorso sentieristico di cui si è parlato al paragrafo 4.2. e, in aggiunta, grazie al materiale fotografico e videografico a disposizione.

Per ricostruire le coordinate dei punti è stato utilizzato il Modello Digitale del Terreno 2005/2008 (aggregato) a passo 2 metri. Questo è dato dall'aggregazione del Modello edizione 2005 a passo 0,5 m e il Modello edizione 2008 a passo 2 m, per avere una copertura totale del sito di interesse. Quindi il DTM utilizzato è un dato cartografico ottenuto aggregando i dati ricavati da voli LIDAR effettuati in due distinte campagne di rilevamento:

- i voli laser scanner del 2005 e 2006 per la copertura territoriale della Valle Dora e degli affluenti;
- il volo laser scanner del 2008 per la copertura del restante territorio regionale.

Inoltre si ha disposizione l'ortofoto del territorio regionale del 2006. Il sistema di riferimento in cui sono disponibili le carte è UTM fuso 32 Nord – Datum geodetico Ed50.

Il software nel quale viene inserita la cartografia a disposizione è *Global Mapper*, il quale viene utilizzato per la creazione del modello altimetrico e con il quale è possibile costruire un modello 3D, da cui ricavare le sezioni utili per l'individuazione dei punti di interesse.

Per prima cosa si procede con l'individuazione delle coordinate della posizione iniziale del masso (Figura 4.17). Questa viene individuata mediante triangolazione di punti di coordinate note, riportate nella Tabella 1.2:

- Vertice trigonometrico fisso, dato dalla croce del campanile del paese di Antey-Saint-André;
- Stazione totale utilizzata durante la sperimentazione. Inoltre, in questo caso, si conoscono anche la distanza misurata e l'angolo orizzontale.

Tabella 4.2- Coordinate dei punti noti

	E	N	Quota
Stazione totale	390523,29 m	5074720,08 m	1033,9 m
Vertice	390683,49 m	5073512,14 m	1095,07 m

Quindi è possibile conoscere la distanza tra stazione totale e vertice fisso. Una volta nota questa, mediante la distanza misurata tra stazione e prisma e l'angolo orizzontale si ricava la posizione iniziale del masso.

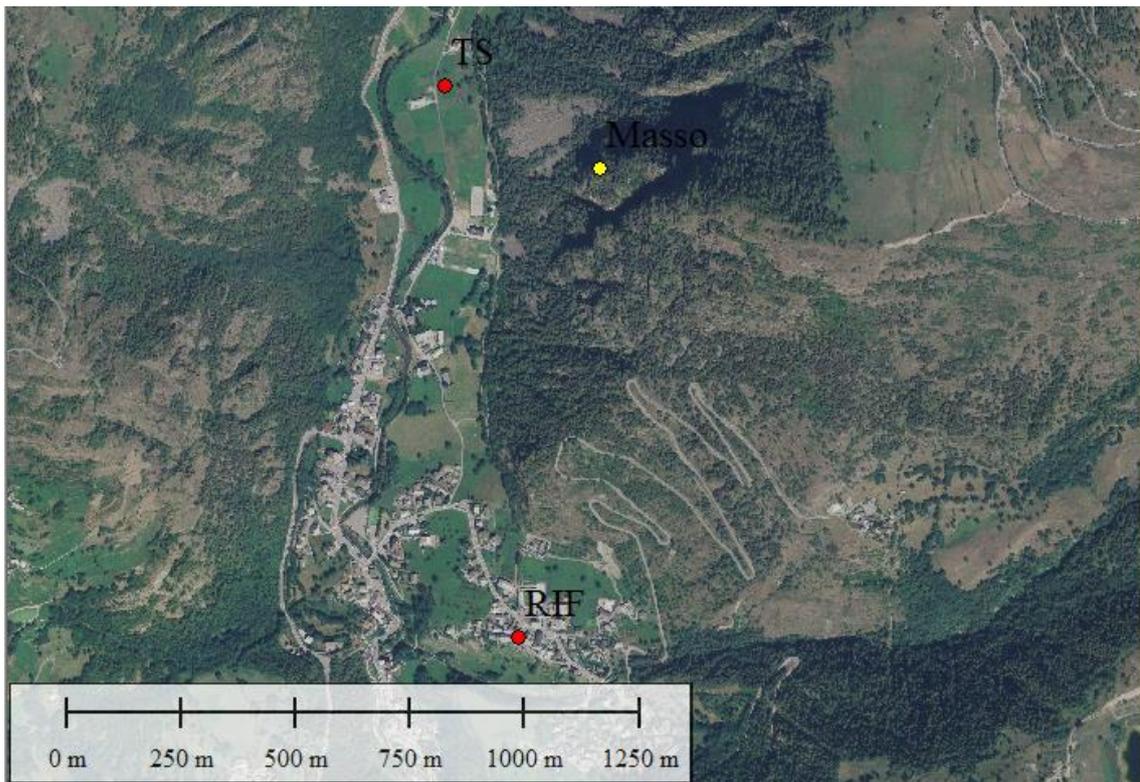


Figura 4.17- Posizione iniziale masso mediante ortofoto (Global Mapper).

Per quanto riguarda i punti intermedi e in particolare i punti di impatto, questi sono stati ricavati dall'osservazione del materiale fotografico a disposizione, come precedentemente descritto. Le difficoltà maggiori si riscontrano nel distinguere le diverse traiettorie percorse. Nel momento in cui il masso, per impatto con il pendio, si divide in blocchi di volume minore, i quali seguiranno direzioni indipendenti tra di loro.

In primo luogo si determina la traiettoria principale, seguita dal masso di dimensioni maggiori. In definitiva sono stati selezionati cinque punti, il punto di partenza in giallo, il punto di arrivo in blu e i punti di impatto in verde, riportati nella Figura 4.18. A questo punto è possibile individuare una sezione che passa per i punti, in modo da poter valutare le quote successive del masso in funzione della distanza progressiva percorsa (Figura 4.19).

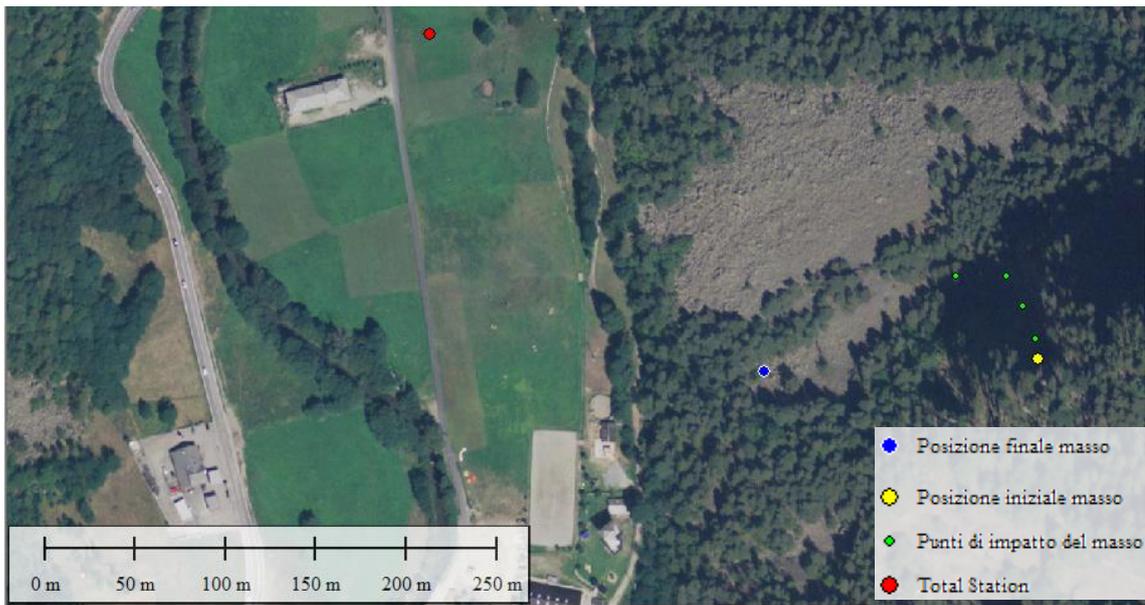


Figura 4.18- Posizioni iniziale, intermedie e finali del massa nella traiettoria principale (Global Mapper).

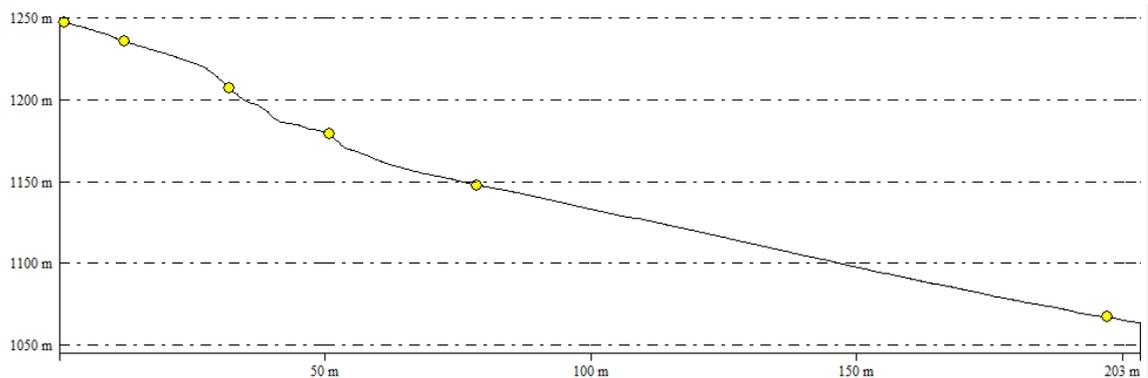


Figura 4.19- Sezione del versante ottenuta con Global Mapper.

La sezione così ottenuta presenta delle limitazioni: il modello altimetrico a disposizione infatti non è rappresentativo del profilo attuale. I DTM a disposizione come precedentemente detto risalgono agli anni 2005, 2008 e il versante ad oggi ha subito diverse modifiche, in particolar modo in corrispondenza della nicchia di distacco. A tal proposito è possibile un confronto grafico del modello 3D ottenuto con Global Mapper con una foto scattata al momento del disaggio (Figura 4.20).



Figura 4.20- Confronto modello 3D con versante reale.

Questo non permette di valutare in maniera ottimale il percorso del masso, in particolar modo i primi punti di impatto. Infatti il movimento iniziale del blocco è stato quello di caduta libera, soggetto esclusivamente alla forza di gravità, a cui sono seguiti due impatti non individuabili nella sezione di Figura 4.19. Non potendo quindi far riferimento alla sezione ottenuta mediante modello altimetrico del terreno, si procede con la creazione di una sezione che segue la direzione di massima pendenza, unendo le quote in corrispondenza delle quali si è registrato l’impatto del masso (Figura 4.21).

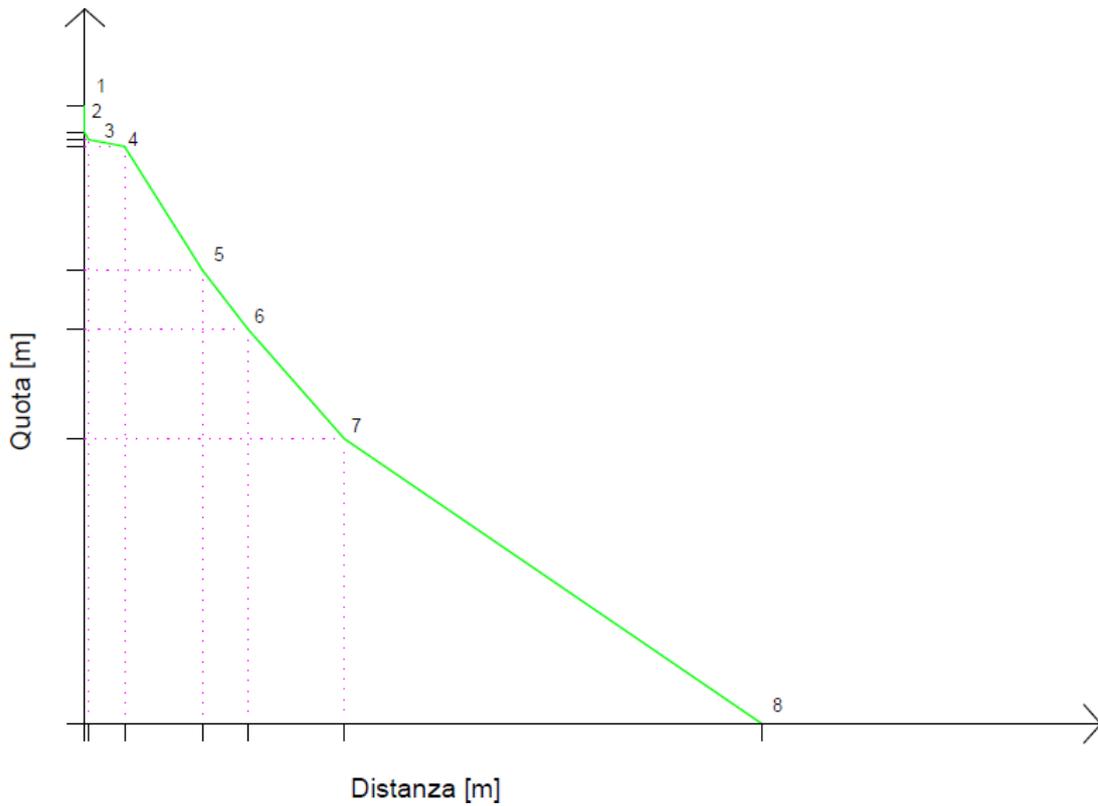


Figura 4.21- Profilo di massima pendenza.

In conclusione si riportano in tabella 4.3 le distanze progressive e le quote degli otto punti individuati:

Tabella 4.3- Coordinate dei punti traiettoria principale.

Punti	x [m]	z [m]
1	0	1247
2	0	1239
3	1	1238
4	11.4	1235
5	34	1199
6	47	1182
7	75	1150
8	196	1067

Il masso, durante il moto, a causa degli impatti ha subito delle riduzioni di volume e frantumazioni. A questo proposito si individuano anche le traiettorie secondarie dei blocchi in cui si è diviso il masso. In particolare, a partire dall'osservazione del

materiale fotografico, si individuano due punti dove il masso ha subito significative modifiche del volume: il primo a circa 1239 m, il secondo a circa 1235 m. A partire da questi due punti si è cercato di seguire le traiettorie dei blocchi di dimensioni minori. Nella Figura 4.22 si riportano due traiettorie: la principale, di cui si è parlato precedentemente, in rosso e la secondaria in blu

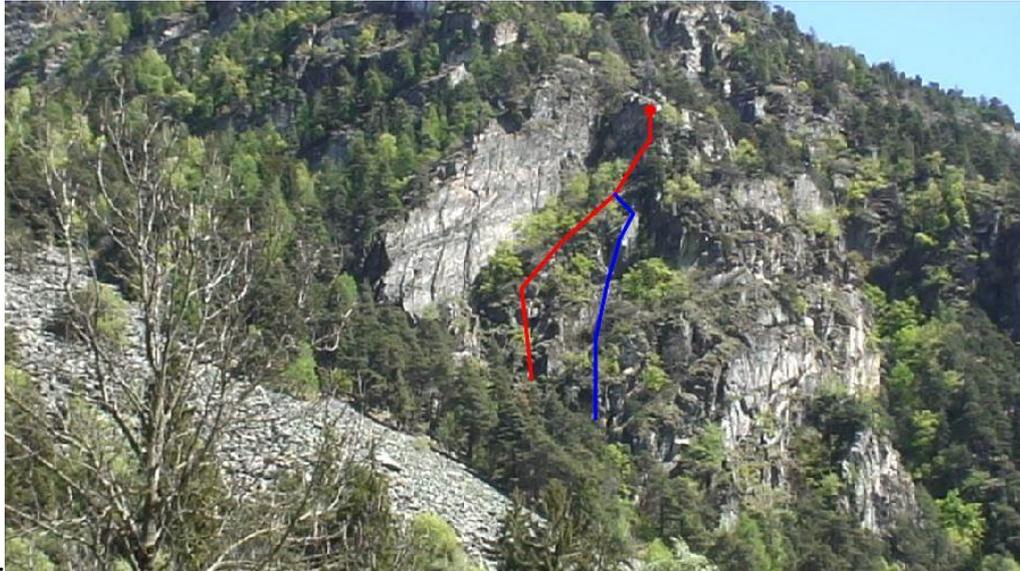


Figura 4.22- Schematizzazione delle traiettorie dei massi.

Si procede quindi con la creazione della sezione che permette di individuare la seconda traiettoria (Figura 4.23), attraverso punti le cui coordinate vengono riportate nella Tabella 4.4.

Tabella 4.4- Coordinate dei punti traiettoria secondaria.

Punti	x [m]	z [m]
1	0	1235
2	2	1230
3	9	1223
4	9	1219
5	9	1215
6	22	1197
7	42	1148
8	156	1067

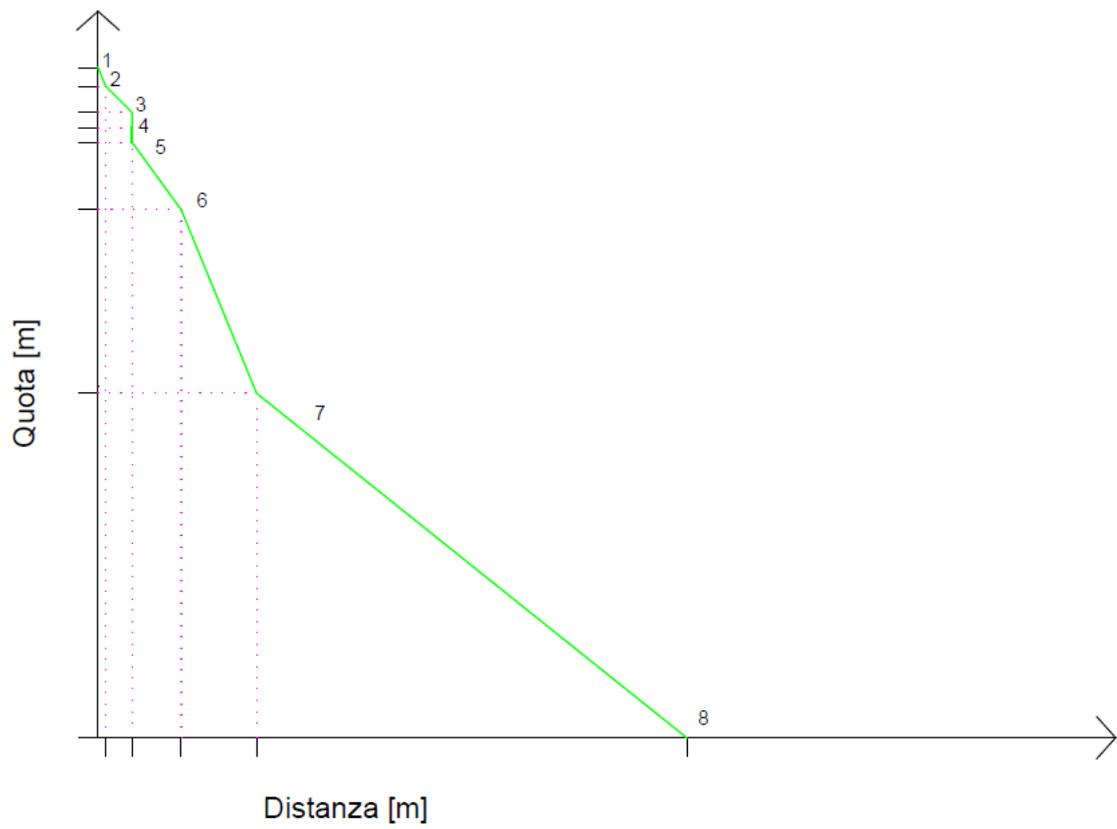


Figura 4.23- Profilo traiettoria secondaria.

CAPITOLO 5

SIMULAZIONE DELLA CADUTA MASSI CON ROCFALL E ROCKYFOR3D

Introduzione

In questo capitolo vengono applicati modelli cinematici che consentono lo studio del fenomeno di crollo affrontato nel Capitolo 4. I software utilizzati sono RocFall (Rocscience) e Rockyfor3D (ecorisQ). Inizialmente si procede con la costruzione di un modello bidimensionale, che permette lo studio del percorso dei blocchi lungo una sezione verticale, individuata in corrispondenza delle traiettorie principali percorse dal masso durante la fase di caduta. Nella seconda parte, mediante l'utilizzo di Rockyfor3D si costruisce un modello tridimensionale. Il confronto dei risultati ottenuti permette di valutare i possibili fenomeni, la loro intensità e i possibili parametri che caratterizzano il terreno del sito oggetto di studio.

5.1. Analisi del fenomeno mediante il metodo Lumped mass

Il software di calcolo utilizzato è un programma di analisi statistica che permette lo studio di un pendio soggetto a fenomeni di crollo e quindi la valutazione del rischio di instabilità per questi fenomeni. È possibile determinare, per l'intero pendio, l'energia che si sviluppa durante il crollo, le velocità raggiunte, le altezze di rimbalzo e i punti

finali delle traiettorie. Nel procedere con l'analisi, è necessario definire la geometria del versante, il materiale che lo caratterizza e le condizioni iniziali del moto.

Il **profilo del versante** nelle analisi bidimensionali è una sequenza di segmenti, i quali rappresentano il percorso più probabile del masso lungo il versante. Questi si ottengono attraverso:

- Dati storici (eventi di cui si conosce la traiettoria);
- Linee di massima pendenza tra due isoipse successive;
- In base alla morfologia del versante;
- Analisi dinamica di caduta massi in 3D.

Inoltre, è importante considerare che il percorso dei blocchi nella realtà è influenzato da diversi fattori, tra i quali:

- Morfologia del versante;
- Condizioni delle superfici dei versanti;
- Caratteristiche meccaniche del suolo e del blocco;
- Cinematismo che in ogni tratto di versante possiede il blocco.

Il pendio viene disegnato considerando le coordinate di punti noti, ricavate dalle sezioni riportate nel Capitolo 4. Nel capitolo si analizzano due sezioni differenti, considerando sia la traiettoria principale sia la secondaria individuate nel capitolo precedente.

Una volta nota la geometria, si definiscono le caratteristiche dei **materiali** costituenti il pendio. Il tratto di analisi si presenta con le stesse caratteristiche, ai piedi della parete rocciosa in cui si individua la nicchia di distacco, si riscontra la presenza dei detriti e della folta vegetazione. Per ogni materiale si devono definire nel software il coefficiente di restituzione normale e tangenziale, l'angolo di attrito e la rugosità del pendio. Per definire i primi tre, si è fatto riferimento ai valori presenti in letteratura: a partire da questi, i valori definitivi sono stati ricavati mediante back analysis. La rugosità è utilizzata per modellare le variazioni locali della geometria, in una scala misurata tra due vertici successivi. Il valore medio è calcolato direttamente dalla geometria del pendio, per questo motivo non è necessario inserire un valore specifico nella finestra di dialogo. È comunque importante ricordare, nella scelta dei parametri, che i massi sono

ridotti a singoli punti e ogni effetto legato alla forma e alla dimensione viene trascurato. Per questo motivo, qualsiasi valore venga scelto inizialmente, si deve procedere con una calibrazione dei parametri in modo tale che il modello sia il più possibile rappresentativo del fenomeno reale. In definitiva sono stati scelti i materiali riportati nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1- Parametri dei materiali scelti.

	Talus cover	σ	Talus with vegetation	σ
Rn	0.32	0.04	0.3	0.04
Rt	0.82	0.04	0.8	0.04
ϕ [°]	30	2	35	2

Infine, si definiscono le **condizioni iniziali**. In primo luogo è importante identificare la nicchia di distacco e quindi aree da cui si possono staccare i blocchi, facendo riferimento a:

- Fenomeni avvenuti nel passato, per i quali sia nota l'area di distacco;
- Osservazioni sulla morfologia del versante per l'individuazione dei tratti di parete maggiormente inclinati;
- Osservazione per individuare eventuali segni indicatori di volumi di roccia distaccatisi.

Quando è possibile fare analisi di tipo probabilistico, la nicchia può essere inserita in due modi:

- Nicchia puntuale, quindi si individua un solo punto;
- Nicchia lineare, si individua un segmento lungo il profilo dal quale si può distaccare il masso. Il segmento rappresenta una distribuzione uniforme di punti sorgente, estratti con il metodo Montecarlo.

In RocFall la nicchia di distacco viene individuata mediante l'inserimento di un "Point seeder" al quale vengono attribuite le proprietà per la definizione delle condizioni iniziali, in particolare si definiscono:

- Velocità angolare, il cui valore iniziale è in generale molto piccolo, prossimo a zero. L'idea di base è che la maggior parte dei massi parta da fermo e nel corso del movimento lungo il pendio inizi a ruotare abbastanza velocemente;
- Velocità orizzontale e verticale, le quali vengono considerate nulle nel caso in cui si ipotizzi che il masso parta da fermo;
- Scelta del numero di simulazioni, il cui valore deve essere tale per cui un numero maggiore non alteri il risultato. È stato scelto un valore pari a 100.

5.1.1. Analisi delle traiettorie

In questo paragrafo si analizzano le traiettorie già evidenziate nel capitolo 4, le quali sono caratterizzate da una geometria del versante diversa, ma soprattutto da condizioni iniziali ben distinte.

Per quanto riguarda la **traiettoria principale**, il point seeder che identifica la nicchia di distacco ha coordinate 0, 1246. La massa viene calcolata considerando un volume iniziale di 15 m³ e un peso dell'unità di volume $\gamma = 27\text{kN/m}^3$, mentre le velocità iniziali sono poste pari a zero, considerando che il masso parte da fermo (Tabella 5.2).

Tabella 5.2- Condizioni iniziali del blocco lungo la traiettoria principale.

V_h [m/s]	0
V_v [m/s]	0
ω [rad/s]	0
m [Kg]	40500
simulazioni	100

Nella Figura 5.1 si riporta il profilo (in verde sono campite le zone con vegetazione) e il risultato dell'analisi.

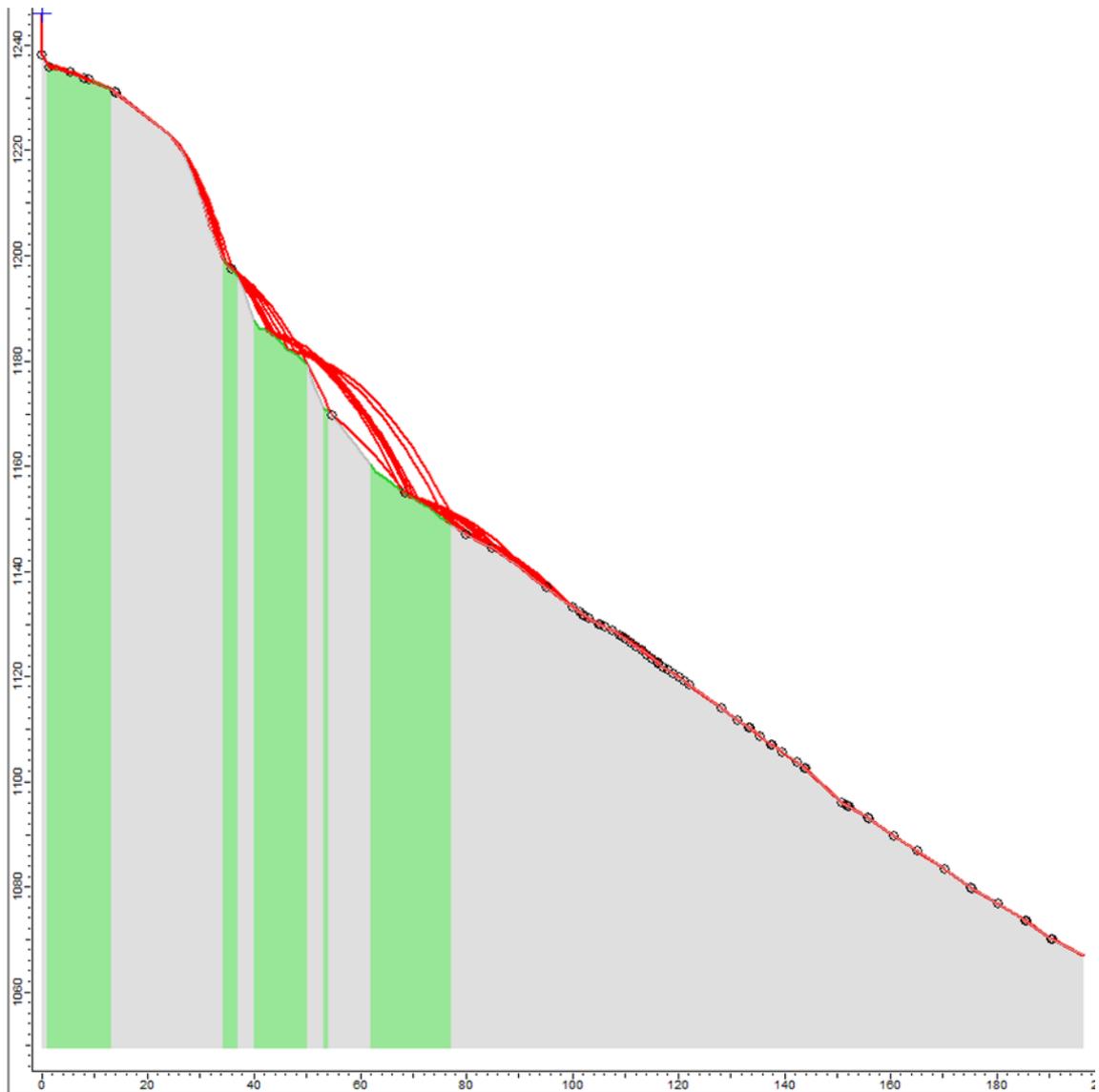


Figura 5.1- Profilo e traiettorie (RocFall).

In rosso sono riportate tutte le possibili traiettorie. È possibile vedere come il masso inizialmente percorre un tratto verticale che rappresenta la fase iniziale di caduta libera, a cui seguono successive fasi di rimbalzo e rotolamento lungo il pendio. In nero sono rappresentati i punti di impatto della traiettoria considerata come più probabile.

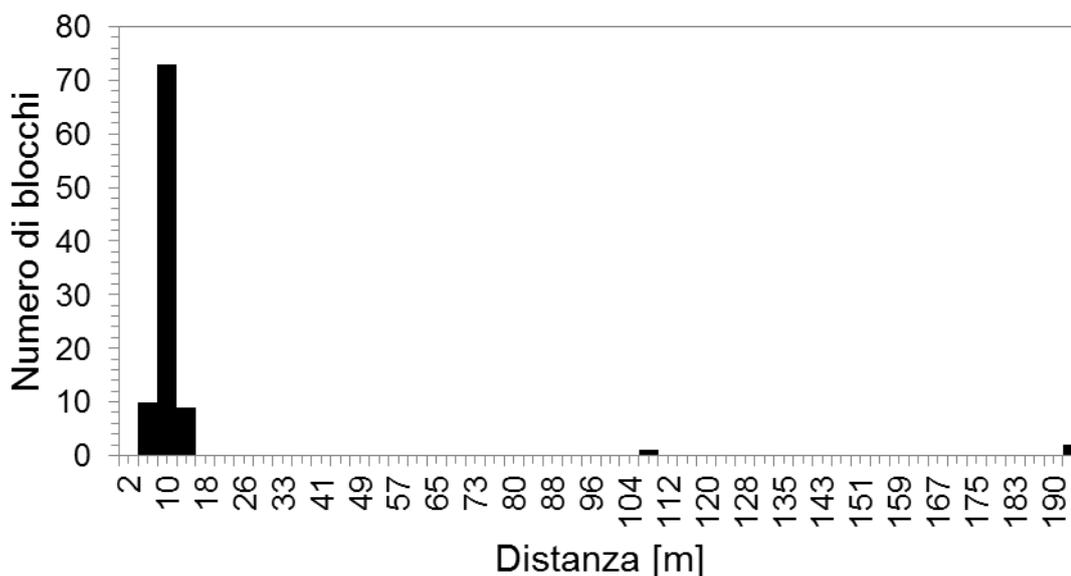


Figura 5.2- Distribuzione dei punti di arresto lungo il pendio.

Il grafico riportato nella Figura 5.2 mostra i punti di arresto dei blocchi. In ascissa viene riportato il percorso progressivo del blocco e in ordinata il numero di blocchi arrestati nel punto. È possibile osservare come la maggior parte di essi si arresta nella prima parte del percorso, ai piedi della parete rocciosa verticale, mentre altri blocchi continuano il percorso di caduta fino ad arrivare a valle del versante a circa 195 m; nella Tabella 5.3 sono riassunti i risultati ottenuti.

Tabella 5.3- Numero di blocchi arrestati e corrispondente posizione.

Distanza [m]	Numero di blocchi
6	10
10	73
14	9
108	1
194	2

Si riportano a questo punto i risultati ottenuti in termini di energia e velocità dei blocchi lungo il pendio, rappresentati rispettivamente nella Figura 5.4 e 5.5. Nel tratto iniziale entrambe aumentano fino a raggiungere il picco in corrispondenza dell'altezza di caduta massima (Figura 5.3).

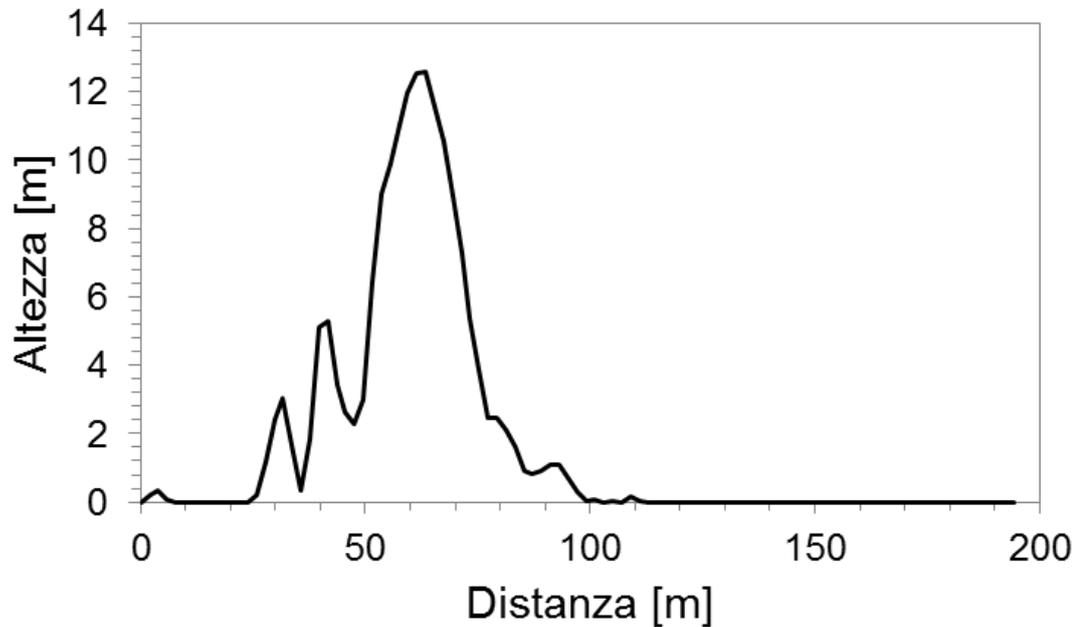


Figura 5.3- Altezza di caduta dei blocchi lungo il pendio.

Dopo il picco si ha una diminuzione delle grandezze, in particolare l'energia cinetica (Figura 5.4) tende ad annullarsi e la velocità (Figura 5.5) tende a diminuire, in corrispondenza dell'ultimo tratto, risultato coerente con quanto aspettato dato che l'altezza dei rimbalzi è praticamente trascurabile e il moto del blocco può essere considerato come di scivolamento.

Nella Tabella 5.4 si riportano le ascisse critiche, ovvero quelle in cui si riscontrano i valori massimi delle grandezze.

Tabella 5.4- Valori massimi registrati lungo la traiettoria principale.

Grandezza	x [m]	Valore massimo
Energia cinetica [kJ]	77	14473
Velocità traslazionale [m/s]	77	26.5
Altezza di rimbalzo [m]	63	12.6

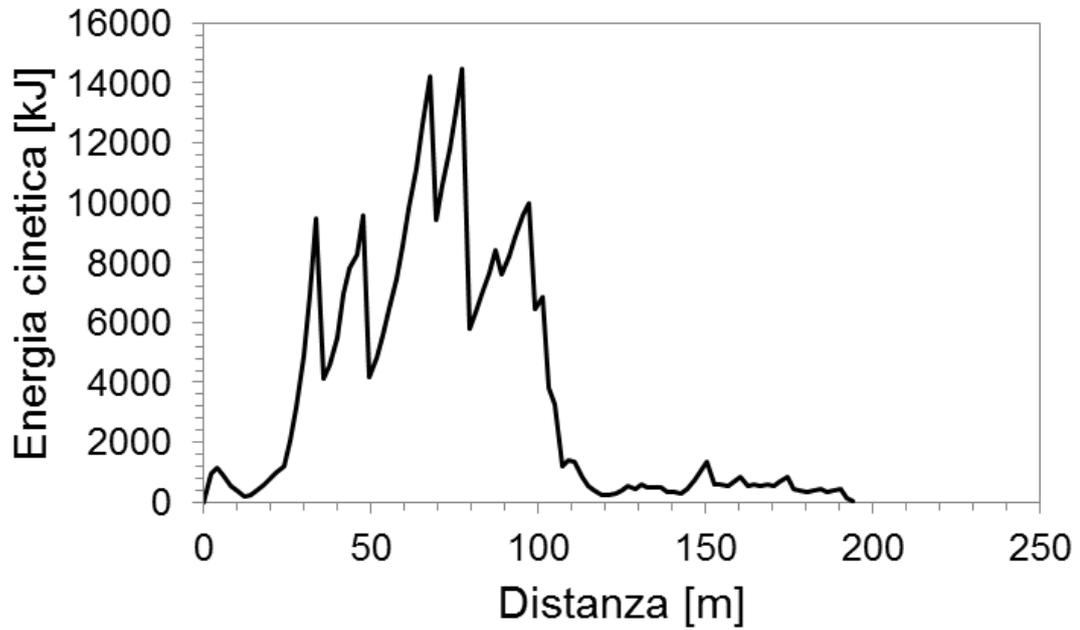


Figura 5.4- Energia cinetica totale lungo il pendio.

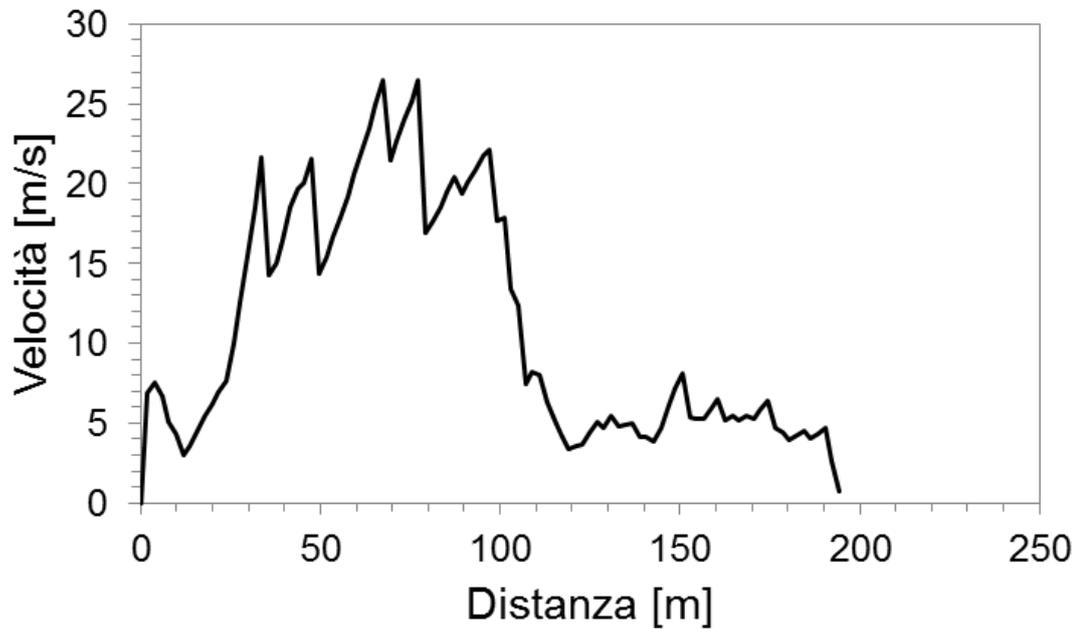


Figura 5.5- Velocità traslazionale lungo il pendio.

Nella **traiettoria secondaria** le condizioni iniziali, sono definite in corrispondenza dell'ascissa in cui il masso della prima traiettoria impatta dividendosi in più blocchi,

ovvero $x = 13$ m. Il point seeder in questo caso ha coordinate 0, 1235, il blocco non parte da fermo, ma si considerano come valori iniziali quelli ricavati dalla traiettoria principale in corrispondenza dell'ascissa pari a 13 m e si considera una massa ridotta, per tenere appunto in conto della frantumazione del masso (Tabella 5.5).

Tabella 5.5- Condizioni iniziali del blocco lungo la traiettoria secondaria.

Vh [m/s]	3.5
Vv [m/s]	0
ω [rad/s]	2.24
m [Kg]	20000
simulazioni	100

Come per la traiettoria principale, si riporta nella Figura 5.6 il pendio e le possibili traiettorie in rosso e i punti in cui impatta il blocco in nero. Anche in questo caso si riporta il numero dei massi arrestati ad una determinata distanza (Figura 5.7).

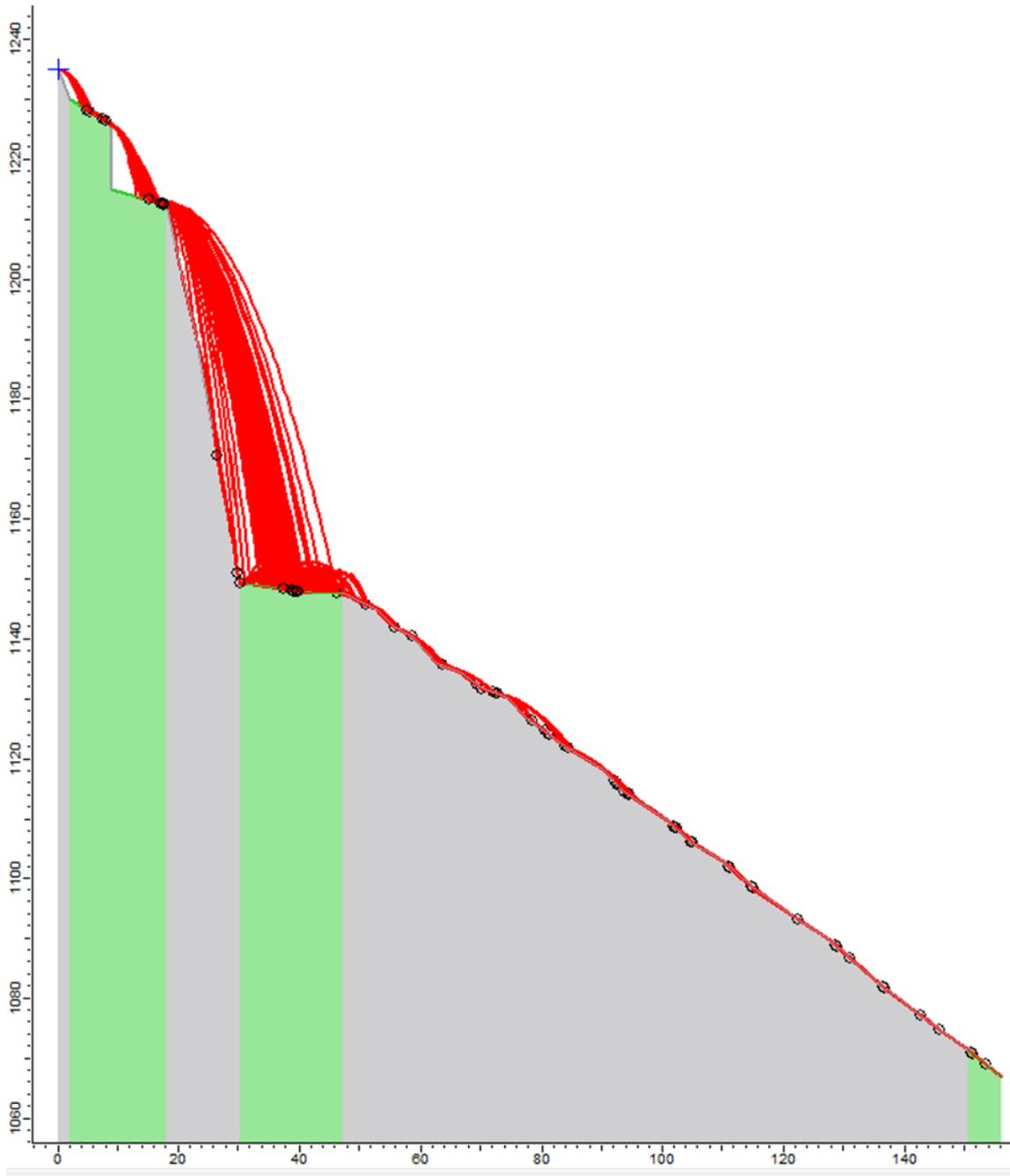


Figura 5.6- Profilo e traiettorie (RocFall).

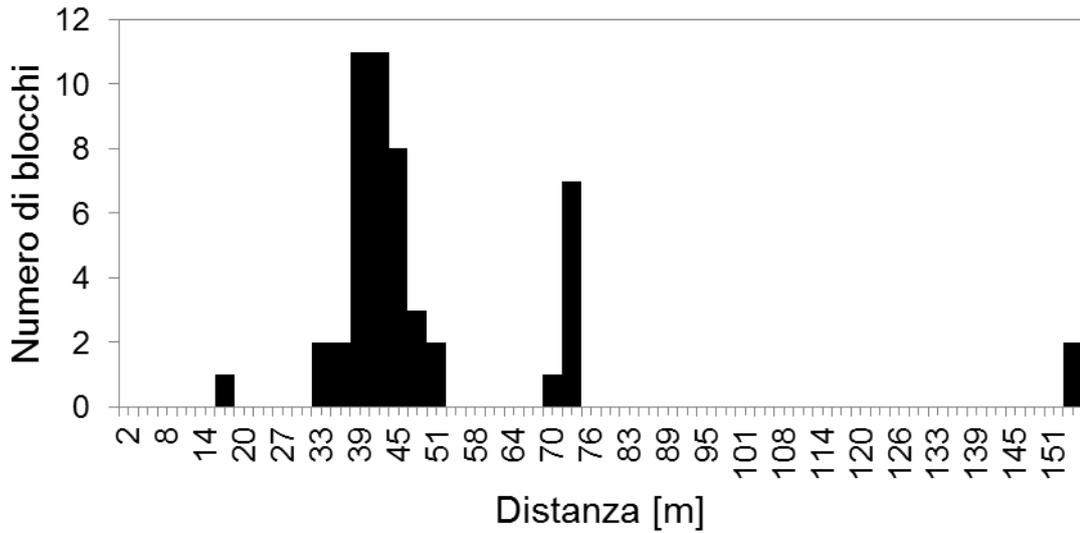


Figura 5.7- Distribuzione dei punti di arresto lungo il pendio.

Rispetto alla traiettoria principale è possibile osservare una distribuzione più uniforme dei blocchi lungo il percorso, la maggior parte si concentra comunque ai piedi della scarpata verticale. Nella Tabella 5.6 vengono riassunti i risultati.

Tabella 5.6- Numero di blocchi arrestati e corrispondente posizione.

Distanza [m]	Numero di blocchi
17	1
33	2
36	2
39	11
42	11
45	8
48	3
51	2
70	1
73	7
154	2

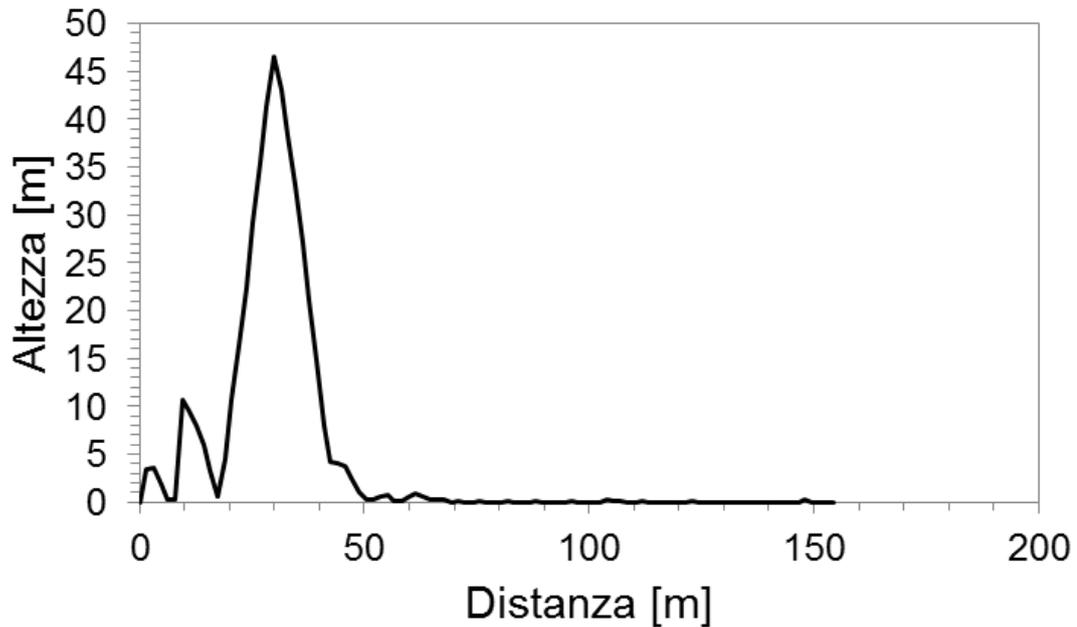


Figura 5.8- Altezza di caduta dei blocchi lungo il pendio.

L'altezza di caduta massima si ha intorno ai 30 metri, in corrispondenza della scarpata verticale. In corrispondenza di essa si hanno i valori massimi di velocità ed energia cinetica, i cui andamenti sono rappresentati nelle Figure 5.10 e 5.9 rispettivamente. L'andamento inizialmente crescente fino a circa 30 m e poi decrescente, è caratterizzato da picchi in corrispondenza dei punti dove il blocco rimbalza. Nel tratto iniziale i tre picchi principali sono ben distinti, infatti nella prima parte del percorso, come si può vedere nella Figura 5.6, il moto del blocco è principalmente di caduta libera. Nella parte finale del percorso, i picchi non sono ben distinguibili tra di loro, in quanto gli impatti del blocco con il pendio, in corrispondenza dei quali si registrano gli aumenti di energia cinetica, sono molto più frequenti a discapito delle altezze di rimbalzo e quindi delle fasi di caduta libera.

Nella Tabella 5.7 si riportano i valori massimi delle grandezze ottenute e le corrispondenti ascisse.

Tabella 5.7- Valori massimi registrati lungo la traiettoria secondaria.

Grandezza	x [m]	Valore massimo
Velocità traslazionale [m/s]	30	46.5
Energia cinetica [kJ]	37	12554
Altezza di rimbalzo [m]	37	30

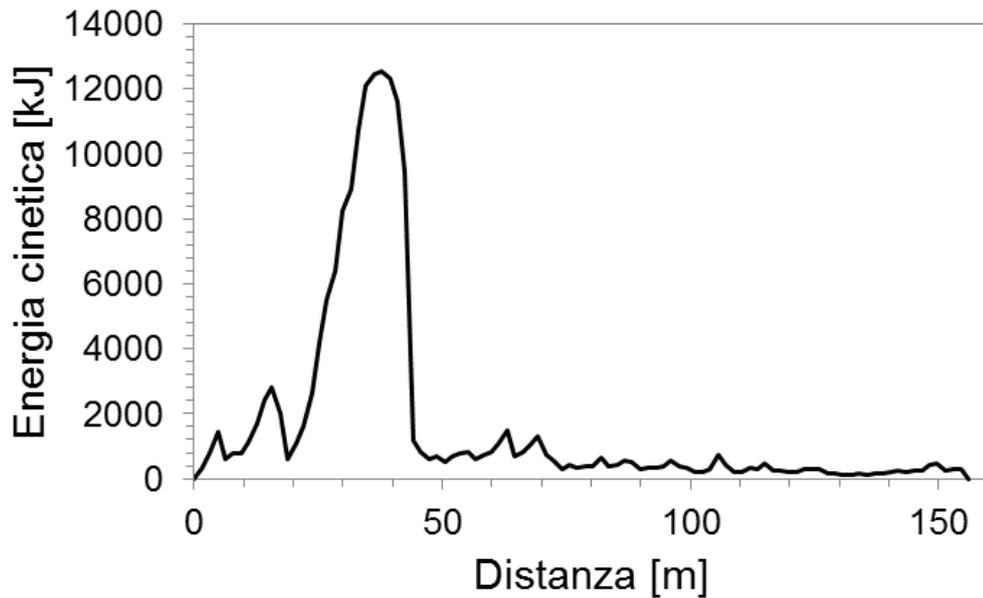


Figura 5.9- Energia cinetica totale lungo il pendio.

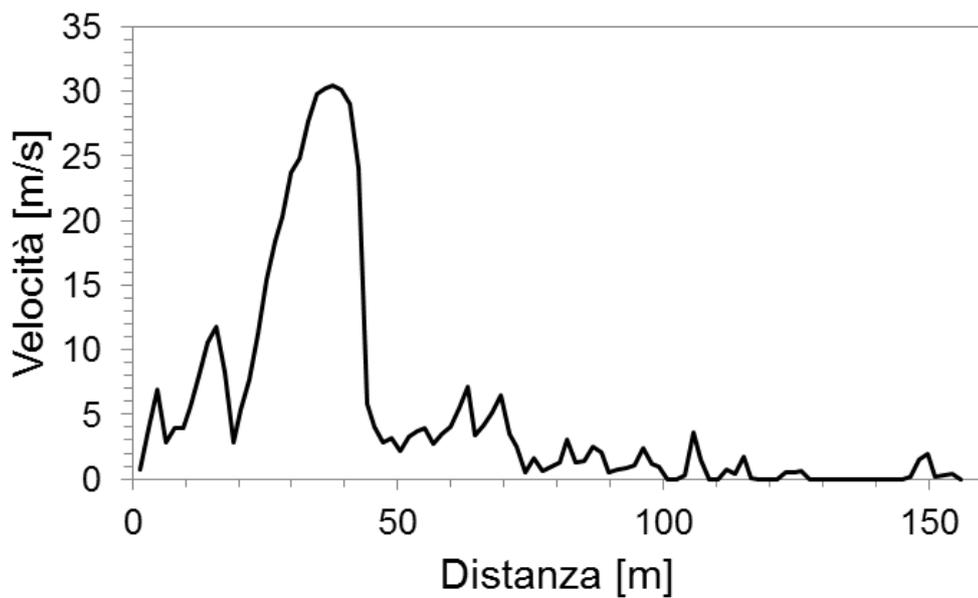


Figura 5.10- Velocità traslazionale lungo il pendio.

5.1.2. Vantaggi e limitazioni del metodo Lumped mass

Il vantaggio principale dell'utilizzo di questo metodo sta nella facilità di conoscere i punti di impatto. Infatti, nel momento in cui è nota la traiettoria del masso e quindi la sezione 2D del pendio, è possibile trovare in maniera praticamente esatta i punti in cui rimbalza il masso. Il punto di partenza per una corretta rappresentazione della realtà è la buona conoscenza delle caratteristiche e della geometria del versante. Il programma consente di avere buoni risultati anche con un numero di simulazioni ridotto, questo permette di ridurre notevolmente i tempi computazionali.

Il problema principale riscontrato è l'impossibilità di rappresentare fedelmente la traiettoria del masso. Il programma permette di esprimere la traiettoria in funzione della quota e della distanza progressiva percorsa, considerando solo i rimbalzi del blocco lungo il pendio. Questa è una forte limitazione soprattutto per un fenomeno come la caduta massi, dove i percorsi seguiti sono caratterizzati da una forte incertezza e il percorso rettilineo si allontana di gran lunga dalla realtà. A questo proposito, risultano molto più utili i programmi 3D, nei quali si può tener conto della terza dimensione, che nel caso considerato è determinante ai fini di una modellazione numerica vicina alla realtà.

Inoltre, un altro problema riscontrato, è l'utilizzo di una massa puntiforme, la quale non permette di tener conto delle variazioni durante il percorso. Quanto osservato durante la sperimentazione e a posteriori attraverso il materiale fotografico non è in questo modo accuratamente esprimibile. Si è osservato infatti, che il masso ha subito diversi impatti e quindi frantumazioni e riduzioni di volume, attraverso RocFall questo è stato espresso andando a considerare due traiettorie distinte. La prima rappresenta il percorso principale seguito dal masso, dalla posizione iniziale, occupata prima del disgreggio, alla posizione finale ai piedi del pendio, questo non ci permette di tener conto della variazione della massa.

Una parte delle limitazioni esposte può essere superata andando ad utilizzare software che permettano di considerare le tre dimensioni, in modo da poter valutare non solo la

distanza progressiva percorsa dal blocco lungo una singola sezione, ma tutte le possibili traiettorie dei blocchi all'interno del sito di interesse.

5.2. Simulazione del fenomeno con Rockyfor3D

Il software utilizzato per la simulazione nelle tre dimensioni è Rockyfor3D, il quale calcola le traiettorie di caduta per i singoli massi. Il modello, dato il forte legame con le condizioni presenti in sito, è fisicamente basato per quanto riguarda il calcolo del processo di caduta dei massi. I parametri sono determinati in maniera stocastica, date le elevate incertezze connesse alla determinazione dei parametri. Affinché i risultati possano essere ritenuti attendibili, i dati di ingresso richiesti devono essere coerenti e ben rappresentativi della realtà sul terreno.

La simulazione della traiettoria di caduta avviene attraverso il calcolo di una sequenza di cadute libere in aria, descritte dalla legge parabolica, di rimbalzi sulla superficie del pendio e, qualora richiesto, di urti contro gli alberi. Il rotolamento è rappresentato come una sequenza di rimbalzi a piccola distanza mentre lo scivolamento non viene modellato.

I dati di ingresso consistono in un set di immagini raster ASCII in formato ESRI, che definiscono la topografia e le caratteristiche della superficie del pendio, verranno approfonditi nei paragrafi successivi.

Per capire il funzionamento del programma e la scelta dei dati di input, è importante focalizzare l'attenzione su alcune componenti del modello. È possibile scegliere tra varie tipologie la **forma del blocco**: parallelepipedo, ellissoidale, sferica oppure discoidale. Il calcolo del volume e del momento d'inerzia avviene sulla base dei tre diametri d_1 , d_2 e d_3 definiti. In particolare, per calcolare la posizione, il rimbalzo e l'urto viene sempre usata una forma sferica che assume due diversi diametri: il più piccolo dei tre per calcolare se avviene un urto con gli alberi, mentre, per calcolare le perdite di energia durante l'impatto con il terreno, viene assunto come diametro la media tra i due diametri maggiori. Le altre forme così come gli effetti espliciti della forma del blocco sulla direzione di caduta non vengono presi in considerazione.

La **caduta libera** viene calcolata considerando il moto parabolico uniformemente accelerato, all'intersezione con la topografia 3D si determinano la posizione e la velocità del blocco. Rockyfor3D simula la traiettoria tridimensionale calcolando l'evoluzione della posizione lungo i tre assi x, y e z, dove x corrisponde alla direzione E-O, y alla direzione N-S e l'asse z alla direzione verticale. Sulla base di queste coordinate la traiettoria viene collegata alle mappe raster di input e output.

Durante la fase di **rimbalzo sulla superficie**, la velocità in ingresso sul piano orizzontale e sul piano verticale vengono convertite rispettivamente in velocità in ingresso normale V_n e velocità in ingresso tangenziale V_t rispetto alla pendenza locale. I parametri richiesti per il calcolo sono il coefficiente di restituzione normale (R_n), il diametro del blocco (m), massa del blocco (Kg) e velocità del blocco (m/s), inoltre vengono utilizzate due costanti k, per il calcolo della forma del blocco sferico e B, che indica la compressibilità del materiale su cui avviene l'impatto.

Utilizzando soluzioni analitiche invece di iterazioni temporali ad ogni step, è sempre nota l'esatta posizione del blocco. Questo permette di calcolare sia la posizione dell'**impatto con un albero** degli alberi, sia la sua influenza sulla dissipazione di energia durante tale impatto.

Ultimo aspetto da prendere in considerazione è la **direzione di caduta** del blocco, determinata inizialmente dall'esposizione della cella sorgente. In seguito varia a causa dei rimbalzi sul terreno o degli impatti contro gli alberi.

5.2.1. Dati di input del modello

I dati di input richiesti dal software consistono in un insieme di 10 mappe raster per la definizione del terreno e 4 mappe raster nel caso si consideri la vegetazione, le quali devono avere tutte la stessa dimensione e la stessa risoluzione, ovvero stessa dimensione delle celle. All'aumentare della dimensione delle celle diminuiscono la precisione spaziale delle mappe e l'accuratezza delle dinamiche simulate. Si è scelta una risoluzione 2 m x 2 m. Come detto in precedenza, tutti i raster devono essere in formato ESRI ASCII Grid poiché è leggibile da tutti gli editor di testo. Di seguito vengono elencati i raster necessari:

- **dem.asc** mappa raster del DEM, che descrive la topografia;
- **rockdensity.asc** descrive la densità dei massi in ogni cella sorgente o punto di distacco, questa mappa caratterizza le celle che corrispondono ai punti di distacco infatti le celle che non sono sorgente hanno un valore nullo;
- **d1, d2, d3.asc** definisce le dimensioni del blocco in ogni cella sorgente, anche in questo caso se il valore è zero la cella raster non è considerata come cella sorgente. I valori, espressi in metri, sono variati in modo casuale ed uniforme con una predefinita percentuale;
- **blshape.asc** definisce, per ogni cella sorgente, la forma del blocco in caduta. I valori usati sono i seguenti:
 - 0 blocco senza forma o assenza di celle sorgenti definite
 - 1 blocco parallelepipedo
 - 2 blocco ellissoidale
 - 3 blocco sferico
 - 4 blocco discoidale
- **rg70, rg20, rg10.asc** definiscono la scabrezza della superficie, la quale rappresenta i massi lungo il pendio che ostacolano la caduta del blocco. Le tre classi descrivono la probabilità che il masso ha di incontrare un ostacolo lungo il percorso. Se la superficie del percorso è liscia si utilizza il valore 0, mentre il valore 100 può essere usato per arrestare i massi;
- **soiltype.asc** definisce la tipologia del suolo e rappresenta l'elasticità del terreno. Rockyfor3D prevede 8 tipi di suolo distinti in base al coefficiente di restituzione normale R_n (Tabella 5.8).

Tabella 5.8- Tipi di suolo [guida di Rockyfor3D].

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

Nel caso di simulazione con vegetazione si utilizzano quattro mappe raster:

- **nrtrees.asc** i valori delle celle indicano il numero di alberi per ettaro all'interno di ogni cella;
- **dbhmean.asc** i valori delle celle indicano il valore medio del diametro del fusto misurato all'altezza del petto (DPU) in m;
- **dbhstd.asc** i valori delle celle indicano la deviazione standard di DPU all'interno di ogni cella;
- **conif_percent.asc** i valori delle celle indicano la percentuale media di alberi di conifere all'interno di ogni cella.

Sulla base di questi quattro raster, il modello assegna all'interno di ogni pixel, in modo casuale, un dato numero di alberi aventi un determinato diametro. Per la creazione di questi raster si utilizza il software QGIS, dove è possibile suddividere l'area di lavoro in poligoni e attribuire a ciascuno di essi i valori necessari per andare a definire le mappe raster di input. Nella tabella 5.9 si riportano le coordinate dell'area di lavoro, mostrata nella figura 5.11.

Tabella 5.8- Coordinate dell'area di lavoro.

	x	y
1	390398	5074388
2	390398	5074862
3	390938	5074388
4	390938	5074862

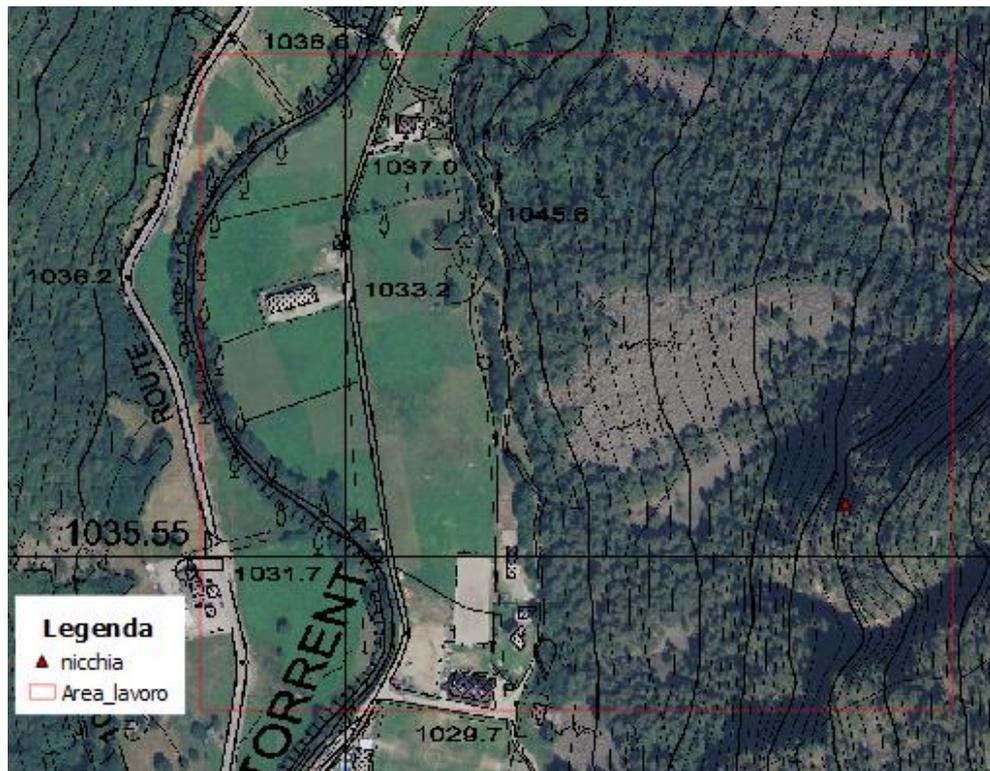


Figura 5.11- Raffigurazione dell'area di lavoro e della nicchia di distacco.

Una volta individuata l'area di lavoro è possibile dividerla nei suddetti poligoni, ciascuno di essi ricoprirà superfici omogenee. Si distingue in particolar modo la nicchia di distacco, considerata come affioramento roccioso, il versante caratterizzato dalla presenza di piccoli massi, il conoide detritico caratterizzato dalla presenza di massi e il sentiero. Si riportano, per completezza, il prato, la strada e il fiume ai piedi della parete, i quali non sono interessati dal fenomeno di caduta. A questi vengono associati i parametri per definire i raster (Tabella 5.10).

Tabella 5.10- Parametri scelti per la definizione dei file raster del terreno.

	Nicchia di distacco	Detrito	Terreno boscato	Prato	Strada asfaltata	Sentiero	Fiume
Density [Kg/m ³]	2700	0	0	0	0	0	0
d1 [m]	2	0	0	0	0	0	0
d2 [m]	2	0	0	0	0	0	0
d3 [m]	4	0	0	0	0	0	0
Rg70	0	0.25	0.05	0	0	0.03	100
Rg20	0	0.5	0.1	0	0	0.03	100
Rg10	0.05	0.9	0.2	0	0	0.03	100
Blshape	1	0	0	0	0	0	0
Soiltype	6	4	3	1	7	3	0

A titolo di esempio si riporta nella figura 5.12 la suddivisione che mostra il “soiltype”. Ogni colore identifica un tipo di suolo, i cui valori sono riportati nella tabella 5.10, in particolare si evidenzia in rosso la nicchia di distacco.



Figura 5.12- Rappresentazione dei poligoni del terreno in base al tipo di suolo (QGIS).

Nella figura 5.13 invece, si riporta la suddivisione in poligoni in base alla densità, la quale viene utilizzata per la creazione del raster `rockdensity.asc`. È possibile osservare come tutti i poligoni sono caratterizzati da un valore nullo, eccetto il poligono della nicchia di distacco, questo permette al programma Rockyfor3D di considerare le celle con un valore di densità definito come celle sorgenti. Lo stesso ragionamento viene fatto anche per la suddivisione in base alla forma del blocco e alle dimensioni, i quali verranno usati per la creazione dei raster `blshape.asc` e `d1`, `d2`, `d3.asc`.



Figura 5.13 - Rappresentazione dei poligoni del terreno in base alla densità del materiale (QGIS).

Infine, nella figura 5.14, si riporta lo shape “forest”, utilizzato per la creazione dei raster che tengono conto della presenza di vegetazione lungo il versante. In particolare, la suddivisione in poligoni mostrata in figura, riguarda il numero di alberi per ettaro. Sono state individuate zone con 200, 50 e 0 alberi per ettaro e i parametri utilizzati sono riportati nella tabella 5.11.

Tabella 5.11- Parametri scelti per la definizione dei file raster della vegetazione

nrtrees	dbhmean	dbhstd	conif_perc
200	40	10	100
50	40	10	100
0	0	0	0

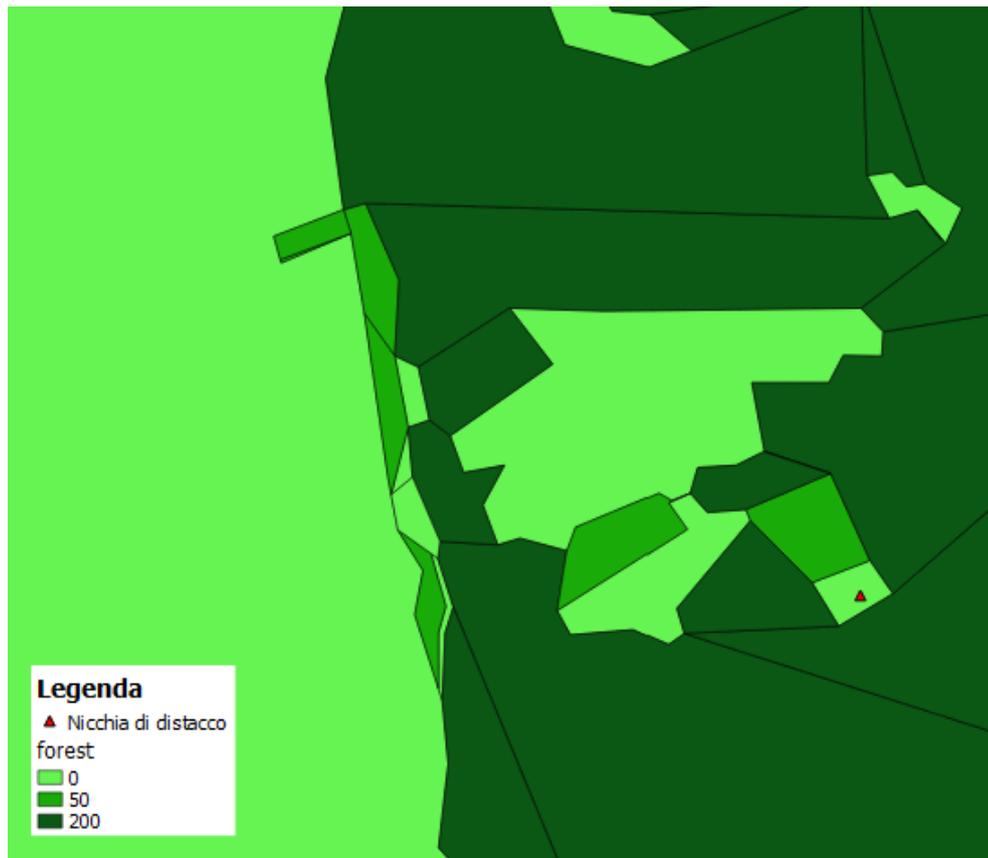


Figura 5.14- Rappresentazione dei poligoni del terreno in base alla vegetazione presente (QGIS).

Oltre alle immagini raster, vengono specificate ulteriori informazioni utilizzate dal software per la simulazione di caduta:

- rock volume variation: +/- 5;
- nr. of simulations: 100;
- additional initial fallheight: 0.00 m.

5.2.2. Dati di output del modello

Gli output creati da Rockyfor3D sono in formato raster e hanno la stessa dimensione, risoluzione e formato di quelli di input. L'area di lavoro viene suddivisa in celle e, ad ogni istante temporale, il blocco supera o rimbalza in una data cella, in cui i valori massimi delle diverse variabili simulate vengono memorizzati in differenti raster. Di particolare interesse sono i seguenti output:

- Nr_passages.asc numero di blocchi passati in ogni cella. In pratica indica le possibili traiettorie del blocco simulato;
- Reach_probability.asc mappa che mostra la probabilità che un masso arrivi in una determinata cella.
- Nr_deposited.asc indica il numero di blocchi che si arrestano in una determinata cella;
- E_95CI.asc indica l'intervallo di confidenza pari al 95% di tutti i massimi di energia cinetica registrati in ogni cella.

Questi file vengono importati in QGIS, grazie al quale è possibile avere una restituzione grafica. Di particolare interesse sono ovviamente le immagini raster che indicano la traiettoria del masso e i punti di deposito. Nella figura 5.15 è possibile osservare il percorso del masso. In rosso è riportato il percorso più probabile, mentre con gli altri colori le probabilità diminuiscono, fino ad arrivare ad una probabilità molto ridotta, anche se non nulla, che il masso compia quel determinato percorso.

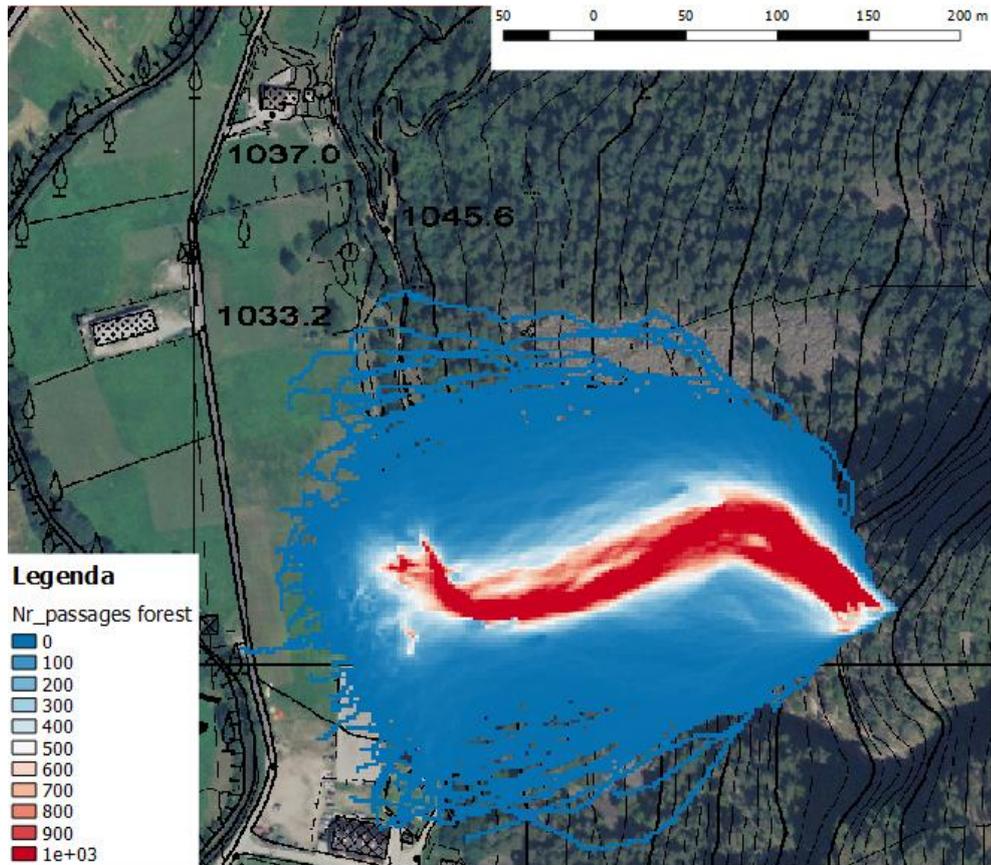


Figura 5.15- Traiettorie percorse dai blocchi (QGIS).

Il comportamento dei massi è in particolar modo influenzato dalla geometria del versante e quindi dal DTM utilizzato, è chiaramente visibile infatti come i massi seguano la traiettoria di massima pendenza.

È possibile effettuare un confronto con la traiettoria di caduta del masso registrata durante la sperimentazione riportata nel Capitolo 4. Nella figura 5.16 si riporta un modello 3D costruito con il software Global Mapper.

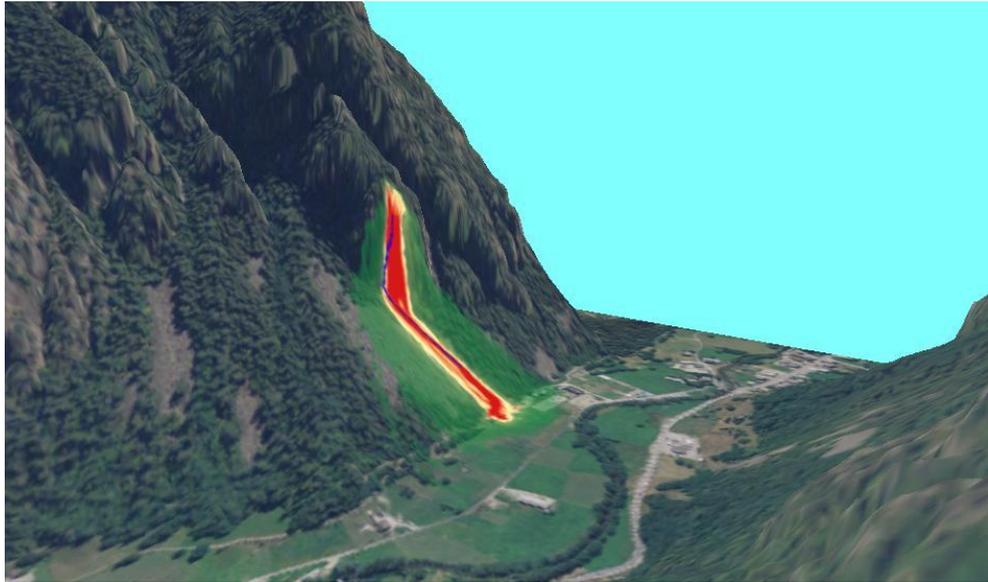


Figura 5.16- Rappresentazione 3D delle traiettorie (Global Mapper).

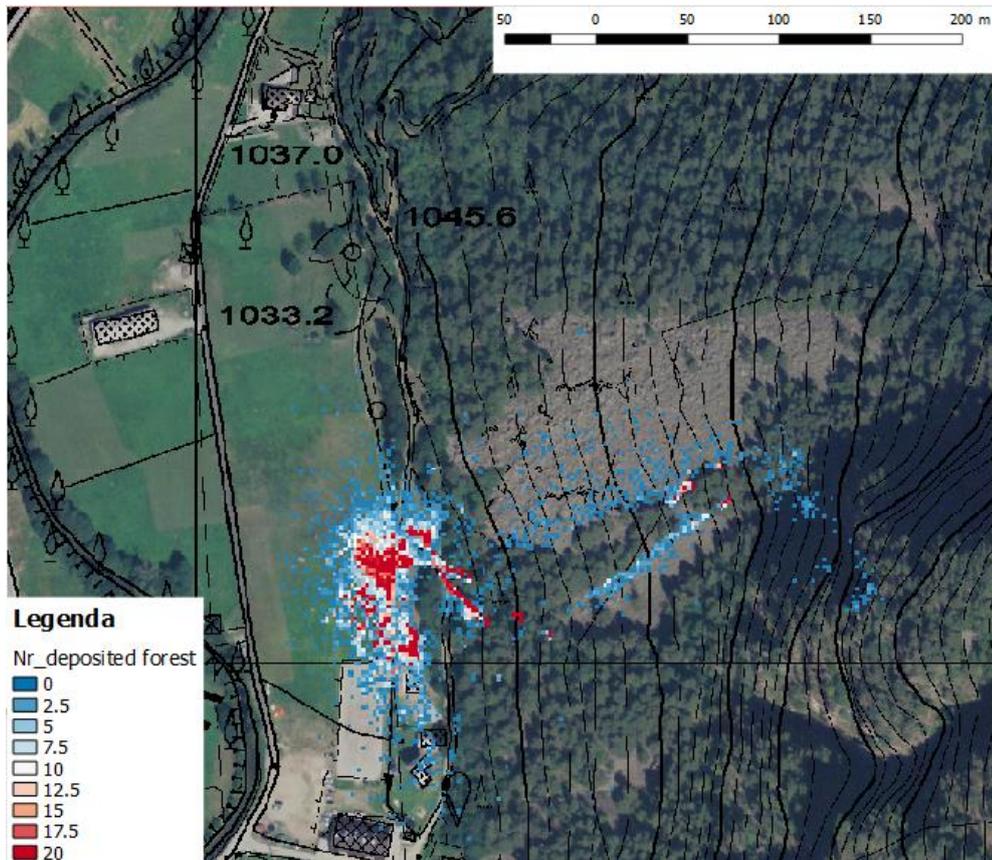


Figura 5.17- Punti di arresto dei blocchi (QGIS).

Inoltre, anche se alcuni blocchi si arrestano durante il percorso, la maggior parte arrivano ai piedi della parete nel prato sottostante. Dall'osservazione del sito in esame si riscontra la presenza di blocchi ai piedi della parete, sulla strada sottostante, quindi il risultato ottenuto può essere considerato attendibile. La posizione dei punti di arresto è riportata nella figura 5.17. Una forte limitazione del software è la poca sensibilità alla variazione dei parametri di input, da cui deriva anche l'impossibilità di utilizzarlo per ottenere dei valori mediante analisi a ritroso. Andando a modificare il tipo di terreno, le traiettorie sono identiche a quelle ottenute con i valori indicati all'inizio e il numero di depositi maggiore rimane in corrispondenza del prato ai piedi del versante. Un altro aspetto da tener in considerazione è l'influenza della vegetazione la quale è praticamente trascurabile (Figura 5.18).

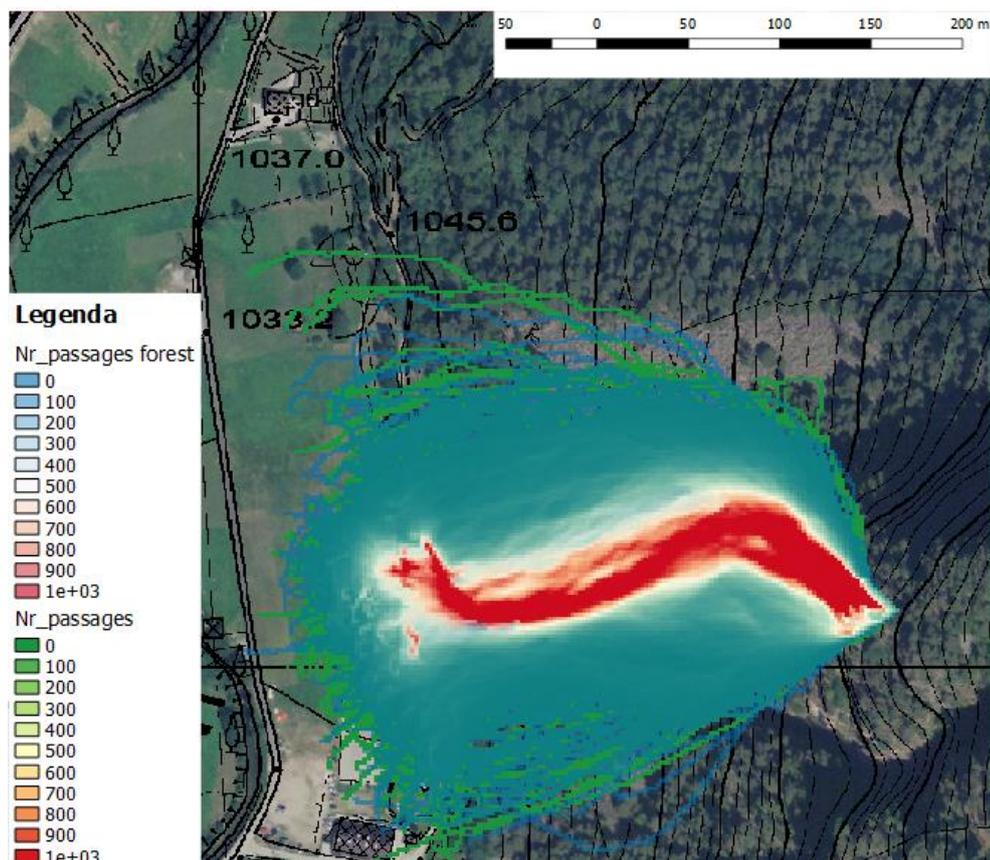


Figura 5.18- Confronto delle traiettorie con il risultato ottenuto trascurando la vegetazione (QGIS).

Confrontando le traiettorie calcolate trascurando la presenza di alberi con le traiettorie ottenute includendo l'immagine raster della vegetazione il risultato, sebbene siano presenti delle differenze queste sono poco influenti sul risultato finale. Si può osservare come le traiettorie principali in rosso coincidano.

È possibile quindi affermare che l'influenza maggiore sul risultato finale è data dalla geometria del versante, in particolare dalla sua altimetria rappresentata dal modello altimetrico del terreno. Segue un'altra limitazione, ovvero la necessità di avere un DTM estremamente dettagliato su piccola scala. È la microtopografia infatti ad essere essenziale per il corretto funzionamento del software, la morfologia del suolo con le sue irregolarità determina il percorso del masso e gli impatti con il terreno.

5.3. Confronto dei risultati ottenuti

Le simulazioni cinematiche sono state condotte con l'ausilio del software Rockyfor3D che studia il moto in tre dimensioni e del software RocFall, con il quale si svolge un'analisi bidimensionale. Il principale vantaggio della rappresentazione tridimensionale è che considera la propagazione del blocco in maniera completa, permettendo di osservare un'area di studio sufficientemente estesa, mentre con i metodi bidimensionali non sempre si riesce ad individuare le traiettorie più critiche, che non giacciono su piani di massima pendenza.

La topografia inserita nel modello tridimensionale permette di individuare le principali evidenze morfologiche che controllano i percorsi dei massi e quindi può essere ragionevolmente utilizzata. Per quanto riguarda invece il modello bidimensionale, il profilo risulta fortemente semplificato, soprattutto nella parte iniziale in corrispondenza della nicchia di distacco, in cui il masso è soggetto a caduta libera. Si trascurano quindi i punti ottenuti dal DTM e si considerano le linee di massima pendenza per descrivere le traiettorie. Quindi si evidenzia come le simulazioni cinematiche siano fortemente influenzate dalla risoluzione del modello digitale del terreno.

La traiettoria di caduta varia in funzione non solo del profilo topografico, ma anche del tipo di terreno. Nel caso di RocFall si osserva una forte influenza dei coefficienti di restituzione e dell'angolo di attrito, sono infatti sufficienti minime variazioni dei

parametri per ottenere risultati molto diversi tra di loro. Molto meno sensibile ai differenti tipi di terreno ed ai coefficienti ad essi associati è Rockyfor3D, variando i parametri in range di valori ammissibili, i risultati ottenuti non subiscono modifiche sostanziali.

I metodi cinematici utilizzati permettono di simulare il fenomeno di caduta massi, analizzando le possibili traiettorie e i possibili scenari di rischio, permettendo di ottenere dei risultati finali coerenti con la realtà e quindi accettabili. Tuttavia, nell'utilizzo dei software, si è riscontrata l'impossibilità di fare riferimento alle operazioni di disgaggio descritte nel capitolo precedente. Il masso infatti, durante il percorso, ha subito impatti con il versante disgregandosi e subendo variazioni di volume arrestandosi prima della strada e del prato. RocFall concentra tutta la massa in un punto, trascurando forma e dimensione del blocco, mentre Rockyfor3D permette di conferire una determinata forma al blocco, entrambi comunque non tengono conto della variazione di massa subita durante il percorso. Il problema della forma e volume del blocco viene superato considerato il metodo agli elementi distinti con l'utilizzo del software PFC2D. Le particelle utilizzate sono sferiche non più puntiformi e quindi sono corpi che occupano una posizione finita nello spazio. Il masso è quindi composto da particelle distinte i cui spostamenti sono indipendenti tra di loro e che intergiscono solo nel momento in cui entrano in contatto.

CAPITOLO 6

SIMULAZIONE DELLA CADUTA MASSI

CON PFC2D 5.0

Introduzione

In questo capitolo si effettua la modellazione numerica del fenomeno di caduta massi attraverso il software PFC2D 5.0 (Itasca). Dopo un inquadramento generale sul funzionamento del programma, si descrivono i modelli utilizzati per definire l'ammasso roccioso e la sua interazione con il pendio. Si procede con il processo di calibrazione per la scelta dei parametri il quale si suddivide in due parti. Una prova di compressione monoassiale su un provino di roccia intatta viene simulato per definire i parametri caratterizzanti l'ammasso roccioso. Una volta definito il materiale costituente il masso si procede con la calibrazione dei parametri del pendio con una back analysis, cercando di riprodurre quanto più possibile ciò che è avvenuto in sito durante le operazioni di disaggio. I problemi riscontrati durante la back analysis nella simulazione della fase di innesco del moto del masso, hanno portato alla definizione di un ulteriore modello per la descrizione del materiale, il quale permette di superare i limiti del primo modello scelto. Ciò comporta un ulteriore processo di calibrazione dei parametri costituenti il nuovo modello e quindi sia la prova di compressione che la back analysis vengono ripetute.

6.1. Descrizione del software utilizzato

Il Particle Flow Code permette di modellare il movimento e l'interazione di un insieme di corpi rigidi mediante l'utilizzo del Distinct Element Method (DEM), introdotto da Cundall nel 1971 per l'analisi di problemi relativi alla meccanica delle rocce. PFC, in base alla definizione di Cundall (1992), viene classificato come codice agli elementi discreti in quanto permette spostamenti e rotazioni dei corpi rigidi fino al loro completo distacco e la creazione di nuovi contatti durante il processo di analisi. Il modello "particle-flow" simula il comportamento meccanico di un sistema costituito da un insieme di particelle distinte di forma arbitraria che interagiscono tra di loro mediante punti di contatto. I materiali sono descritti come insieme di particelle rigide che interagiscono tra di loro mediante forze di contatto generate in ogni punto in cui esso viene garantito. Il moto è regolato dalla seconda legge di Newton e dalla legge forza-spostamento nei suddetti punti di contatto.

Le particelle fondamentali, denotate con il termine *ball*, hanno la forma di un disco con spessore unitario nel caso bidimensionale e di una sfera nel caso tridimensionale. Comportamenti più complessi sono modellati legando le particelle tra di loro nei punti di contatto mediante elementi denominati *bond*. Nel momento in cui le forze agenti superano la resistenza dei bond viene meno il legame creato ed è possibile rappresentare la formazione di fratture e la frammentazione dei blocchi. È possibile realizzare elementi di forma generica mediante l'utilizzo di *clumps*, ottenuti mediante la sovrapposizione di elementi rigidamente collegati, denominati *pebbles*. In aggiunta alle particelle, il modello PFC permette di definire elementi chiamati *walls*, i quali consentono di applicare condizioni al contorno agli insiemi di particelle e di agevolarne la compattazione e il confinamento del sistema. Tutti gli elementi interagiscono tra di loro mediante le forze che insorgono nei contatti, tuttavia le equazioni del moto sono soddisfatte solo per i balls e clumps mentre il moto dei walls rimane costante nonostante le forze agenti. Inoltre i contatti non si possono formare tra due walls.

Per la definizione del modello è necessario specificare quattro componenti fondamentali:

- Il dominio del modello;
- La distribuzione delle particelle;
- I modelli di contatto tra le particelle e i loro materiali;
- Le condizioni iniziali e al contorno.

Vengono quindi scelte la posizione nel dominio e le dimensioni delle particelle, il comportamento ai contatti e le proprietà del materiale, che definiscono la risposta del modello alle particolari condizioni di disturbo durante l'analisi e infine, le condizioni al contorno e iniziali che rappresentano lo stato in-situ. Una volta definite queste condizioni in PFC, viene calcolato lo stato di equilibrio iniziale per il modello; dopo che vengono applicate le alterazioni del sistema, la risposta viene ricalcolata (Itasca 2015). PFC utilizza un schema esplicito per la determinazione degli intervalli di tempo, per risolvere le equazioni algebriche e la soluzione viene raggiunta dopo una serie di step di calcolo. Ad ogni step si stabiliscono i contatti tra le particelle e a ciascuno di essi viene applicata la legge forza-spostamento per trovare le forze agenti. Successivamente viene applicata la legge del moto, attraverso la quale si determina la velocità e la posizione di ogni particella. Per quanto riguarda gli elementi wall le forze, come detto in precedenza, non sono prese in considerazione e la loro posizione è ottenuta in base alla velocità attribuita loro.

6.1.1. Applicazione del software al caso studio

Il software PFC permette di modellare la caduta del masso e di rappresentare la sua disgregazione causata dagli impatti lungo il pendio. Alla luce di quanto detto fino ad ora, prima di procedere con la back analysis, è necessario un passaggio preliminare che invece non è contemplato dai software utilizzati nei capitoli precedenti, ovvero la definizione del materiale costituente il masso. Il materiale roccioso è rappresentato dalle particelle connesse tra loro dagli elementi bond, di cui si devono individuare le proprietà e le caratteristiche. La corretta definizione del bond in questo caso è fondamentale non solo per rappresentare le proprietà, ma anche per descrivere il processo di disgregazione del masso durante l'impatto con il pendio. Il legame è caratterizzato da una dimensione finita, espressa come frazione del diametro delle particelle, una resistenza a tensione e a taglio, con rigidità normale e tangenziale.

Quando le forze di contatto eccedono i valori di tensione o di taglio avviene la formazione di micro fratture causate dalla rottura del bond. Quando viene applicato un carico esterno, può avvenire un'evoluzione della micro frattura fino ad arrivare al caso in cui il blocco iniziale di particelle si divide in più parti. La posizione e la modalità di frattura dipendono dalle proprietà inserite in fase di modellazione e l'inserimento di parametri di input delle particelle connesse è determinante anche a livello macroscopico. Tali parametri sono definiti microparametri e permettono di caratterizzare le proprietà delle balls, dei bond, dei contatti e la resistenza delle connessioni, le quali non sono determinabili mediante prove di laboratorio. Occorre quindi procedere con la calibrazione tramite procedimenti iterativi, partendo da dati noti o ottenuti da letteratura.

Una volta definita la geometria e le caratteristiche delle particelle, vengono introdotti i legami tra di esse e i modelli di contatto. Gli elementi bond concettualmente rappresentano il materiale tra le particelle che sopporta il carico esterno fino ad un determinato limite. Se gli sforzi introdotti sono al di sotto di questo limite, allora il materiale può essere approssimato come un solido continuo. Se il limite viene superato, i bonds si rompono e gli elementi, precedentemente collegati, sono liberi di muoversi separatamente dagli altri (Potyondy, 2004). I modelli di contatto utilizzati per la descrizione dell'ammasso sono due: il "linear parallel bond" e il "flat-joint". Il parallel bond può essere considerato come un insieme di molle con rigidità normale e di taglio che giacciono in un piano tangente e centrato nel punto di contatto. Queste molle agiscono in parallelo con le molle presenti nel punto di contatto tra due sfere, utilizzate per modellare la rigidità delle particelle. Il movimento relativo ai contatti, che si ha nel momento in cui vengono inseriti i parallel bonds, causa l'insorgere di forze e momenti che si sviluppano all'interno del materiale. Il modello linear parallel bond fornisce il comportamento di due interfacce: una infinitesima, elastica lineare e attritiva che genera una forza, ed una di dimensioni finite, elastica lineare e con presenza dei bonds che genera una forza ed un momento. La prima interfaccia è equivalente al modello lineare, non resiste al movimento relativo di rotazione. La seconda interfaccia è equivalente al parallel bond, agisce in parallelo alla prima interfaccia e resiste alla rotazione relativa e il suo comportamento è lineare elastico, fino a che il limite di

resistenza non viene superato con conseguente rottura del bond. Dopo la rottura del bond il comportamento è equivalente a quello lineare (Itasca 2015). Una schematizzazione di quanto spiegato è riportato nella Figura 6.1.

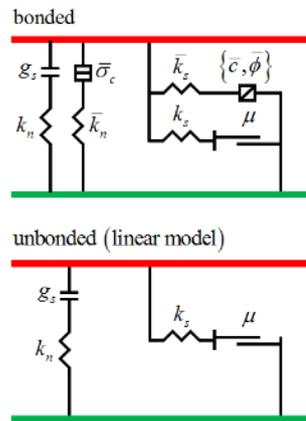


Figura 6.1- Comportamento e componenti reologiche del linear parallel bond.

Il modello “flat-joint” può essere applicato agli elementi ball, clump e wall. Il contatto è costituito da due superfici fittizie, connesse rigidamente ai due elementi che devono interagire. Le superfici fittizie sono chiamate “faces” e sono rappresentate da una linea nel modello 2D e da un disco nel modello 3D. Quindi il contatto di tipo “flat-joint” si viene a creare nel momento in cui le faces di due elementi interagiscono tra loro. Nella Figura 6.2 è riportata una schematizzazione del modello tra due elementi ball.

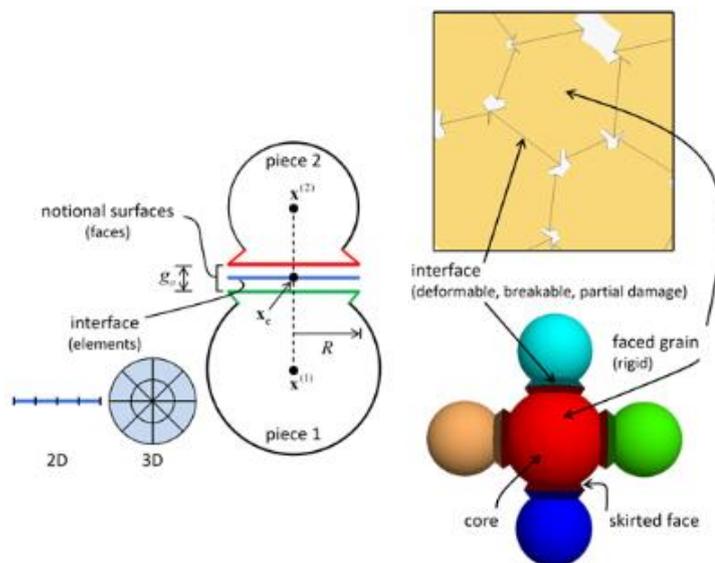


Figura 6.2- Rappresentazione del contatto “flat-joint” e del materiale “flat-jointed”.

L'interfaccia esistente viene discretizzata in elementi, i quali possono essere legati o non legati tra di loro. La rottura di ogni elemento legato contribuisce a danneggiare parzialmente l'interfaccia, creando delle fratture. Il comportamento degli elementi legati è elastico lineare fino a che non viene superato lo sforzo di picco e il bond si rompe, dopo di che il comportamento diventa elastico lineare e attritivo (Figura 6.3). Ogni elemento porta una forza e un momento che obbediscono alla legge forza-spostamento, mentre la risposta dell'interfaccia "flat-joint" evolve da uno stato completamente legato ad uno stato non legato e attritivo.

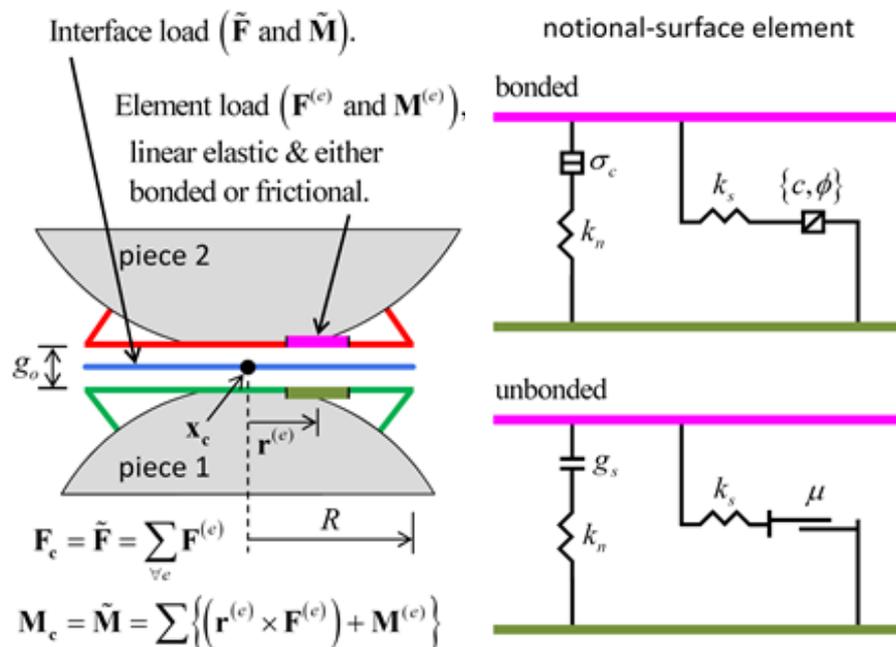


Figura 6.3- Comportamento e componenti reologiche del modello "flat-joint".

Le proprietà che caratterizzano entrambi i modelli, oggetto di calibrazione, sono le seguenti:

- k_n e k_s , rispettivamente la rigidezza normale e tangenziale;
- μ , coefficiente d'attrito;
- E^* , modulo effettivo;
- k^* , rapporto tra la rigidezza normale e tangenziale;
- β_n e β_s , rispettivamente lo smorzamento critico normale e tangenziale;
- $\bar{\sigma}_c$, resistenza a trazione;

- \bar{c} , coesione;
- $\bar{\phi}$, angolo d'attrito.

La resistenza a trazione, la coesione e l'angolo di attrito sono parametri che si riferiscono esclusivamente ai bonds.

Il modello parallel bond viene analizzato in quanto è stato spesso utilizzato per studiare la fratturazione e la frammentazione nelle rocce fragili. Uno dei maggiori limiti è dato dal fatto che il rapporto tra lo sforzo di compressione monoassiale e lo sforzo di trazione simulati per un provino sintetico di roccia è troppo basso (Cho et al., 2007; Kazerani and Zhao, 2010); la diretta assunzione di una particella circolare non può esprimere completamente il comportamento di una struttura di forma complessa e con i grani altamente incastrati tra di loro come quella di una roccia. Raggruppando le particelle tra di loro si può ottenere un comportamento macroscopico più realistico ed è possibile ridurre notevolmente questi limiti, permettendo di riprodurre un rapporto tra gli sforzi corretto e involuppi di rottura comparabili con quelli ottenibili in laboratorio. Per questo motivo, Potyondy nel 2012 sviluppa un nuovo modello per esprimere i contatti, il modello flat-joint appunto, con lo scopo di riprodurre gli stessi effetti ottenuti con il raggruppamento delle particelle attraverso un metodo computazionalmente più efficiente. La rottura parziale delle interfacce e la resistenza continua al momento rappresentano due grandi vantaggi di questo modello.

Una volta determinata la dimensione e la distribuzione più adatta di particelle, è stata simulata una prova di compressione monoassiale fino ad ottenere una risposta del materiale sintetico che rispecchia il comportamento fisico dell'ammasso, attraverso la variazione delle microproprietà.

Quindi, la modellazione numerica del fenomeno può essere riassunta nelle seguenti fasi:

- Realizzazione di un provino sintetico di forma cilindrica;
- Determinazione dei microparametri tramite prova di compressione uniassiale;
- Inserimento all'interno dell'ammasso roccioso di dimensioni note delle caratteristiche ricavate e modellazione del fenomeno di caduta.

6.2. Calibrazione dei micro parametri dell'ammasso roccioso

In questa prima fase vengono calibrati i microparametri dell'ammasso roccioso, utilizzando durante la prova di compressione monoassiale il modello parallel bond e il modello flat-joint. Una volta ottenuti i risultati della prova, sono noti i parametri che possono essere inseriti per la definizione del masso instabile. La dinamica del masso lungo il pendio e la calibrazione dei parametri di quest'ultimo viene fatta mediante back analysis e il modello di contatto scelto tra gli elementi ball rappresentanti il masso e l'elemento wall rappresentante il pendio è il modello "linear".

6.2.1. Realizzazione del provino sintetico e prova di compressione monoassiale

La generazione di un provino sintetico è ottenuta anzitutto generando un assemblaggio di particelle attraverso l'utilizzo di un modello ad elementi discreti, ai fini di determinarne le microproprietà, in modo che esse coincidano con quelle reali. In questo caso la roccia è un metagabbro, i cui macroparametri sono noti in letteratura. Vengono scelti dei valori iniziali del modulo elastico e della resistenza a compressione considerando la roccia intatta, pari a:

$$E = 80 \div 100 \text{ GPa}$$

$$\sigma_c = 150 \text{ MPa}$$

Per ottenere ulteriori parametri caratterizzanti l'ammasso roccioso viene utilizzato il criterio di Hoek-Brown (Figura 6.4). Assumendo un valore di GSI pari a 100, di m_i pari a 27 e un grado di disturbo pari a 0, si ottengono i valori riassunti nella Tabella 6.1.

Tabella 6.1-Parametri caratterizzanti l'ammasso roccioso.

c [Mpa]	ϕ [°]	σ_t [Mpa]	Ed [GPa]	UCS [MGa]
15	48	-1.23	60	50

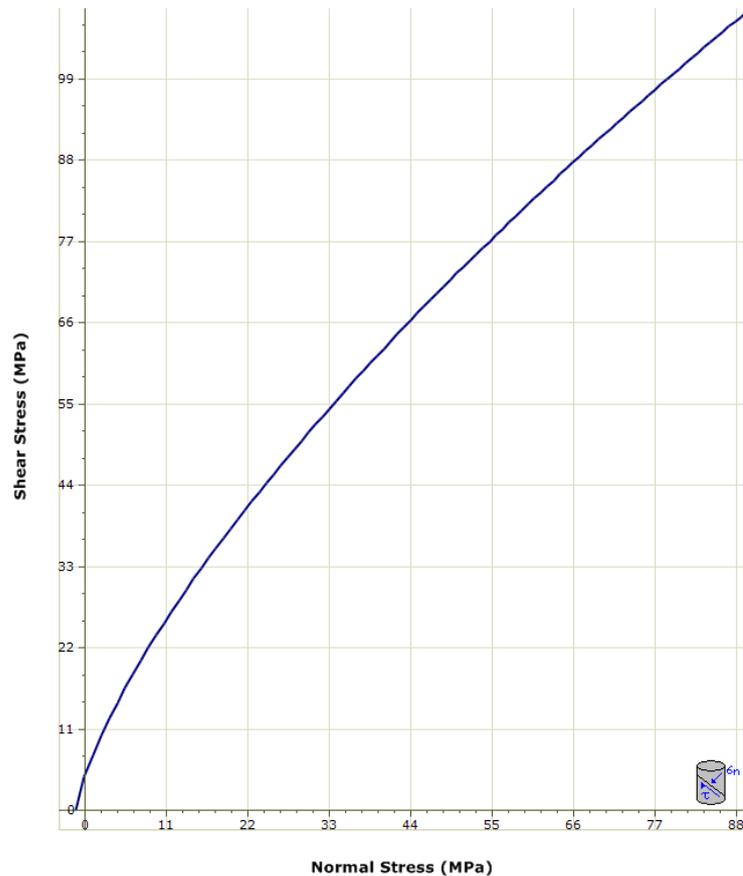


Figura 6.4- Involuppo di rottura secondo il criterio di Hoek-Brown.

Si procede con la calibrazione del modello e quindi con la prova di compressione monoassiale. Per prima cosa si definisce la geometria del provino cilindrico, il quale è costituito da dischi di raggio variabile. Le dimensioni delle particelle vengono scelte in riferimento ai blocchi realmente caduti lungo il pendio, in modo da poter mantenere lo stesso rapporto dimensionale tra particelle e blocco durante la back analysis. Il raggio dei dischi varia quindi tra 0,1 cm e 0,4 cm. La base del provino ha una lunghezza pari a 2 volte il diametro maggiore delle sfere e l'altezza è assunta due volte la base. Quindi il provino scelto ha dimensione 8x16 cm. Ai fini della prova è molto importante anche definire la porosità del provino. In questo caso si assume direttamente un valore di porosità basso, evitando il processo di calibrazione per questa grandezza, in quanto si ha una roccia intatta. La porosità è assunta pari a 0,1. La densità delle sfere è 2700 kN/m^3 . Creato il sistema di particelle e i legami gli spostamenti vengono annullati e si ottiene così la condizione iniziale del provino, riportata nella Figura 6.5.

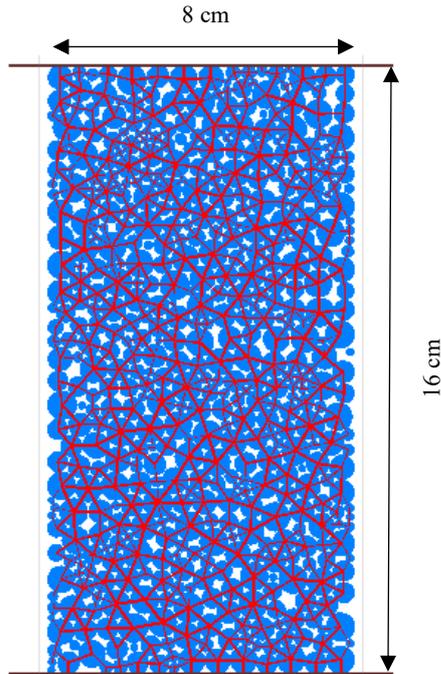


Figura 6.5 Rappresentazione della geometria del provino in PFC2D.

A questo stadio il provino è completamente confinato. Prima di andare ad eseguire la prova è necessario rimuovere il confinamento laterale, perturbando in questo modo lo stato di equilibrio raggiunto. Le molle che rappresentano i legami definiti, quando confinate, accumulano una certa deformazione e agiscono contro le forze imposte cercando di tornare nella loro configurazione iniziale, che si ha nel momento in cui gli elementi wall vengono rimossi. Quindi si procede annullando la rigidità normale, in questo modo non dovrebbero essere presenti forze dovute alla penetrazione delle balls al contatto, e il modello dovrebbe essere in equilibrio. Tuttavia è presente una minima perturbazione dovuta alle forze precedentemente accumulate dalle balls. Per rimuovere questa perturbazione, si procede annullando le forze e i momenti accumulati ai contatti.

Una volta definita la condizione iniziale del provino si procede con la prova di compressione monoassiale. Le piastre della cella di carico posizionate alle basi del provino sono rappresentate da due elementi wall. Lo spostamento delle piastre viene simulato muovendo i due walls verso il centro del provino. Durante la prova vengono registrati gli sforzi e le deformazioni subiti dal materiale. Il calcolo degli sforzi assiali viene effettuato sommando tutte le forze verticali agenti nelle pareti e dividendo per la

larghezza del provino. Le deformazioni vengono calcolate semplicemente dividendo gli spostamenti subiti per la lunghezza iniziale del provino. Il provino viene caricato finché lo sforzo assiale non arriva al 70% dello sforzo di picco. Il risultato della prova di compressione è un grafico sforzi-deformazioni che rappresenti il comportamento fragile del materiale considerato.

Il processo di calibrazione è stato condotto variando i parametri sopra elencati, fino ad ottenere i valori del modulo elastico e della tensione di picco prossimi a quelli di Hoek-Brown. Nel caso in esame è possibile arrivare a valori inferiori, in quanto inizialmente non si è tenuto conto della degradazione subita dal masso a causa del tempo, degli agenti atmosferici e delle condizioni presenti in sito.

Il modulo elastico è influenzato dai parametri E^* e k^* . La loro calibrazione permette di variare la pendenza del tratto elastico della curva sforzo-deformazione, che rappresenta il modulo di Young. Le curve σ - ϵ sono riportate nella Figura 6.6, mentre i parametri utilizzati sono riassunti nella Tabella 6.2. Si veda l'Allegato A per il codice utilizzato.

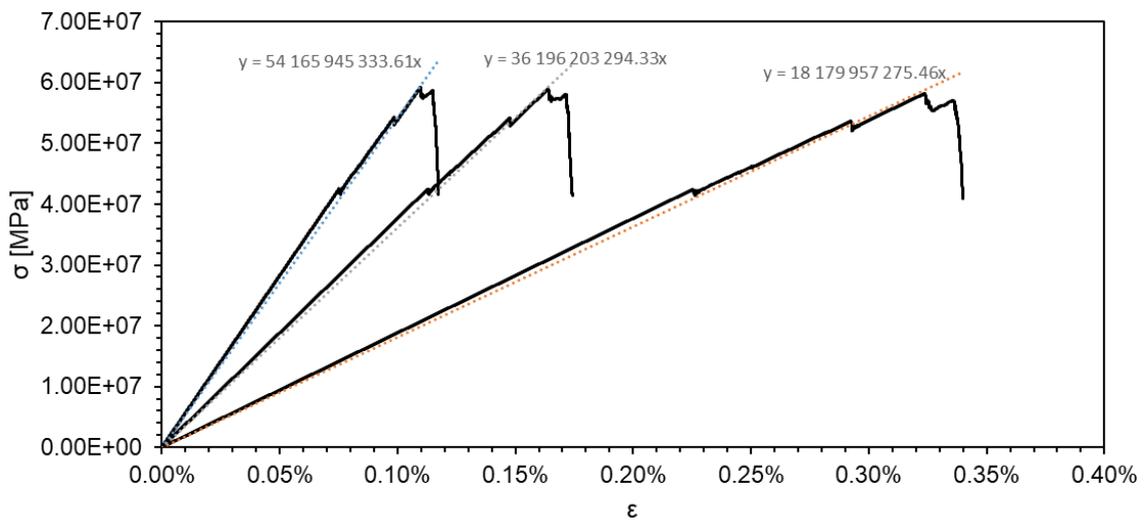


Figura 6.6- Calibrazione dei parametri di deformabilità.

Tabella 6.2- Equazioni del tratto elastico della curva σ - ϵ al variare del modulo effettivo E^* .

E^*	Equazione
1e10	$y = 18179957275x$
2e10	$y = 36196203294x$
3e10	$y = 54165945333x$

Il modulo di Young pari a 54 GPa è ritenuto accettabile e quindi la calibrazione dei parametri di deformabilità si ritiene soddisfatta. Il valore di k^* utilizzato è unitario, questo significa che la rigidità normale e tangenziale dei legami è uguale.

Successivamente vengono variati i parametri di resistenza del bond, ovvero coesione, resistenza a trazione e angolo di attrito, per raggiungere la tensione di picco desiderata. I valori di primo tentativo scelti sono quelli del criterio di rottura: $\sigma_t = 1.23$ MPa, $c = 15$ MPa e $\phi = 48^\circ$. L'andamento ottenuto si discosta altamente dal comportamento fragile ipotizzato, per questo i parametri di primo tentativo vengono scartati. Il primo step è quello di andare a calibrare la resistenza del legame. Volendo ottenere un bond resistente si aumenta la σ_t fino ad arrivare ad un valore di $4 \cdot 10^7$ Pa, mentre la coesione e l'angolo di attrito rimangono inalterati. In questo modo si ottiene di nuovo un comportamento fragile del materiale e una tensione di picco pari a 43 MPa (Figura 6.7).

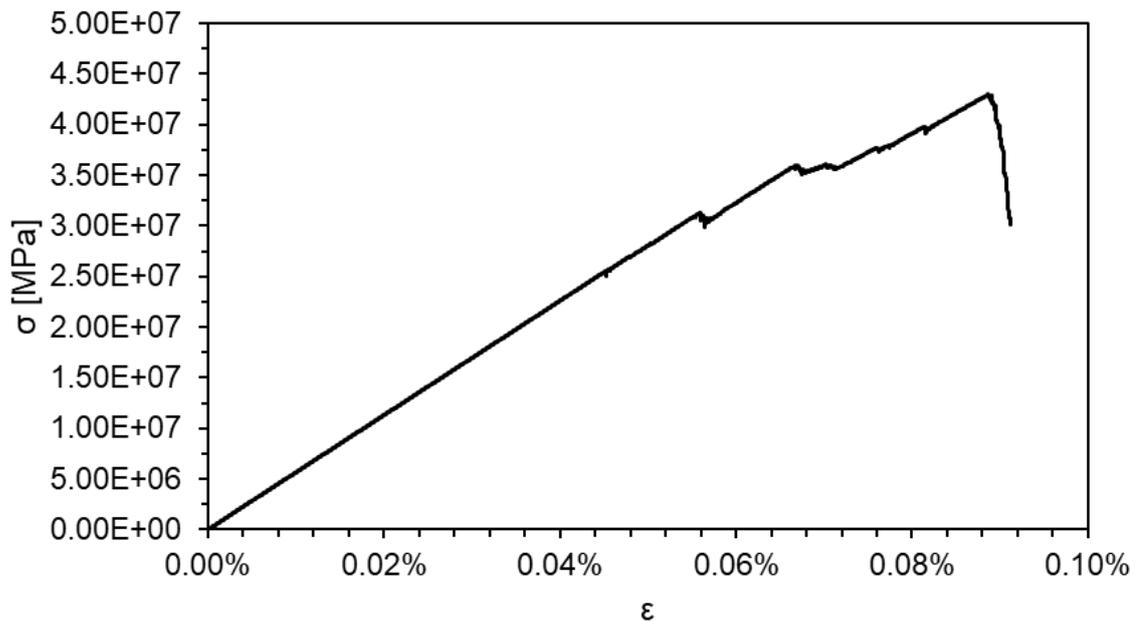


Figura 6.7 – Calibrazione dei parametri di resistenza degli elementi bond.

Nella Figura 6.8 si riporta il provino nella sua condizione finale dopo la rottura.

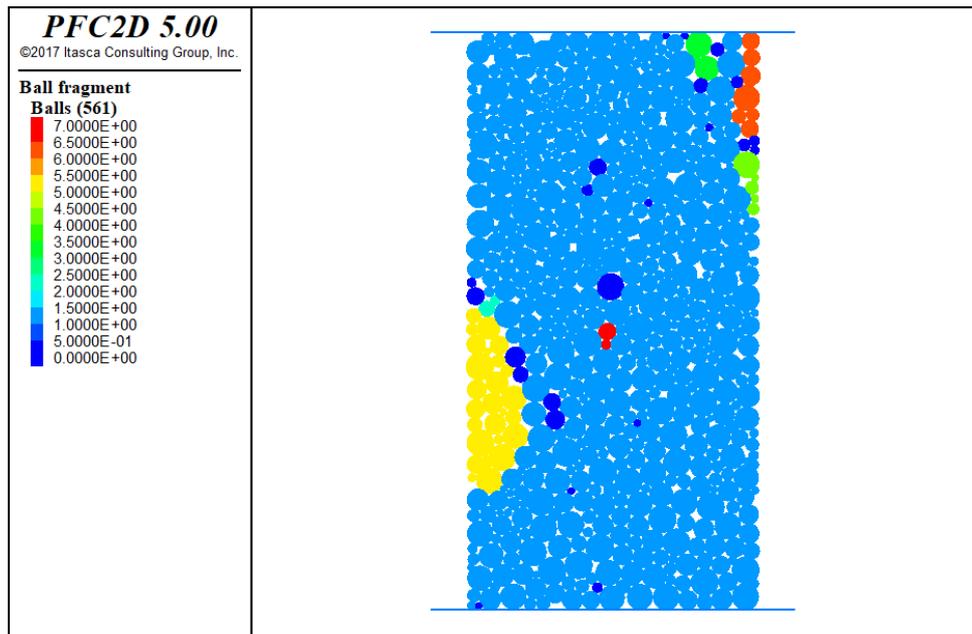


Figura 6.8- Fratturazione del provino a seguito della prova di compressione monoassiale.

Si esegue la prova di compressione con il modello flat-joint. È noto che il “parallel bonded model” arriva a snervamento con un rapporto tra la resistenza a compressione e la resistenza a trazione irrealisticamente basso (Potyondy2004). Una possibile ragione per giustificare ciò è che il modello precedentemente definito è utilizzato per simulare terreni granulari ed è caratterizzato da una scarsa resistenza alla rotazione. Potrebbe quindi non essere adeguato per riprodurre il comportamento di ammassi rocciosi. Il modello a giunto piatto supera questa mancanza, simulando il contatto con una linea composta da molti sub-contatti, in modo da resistere a questa rotazione.

Si procede di nuovo con la calibrazione dei parametri mediante prova di compressione. La definizione delle dimensioni del provino e della geometria delle sfere è analoga a quella del paragrafo 6.2.1. Come nel caso del parallel bond si vuole riprodurre il comportamento fragile del materiale facendo sempre riferimento ai parametri di Hoek-Brown (Paragrafo 6.2.1). Il risultato della prova è il grafico sforzo-deformazione, da cui si ottiene il Modulo di Young e la resistenza a compressione monoassiale. Anche in questo caso i parametri che si andranno a calibrare sono E^* , k^* , σ_t , c e ϕ . Si veda l’Allegato B per il codice utilizzato. Le fasi intermedie del processo di calibrazione si omettono in quanto analoghe alle precedenti. Nella Figura 6.10 e nella Tabella 6.3 si

riportano i risultati finali per cui si registra un picco di 45 MPa e un modulo elastico di 54 GPa, mentre nella Figura 6.9 è rappresentato il provino dopo la rottura.

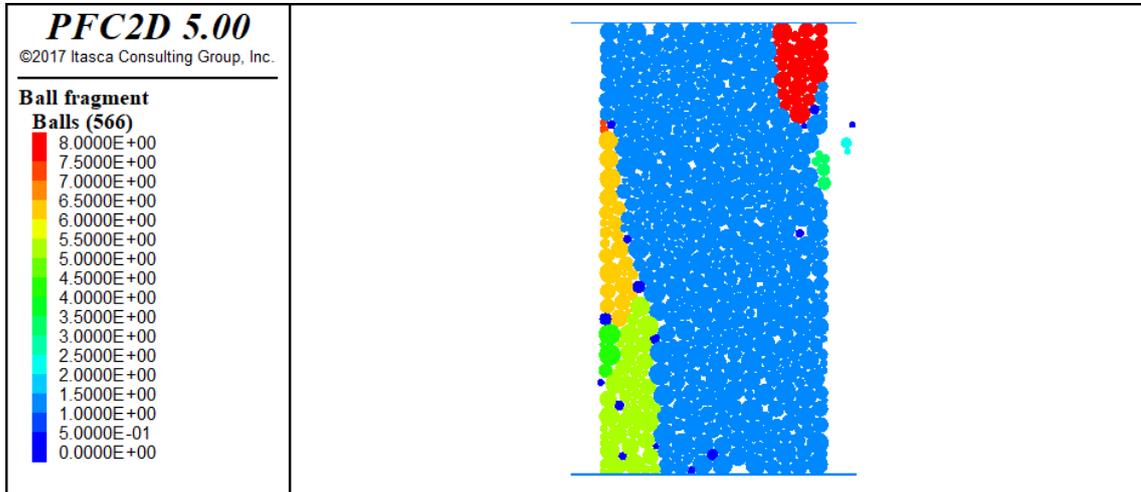


Figura 6.9- Fratturazione del provino a seguito della prova di compressione monoassiale

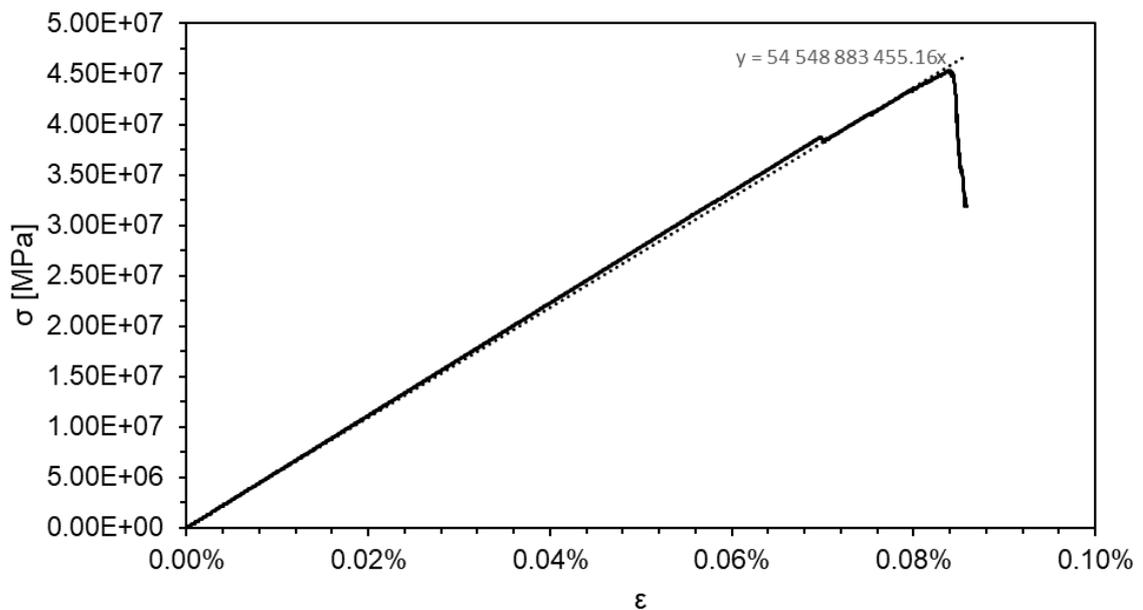


Figura 6.10- Risultato della prova di compressione monoassiale.

6.2.1. Calibrazione dei microparametri del pendio mediante back analysis

Grazie al processo di calibrazione sono noti le dimensioni delle sfere, i contatti e i microparametri. I dati ottenuti sono necessari per la definizione del masso oggetto di

analisi. Il masso viene rappresentato considerando una sua sezione verticale e cercando di mantenere la forma il più possibile vicino alla realtà, come è possibile vedere nelle foto riportate nel Capitolo 4, in modo tale da ottenere un volume simile a quello reale. Nella Tabella 6.3 sono riassunte tutte le informazioni fino ad ora ottenute.

Tabella 6.3- Parametri utilizzati per la caratterizzazione del masso.

	Particle bond	Flat-joint
Υ [kN/m ³]	2700	2700
R [m]	0.1÷0.4	0.1÷0.4
E* [Pa]	3.00E+10	4.00E+10
k*	1	1
c [Pa]	1.50E+07	2.00E+07
σ_t [Pa]	4.00E+07	3.00E+06
ϕ [°]	4.80E+01	0

Nella Figura 6.11 è rappresentata la geometria del masso. Per meglio comprendere come è costituito si è scelto di suddividere le sfere in base ai raggi, quindi i colori stanno ad indicare le diverse dimensioni degli elementi ball. Si può notare la compattazione degli elementi dovuta all'elevata porosità, questo permette di rappresentare la roccia intatta.

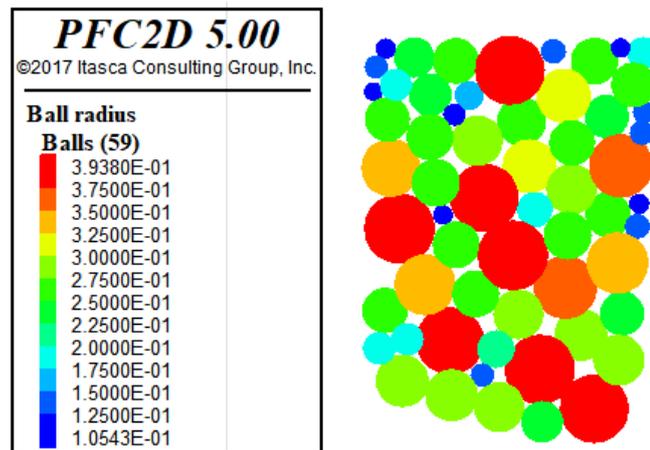


Figura 6.11- Schematizzazione delle sfere costituenti il masso (PFC2D 5.00).

Il secondo passo consiste nell'andare a definire la geometria del pendio. Analogamente a quanto fatto in RocFall si individuano due traiettorie. Per prima cosa si procede con la

descrizione della traiettoria principale. Il pendio viene creato mediante l'inserimento di elementi wall nel dominio. Essendo una geometria particolarmente articolata, invece di inserire manualmente le coordinate dei vertici del wall, PFC2D permette di importare la sezione in formato *.dxf disegnata in Autocad. Questo fornisce anche la possibilità di lavorare con la stessa sezione di RocFall, in modo tale da ottenere un confronto ottimale tra le traiettorie ricavate dai due software. Nella Figura 6.12 è possibile osservare la sezione in cui si ha la traiettoria principale del masso.

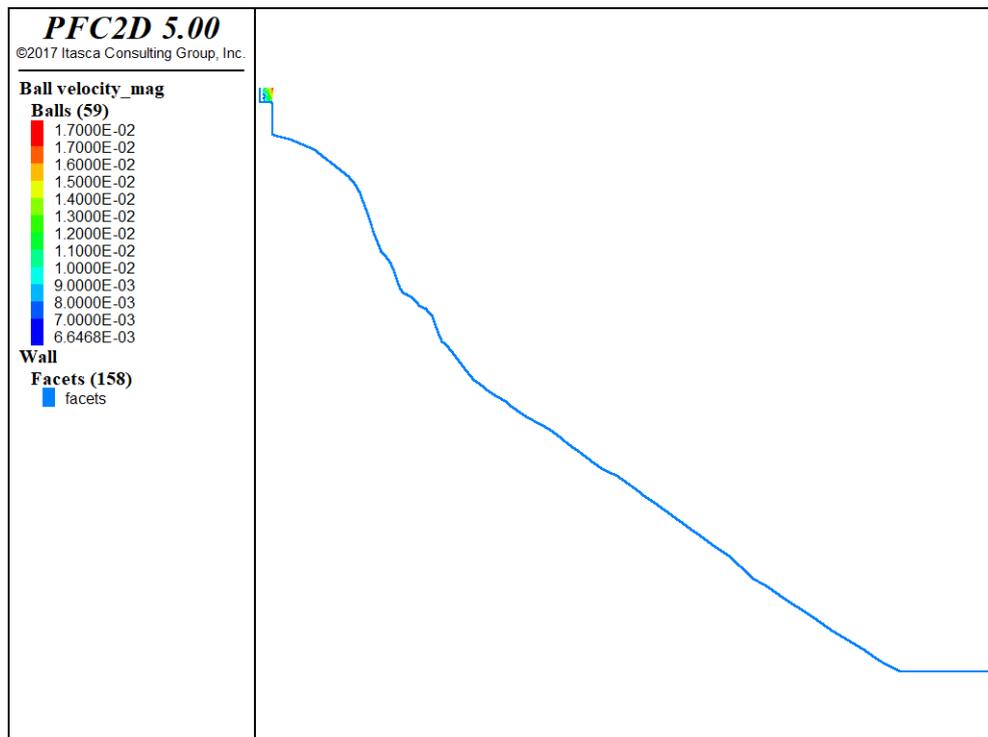


Figura 6.12- Rappresentazione della sezione della traiettoria principale (PFC2D 5.00).

Si procede con la definizione delle condizioni iniziali, nel caso di disaggio del masso si deve rappresentare la condizione di trigger. Come si è visto nel Capitolo 4, la spinta è stata applicata in testa al masso mediante il martinetto. La soluzione migliore per descrivere ciò è l'applicazione di una forza in direzione x nello spigolo del masso a contatto con il muro. Quindi alla ball 46 viene applicata una forza di 100 kN, come rappresentato nella Figura 6.13. I due diversi colori rappresentano le forze applicate su ogni singola particella. Il disco in rosso rappresenta il punto in cui è stato collegato il

martinetto e applicata la spinta. Oltre alla forza esterna il masso è ovviamente soggetto alla forza di gravità.

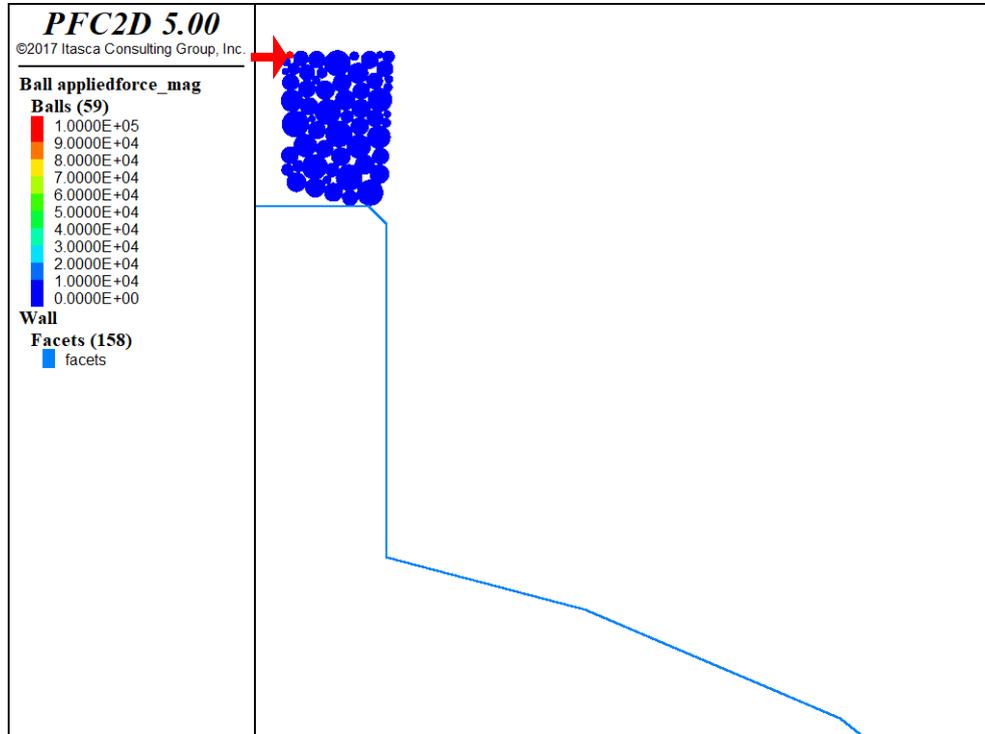


Figura 6.13- Posizione iniziale del masso e punto di applicazione della forza esterna.

Una volta determinate le condizioni iniziali, è possibile partire con la simulazione del fenomeno. L'obiettivo è quello di riprodurre il comportamento del masso durante le operazioni di disaggancio nel sito di Antey. Sotto l'azione di queste forze il blocco inizialmente ruota attorno al suo punto di appoggio, come rappresentato nelle Figure 6.14 6.15 e 6.16. Fino ad ora non sono state prese in considerazioni le proprietà del pendio, in quanto il punto centrale erano le reciproche interazioni delle ball e dei legami presenti tra di esse. Si procede quindi con la definizione del modello di contatto tra il pendio (wall) e il masso (ball). Il modello utilizzato è il "linear" descritto nei paragrafi precedenti, quindi si andranno a calibrare i parametri k_n , k_s , μ . I parametri di default scelti sono:

$$k_n = 1e7$$

$$k_s = 1e4$$

$$\mu = 0.1$$

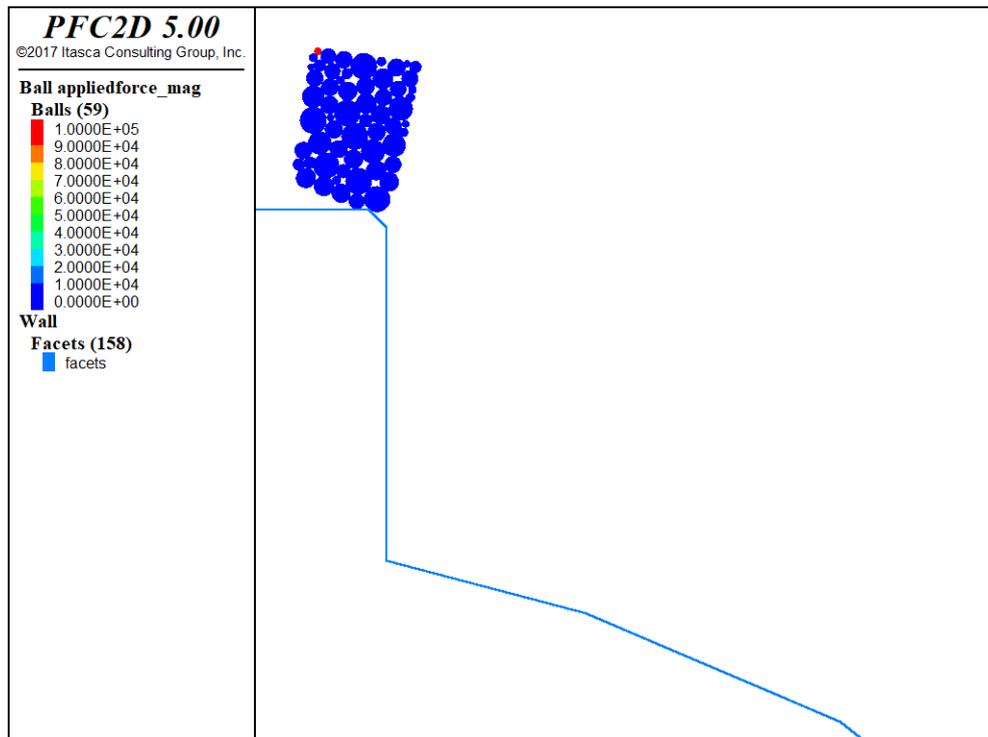


Figura 6.14- Fase di spinta del masso.

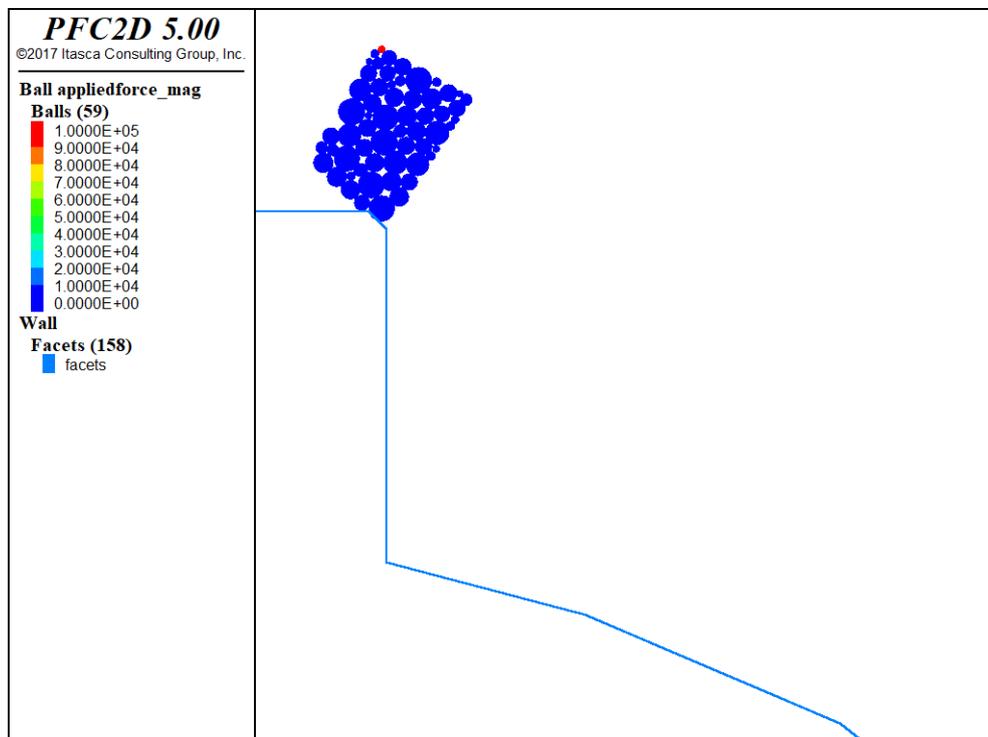


Figura 6.15- Fase di spinta del masso.

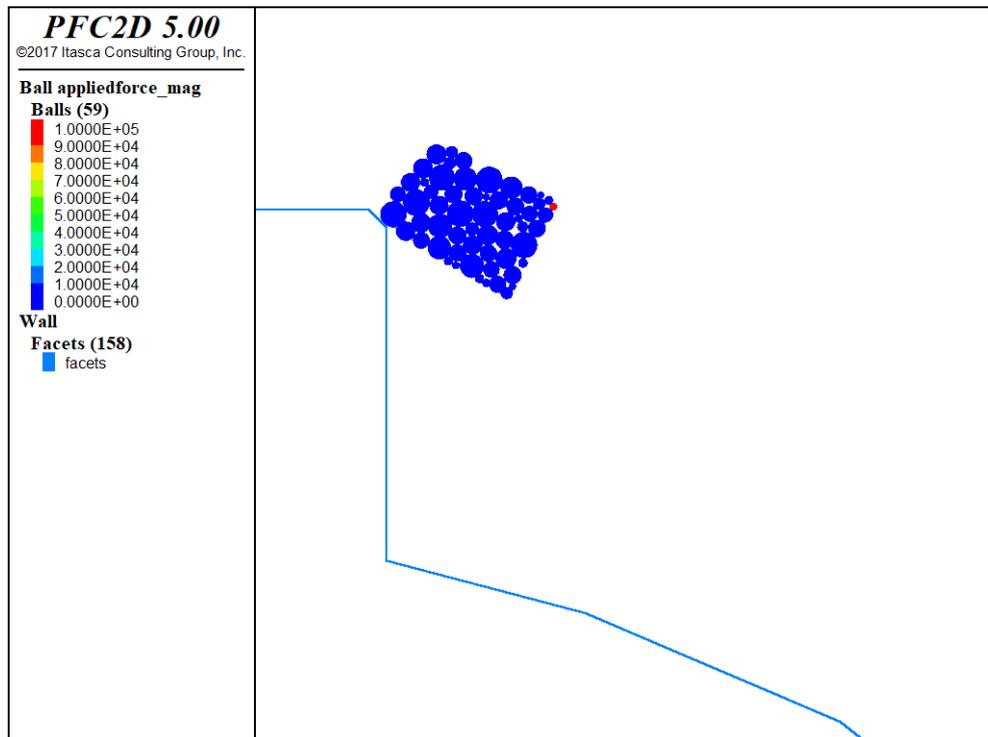


Figura 6.16- Fase di spinta del masso.

Successivamente, soggetto alla forza di gravità, si ha la fase di caduta libera fino a impattare con la porzione di pendio ai piedi della parete iniziale (Figura 6.17).

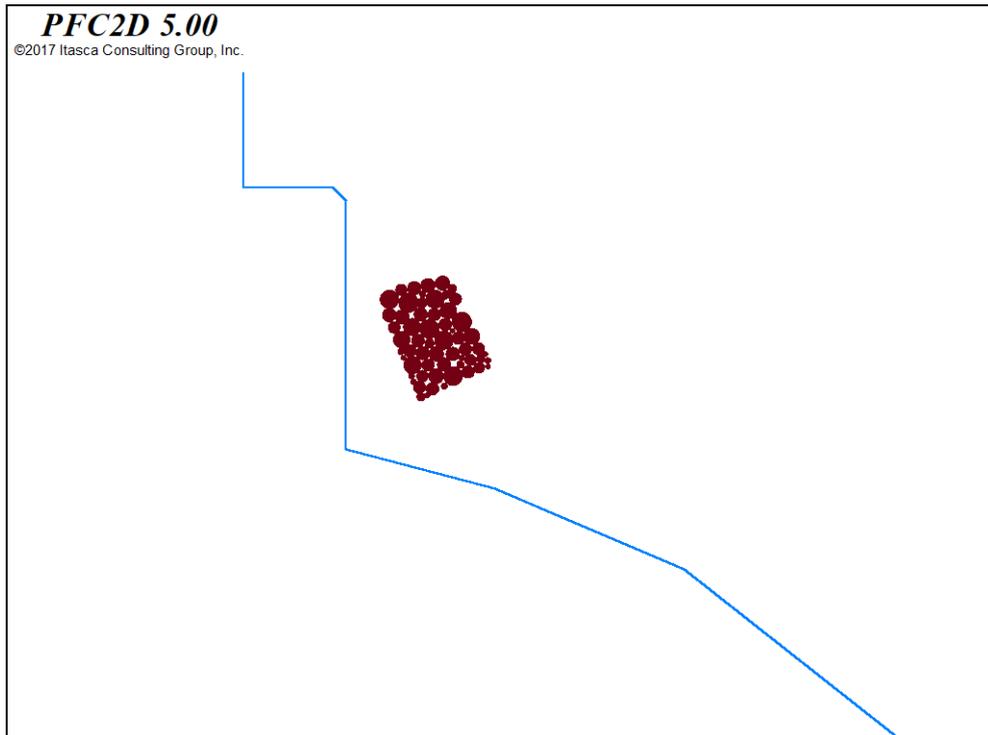


Figura 6.17- Fase di caduta libera del masso.

Il masso, a causa dell'impatto con il pendio, subisce una frantumazione che non avviene nel caso del modello parallel bond, mentre con il modello flat-joint si ha una prima fratturazione a seguito del primo impatto, come è possibile vedere nella Figura 6.18.

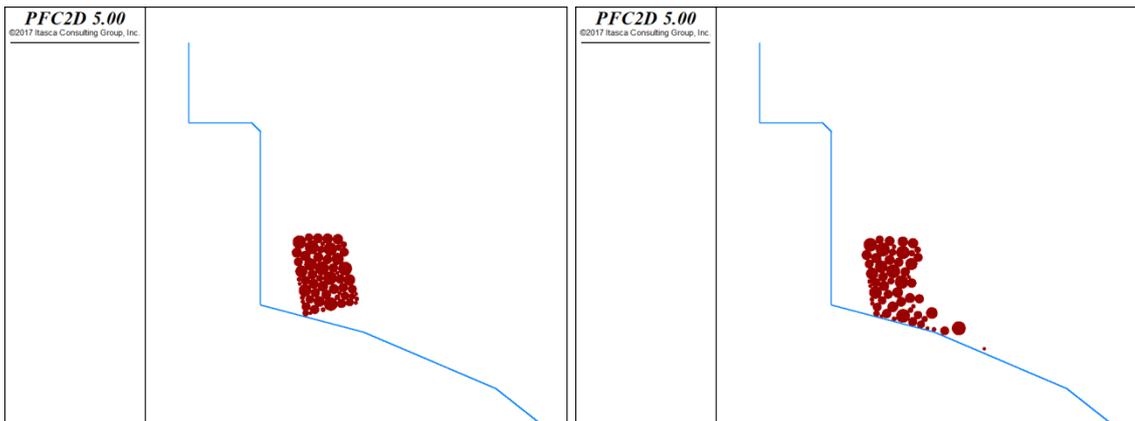


Figura 6.18- (a) simulazione del masso con modello particle bond; (b) simulazione del masso con modello flat-joint.

Scopo dell'analisi è quello di andare a riprodurre le rotture subite dal masso durante gli impatti. Il modello scelto per rappresentare il masso durante la back analysis è quindi il modello flat-joint.

Dall'osservazione in sito del disgaggio, è noto che a causa del primo impatto con il pendio il masso ha subito una prima fratturazione, quindi si scelgono dei parametri del primo tratto in modo tale da andare a riprodurre questa fase. Un primo tentativo per migliorare la modellazione viene fatto lasciando invariato il k_s e andando ad aumentare il k_n fino a $1e10$. Questo porta ad un miglioramento del modo in cui impatta il masso. Inoltre, facendo riferimento anche ai risultati ottenuti nel capitolo 5 con RocFall, una parte delle sfere deve arrestarsi in questo primo tratto. Per questo motivo il k_s viene posto pari a $1e8$. Come primo tentativo viene considerato accettabile e si procede alla calibrazione degli altri tratti del pendio. Una parte delle sfere quindi si arresta, mentre una parte procede con la discesa lungo il pendio. Considerando i punti di arresto dei massi ottenuti in RocFall, riportati nella Tabella 6.4, si procede con la calibrazione dei tratti corrispondenti.

Tabella 6.4- Punti di arresto dei blocchi lungo la traiettoria principale (RocFall).

Distanza [m]	Numero di blocchi
6	10
10	73
14	9
108	1
194	2

Queste coordinate vengono prese come riferimento di partenza, lo scopo in PFC non è quello di trovare i punti di arresto e le traiettorie coincidenti con RocFall, ma quello di ricreare al meglio ciò che è successo realmente in sito.

In PFC2D è possibile cambiare le proprietà dei contatti per ogni faccia degli elementi wall e in ogni tratto del muro vengono calibrati i microparametri. Si procede quindi modificando le proprietà dei tratti in corrispondenza dei punti in cui le sfere si devono arrestare e lasciando invariate le proprietà di default per gli altri tratti. Il valore di k_s e di μ viene aumentato nei tratti in cui i blocchi devono rallentare. In particolare

dall'osservazione di quanto successo in sito i massi, oltre che arrestarsi dopo il primo impatto, si fermano a metà e lungo la parte terminale della parete. Per questo motivo il k_s in alcuni punti della parte terminale del pendio viene posto pari a 1e11, in modo tale da arrestare alcune particelle durante la fase di rotolamento. Nella Tabella 6.5 vengono specificate le coordinate dei vertici e l'ID di ogni tratto oggetto di calibrazione e infine i parametri utilizzati.

Tabella 6.5- Microparametri dei tratti oggetto di calibrazione.

ID	x [m]	y [m]	k_n	k_s	μ
12	0÷5.747	1236.27÷1234.74	1.00E+11	1.00E+08	1.5
17 ÷ 20	26.31÷27.21	1219.99÷1218.33	1.00E+10	1.00E+04	0
42÷44	38.078÷ 41.019	1193.2 ÷1186.15	1.00E+08	1.00E+04	0
45÷51	41.019÷ 48.047	1186.15÷1181.31	1.00E+07	1.00E+11	3
77÷131	63÷109.56	1158.91÷1127.42	1.00E+07	1.00E+06	1
132÷151	109.56÷143.14	1158.91÷ 1103.19	1.00E+07	1.00E+08	1
152	143.14÷150.88	1103.19÷1096	1.00E+07	1.00E+11	3
153	150.88÷155.03	1096÷1093.62	1.00E+07	1.00E+08	1
154	155.03÷160.6	1093.62÷1089.62	1.00E+07	1.00E+11	3
155÷157	160.6÷175.18	1089.62÷1079.77	1.00E+07	1.00E+08	1
158	175.18÷ 180.17	1079.77÷1076.76	1.00E+07	1.00E+11	3
159÷160	180.17÷190.34	1076.76÷1070.11	1.00E+07	1.00E+08	1
161,165	190.34÷230	1070.11÷1067	1.00E+07	1.00E+11	3

Nelle Figure 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22 si riporta l'evoluzione del fenomeno di caduta lungo il pendio, riferendosi alle fasi principali ovvero il momento antecedente l'innesco, il primo impatto con il versante, l'impatto nel punto in cui una parte dei massi cambia traiettoria e la condizione finale di arresto in cui le velocità sono nulle.

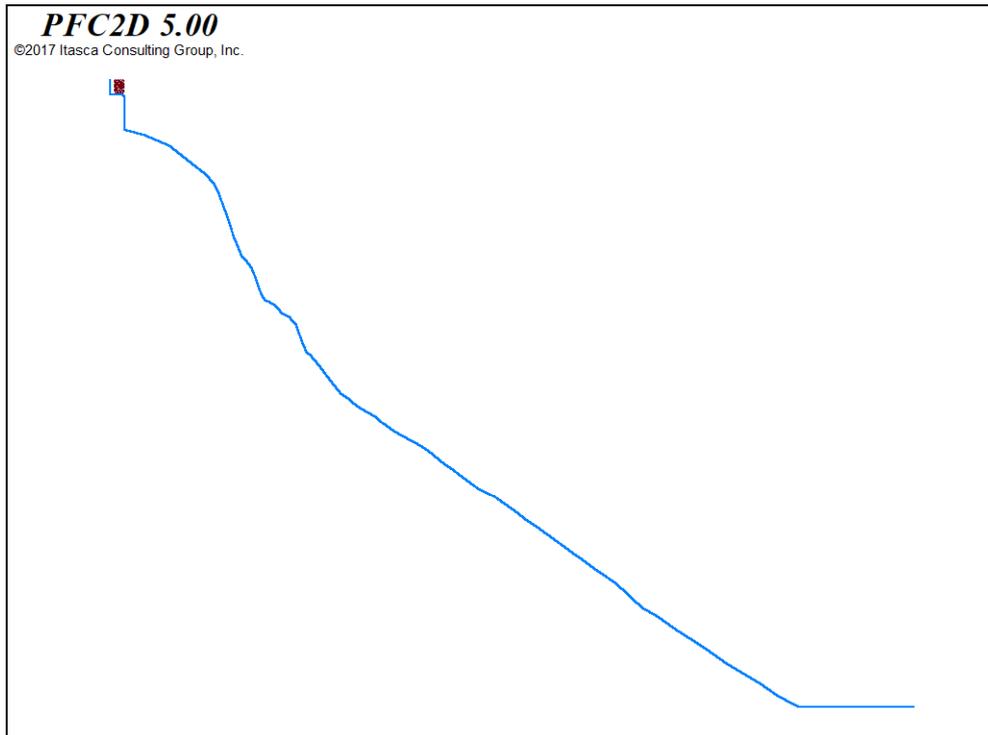


Figura 6.19- Fase iniziale del fenomeno di caduta lungo il pendio.

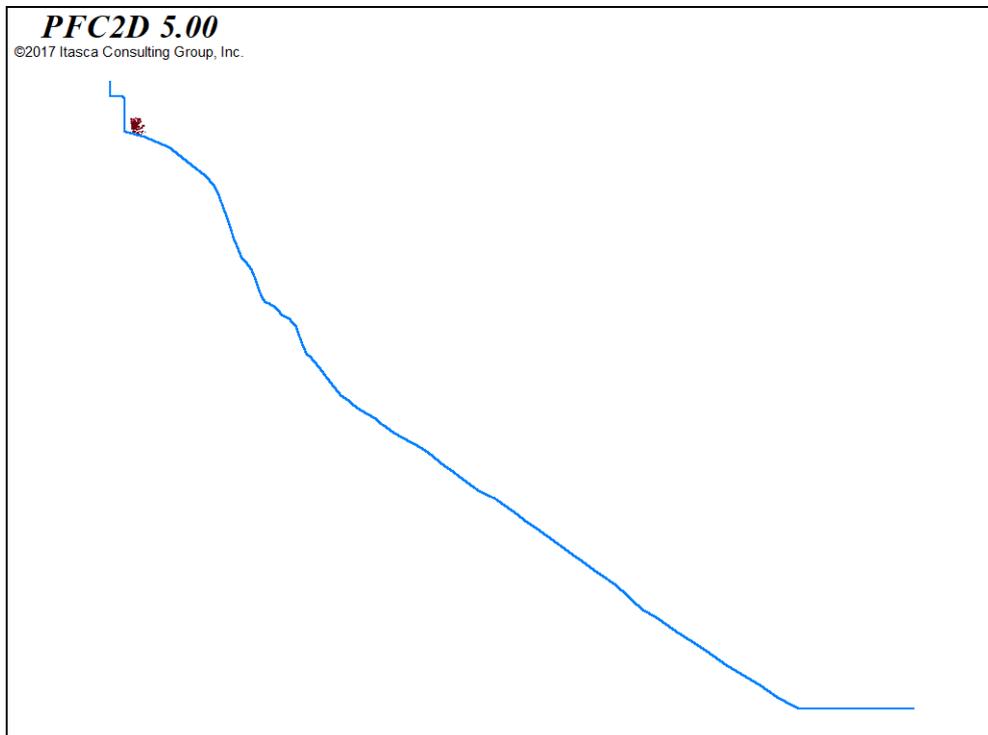


Figura 6.20- Primo impatto del masso con il pendio.

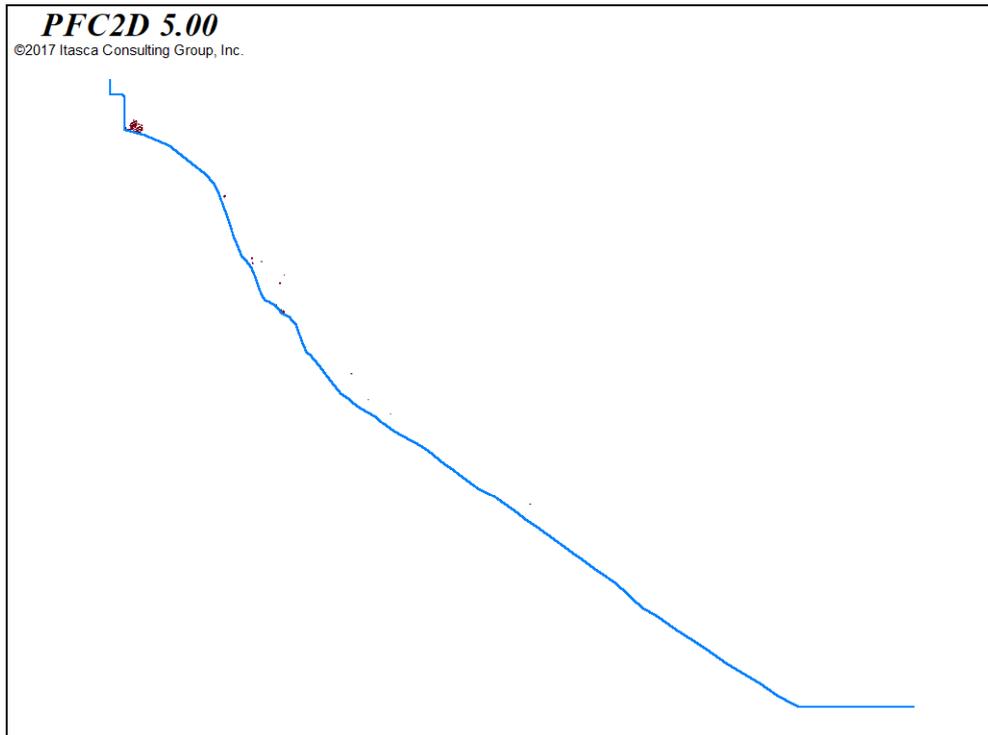


Figura 6.21- Evoluzione del fenomeno di caduta lungo il pendio.

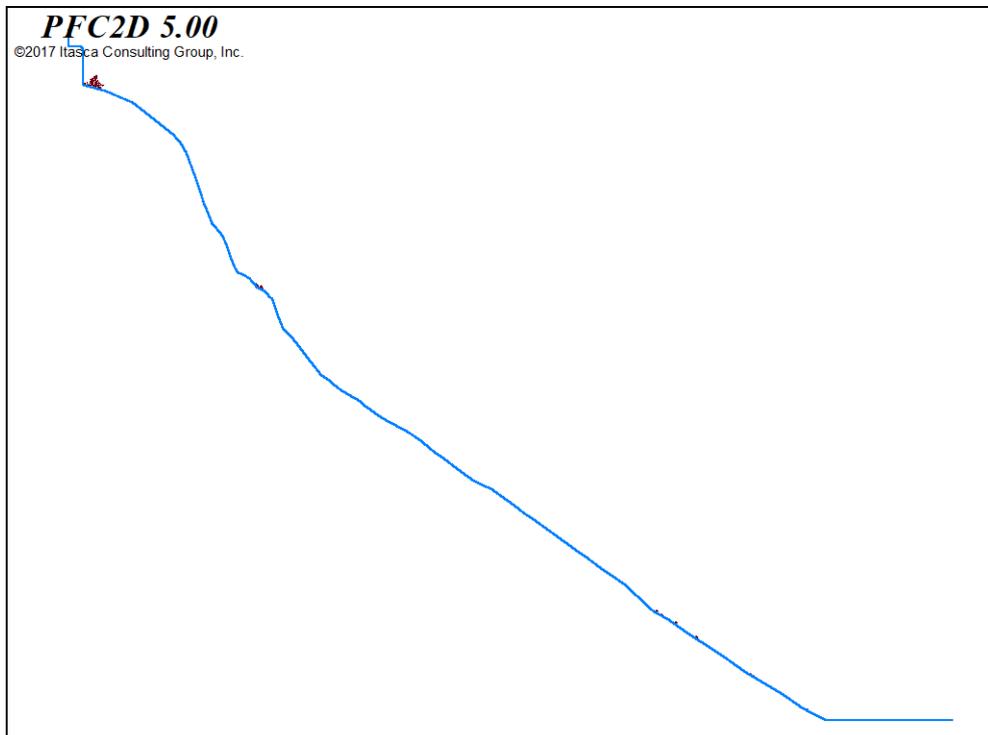


Figura 6.22- Fase finale del fenomeno di caduta e punti di arresto lungo il pendio.

Per osservare meglio le quattro fasi sopra indicate si riportano ingrandimenti dei tratti in cui le sfere si sono arrestate. Nelle Figure 6.23 e 6.24 sono rappresentate le prime due fasi in cui una parte dei massi si arresta ai piedi della parete verticale e una parte continua la sua traiettoria di rotolamento lungo il pendio e di successiva caduta libera fino ad arrestarsi in corrispondenza del tratto di ascissa $x \approx 45$ m.

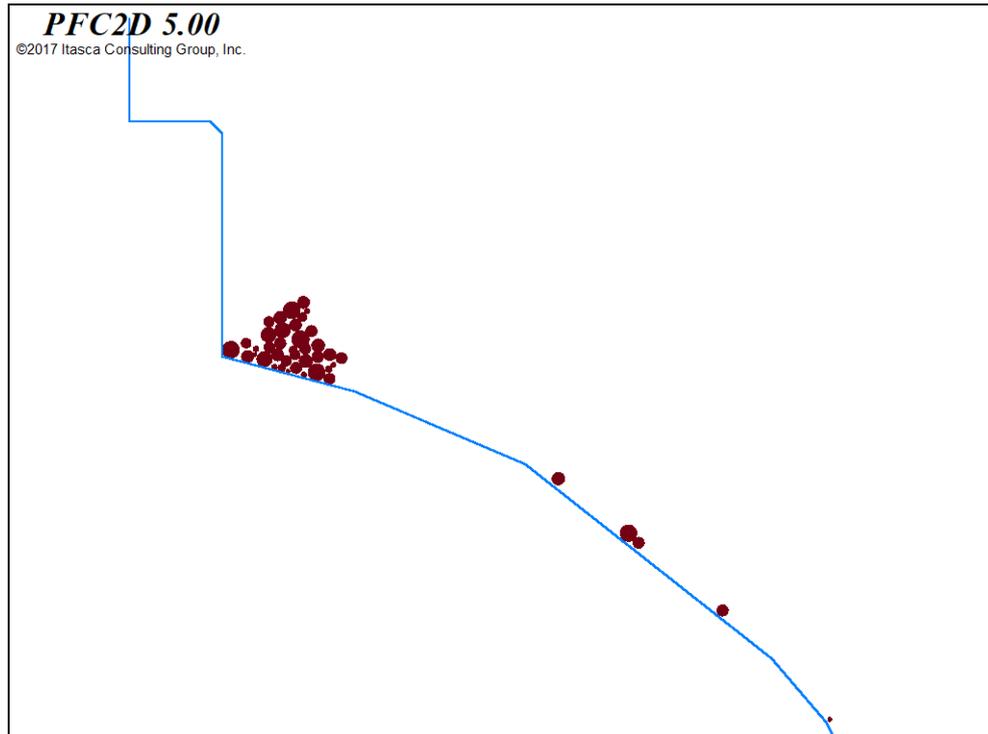


Figura 6.23- Primo tratto di arresto dei blocchi.

Una parte dei dischi continua la traiettoria fino ad arrivare alla parte terminale della sezione (Figura 6.25).

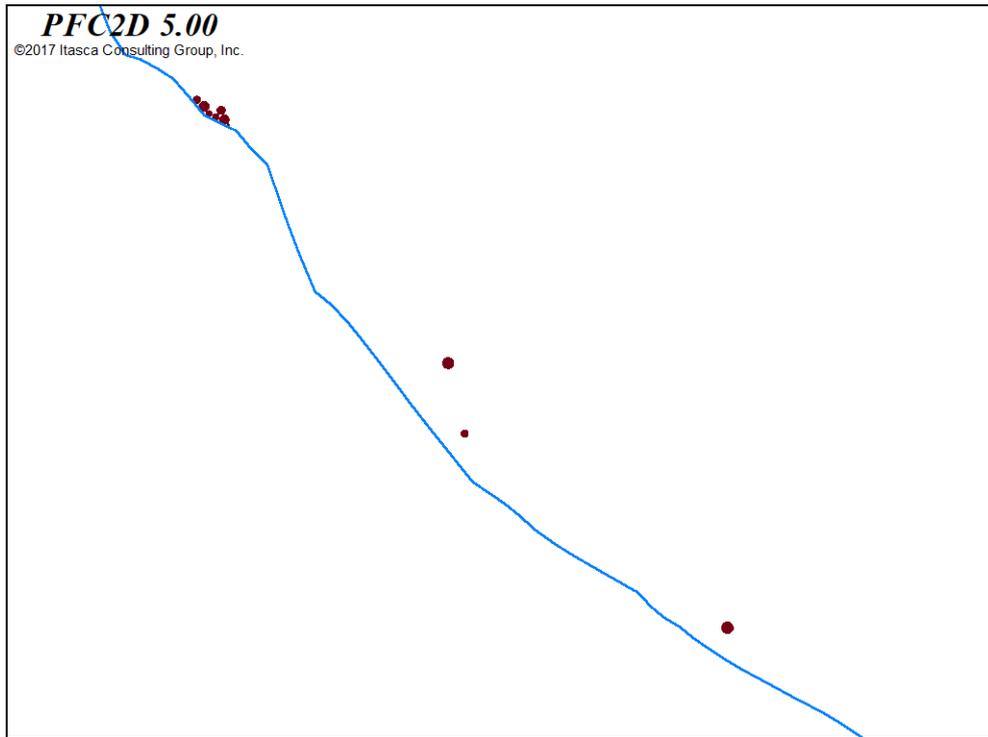


Figura 6.24- Secondo tratto di arresto dei blocchi.

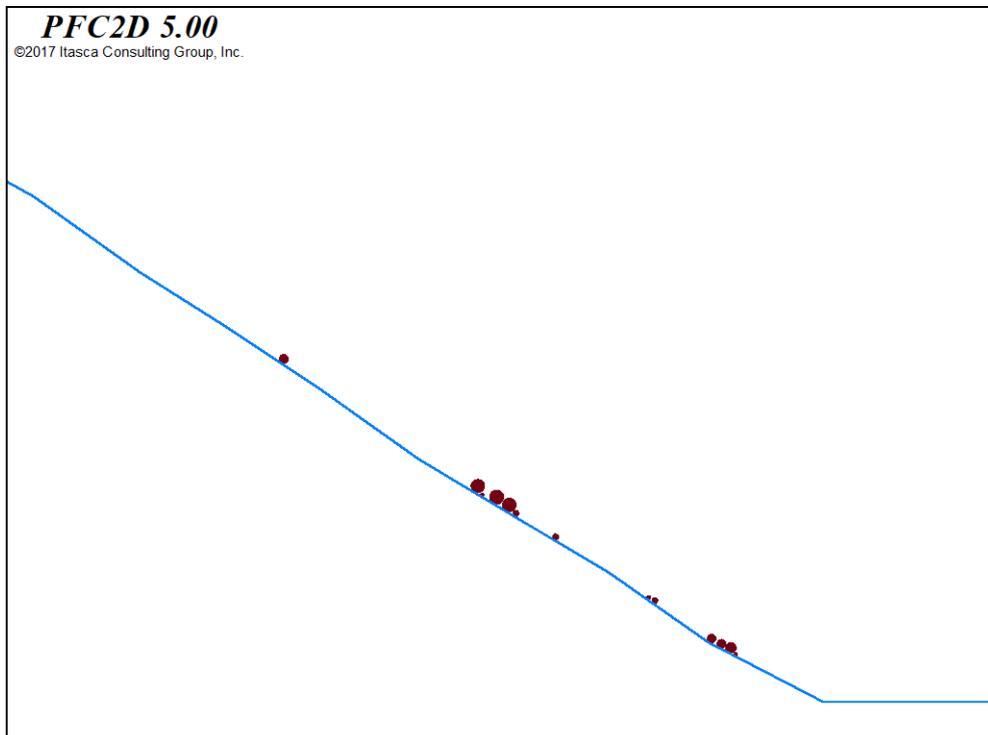


Figura 6.25- Tratto finale di arresto dei blocchi.

Poiché la configurazione finale rispecchia quanto accaduto in sito lungo la traiettoria principale viene considerata accettabile. Si veda l'Allegato C per il codice utilizzato.

Lo studio della seconda traiettoria, evidenziata nel Capitolo 4 e analizzata con RocFall, viene omesso in quanto i dati a disposizione non sono sufficienti per l'analisi con PFC2D, dove la configurazione iniziale ha un ruolo fondamentale. Per ottenere risultati congruenti con la realtà dovrebbe essere note la velocità e la forma del masso. È possibile fare delle ipotesi accettabili per quanto riguarda la velocità iniziale, come è stato fatto attraverso RocFall, considerando la velocità nel punto in cui parte del masso inizia a seguire la seconda traiettoria. Per quanto riguarda invece la geometria iniziale del blocco, non essendo nota, richiederebbe ipotesi e approssimazioni che potrebbero portare ad una riproduzione inesatta del fenomeno avvenuto. Si procede pertanto con l'analisi dei risultati relativi alla prima traiettoria.

6.3. Analisi dei risultati ottenuti

Lo studio dell'evoluzione del fenomeno viene effettuato andando a considerare 3 sfere, rappresentative dei blocchi che si fermano nelle tre posizioni descritte nel paragrafo precedente.

Per meglio capire il tipo di cinematismo avvenuto durante il crollo, si riportano le traiettorie delle tre sfere di riferimento nelle Figure 6.26, 6.27 e 6.28. Queste sfere sono state scelte come rappresentative dei tre gruppi di massi che si arrestano nelle posizioni indicate.

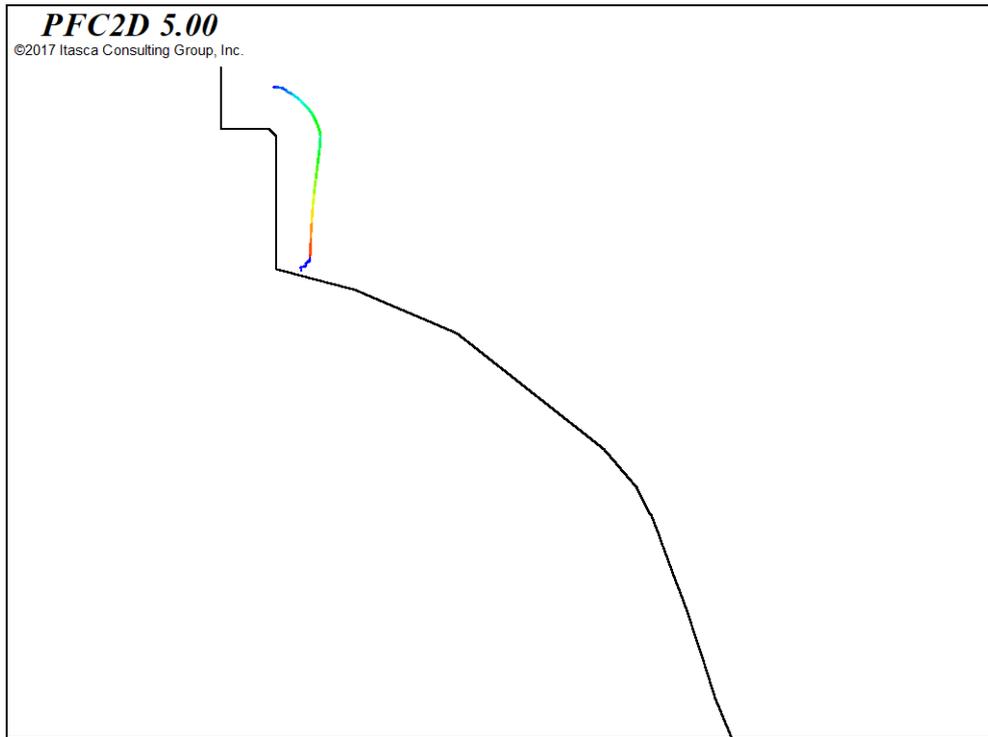


Figura 6.26- Traiettoria della ball numero 16.

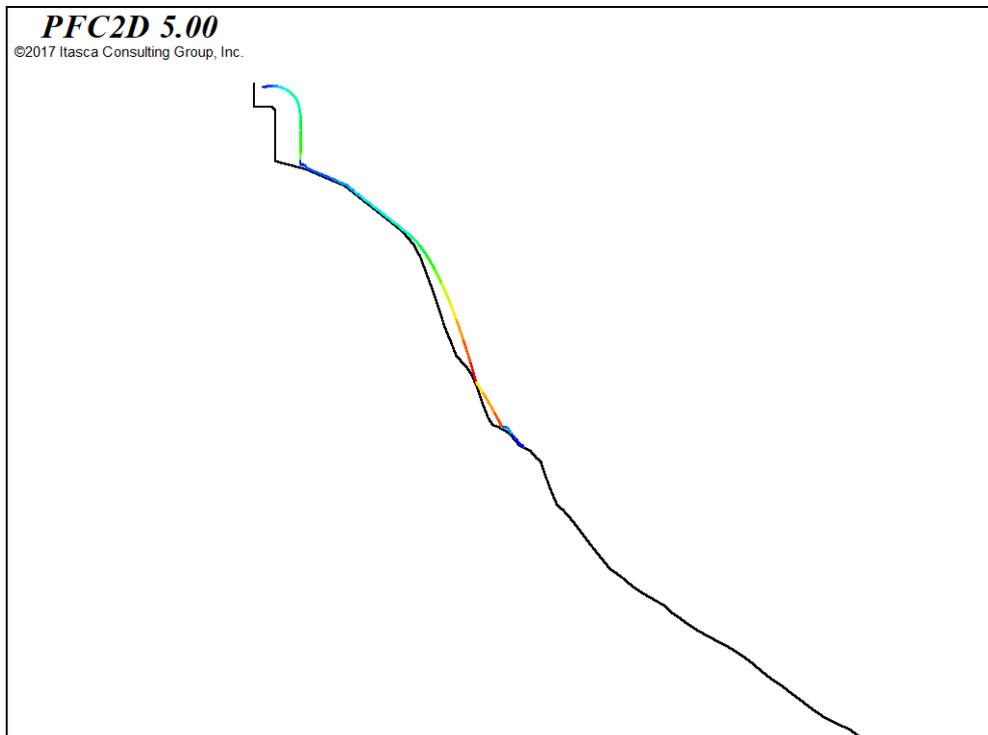


Figura 6.27- Traiettoria della ball numero 31.

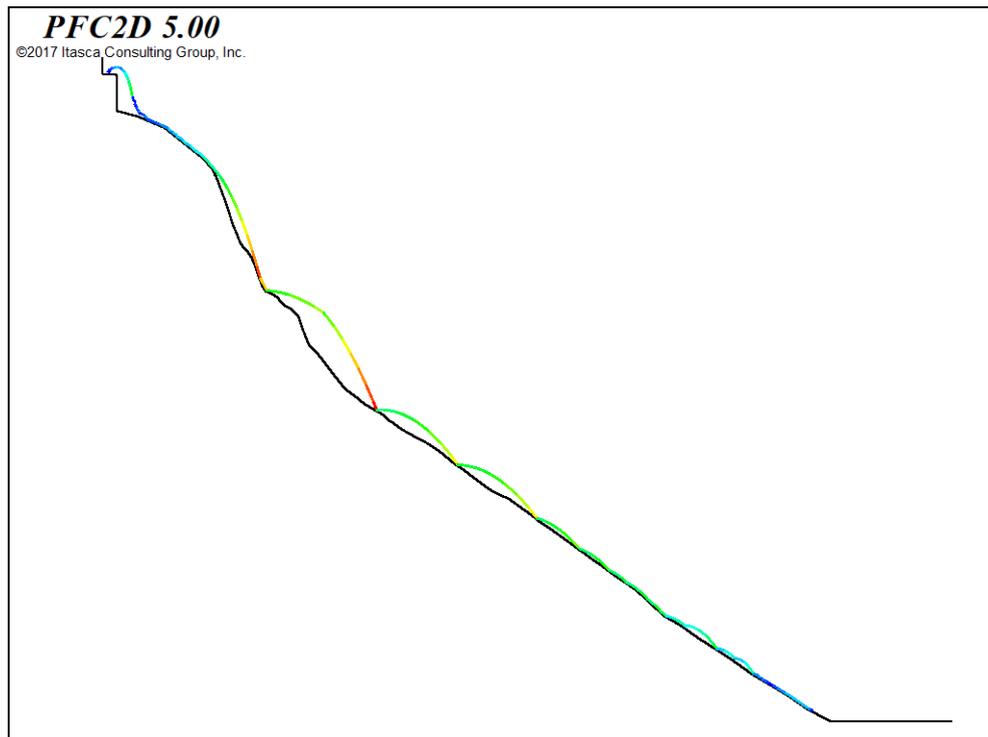


Figura 6.28- Traiettoria della ball numero 6.

Si osserva quindi che la particella numero 16 si ferma ai piedi della parete verticale subito dopo la prima fase di caduta libera. La particella numero 31 continua la caduta fino ad arrestarsi a circa 45 metri dal punto di innesco e infine la particella 6 raggiunge i piedi del versante. Per ognuna di esse si riportano nella Figura 6.29 i grafici della velocità di caduta in funzione della durata dell'evento.

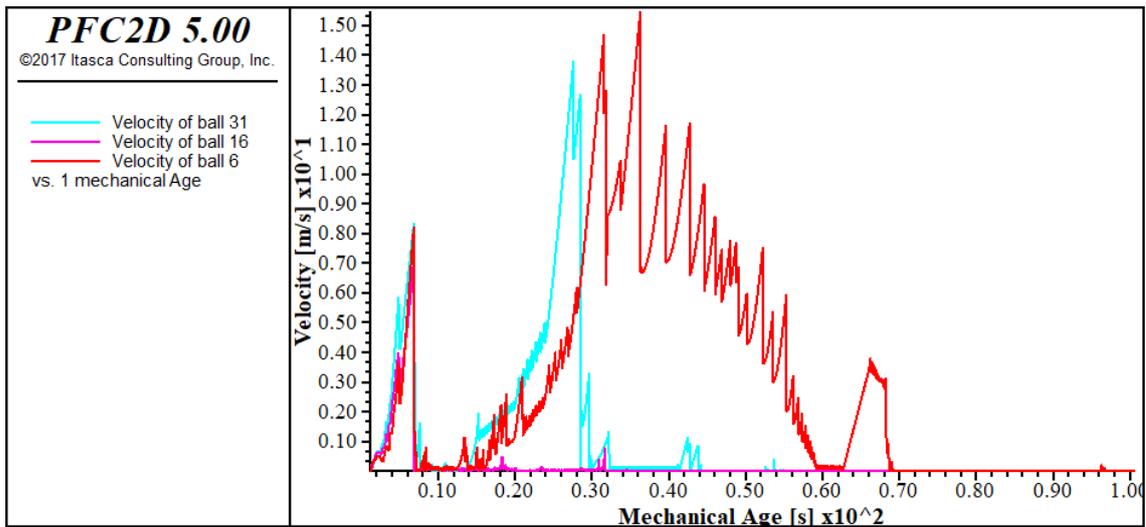


Figura 6.29- Andamento delle velocità registrate durante la simulazione.

È possibile osservare come i tre andamenti sono coincidenti inizialmente, raggiungendo un picco iniziale pari a 8 m/s. Questo è rappresentativo della fase di caduta libera subito dopo l’innesco in cui il masso non ha subito ancora fratturazioni a causa dell’impatto. Con il primo impatto le tre velocità tornano a zero e a questo punto i tre andamenti si differenziano. La curva viola rappresenta il moto del gruppo di sfere che si fermano subito dopo il primo impatto, infatti è possibile osservare come, dopo il picco raggiunto, le velocità si annullano e si mantengono pari a zero per tutta l’analisi. La curva azzurra rappresenta il moto delle sfere che si arrestano a metà traiettoria. L’andamento è caratterizzato anche da un secondo picco della velocità che arriva a circa 14 m/s, raggiunto dopo una serie di rimbalzi che subiscono le sfere al contatto con il pendio, in corrispondenza della fase di caduta libera prima del secondo impatto e al successivo arresto. La curva in rosso rappresenta infine le sfere che hanno compiuto la traiettoria completa fino ad arrivare ai piedi della parete ed arrestarsi in corrispondenza della massicciata sopra il sentiero. In questo caso la velocità non tende rapidamente a zero come nelle altre due curve, ma si annulla dopo una serie di ribalzi e impatti con la parete rappresentati della successione dei picchi.

Nella Figura 6.30 si riporta l’energia cinetica del sistema durante l’evoluzione del fenomeno. La curva rappresenta la somma delle energie cinetiche calcolate dal programma in funzione della durata dell’evento.

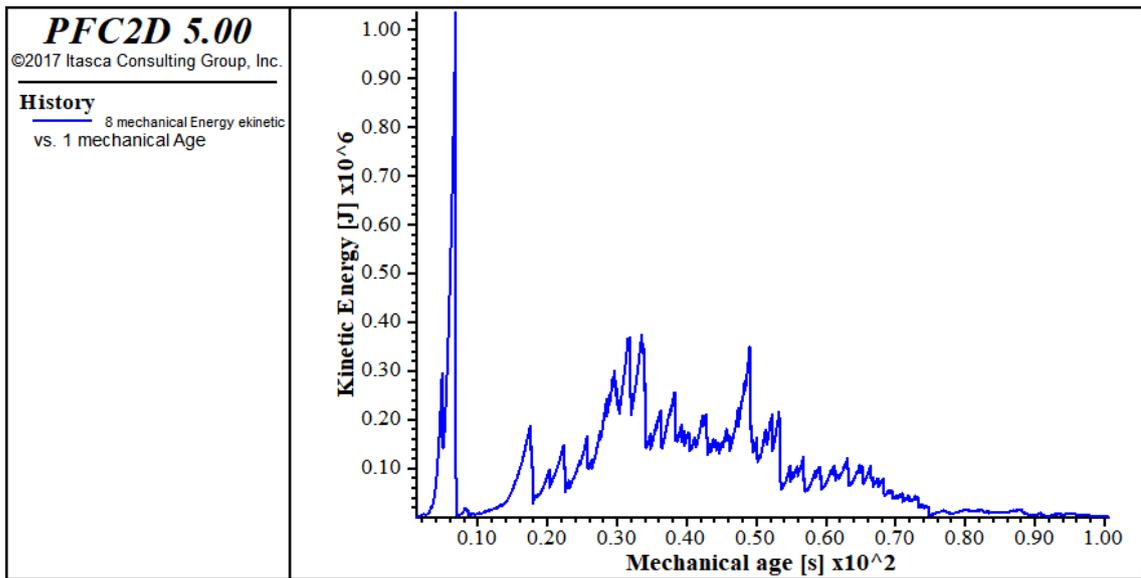


Figura 6.30- Andamento dell'energia cinetica registrata durante la simulazione.

L'andamento dell'energia è coerente con quello delle velocità, infatti si ha un picco in corrispondenza della fase di caduta libera iniziale, seguito da una sequenza di picchi rappresentanti le fasi di impatto e rimbalzo. Inoltre l'energia va a zero in corrispondenza delle fasi di arresto degli elementi ball.

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI

Lo studio del disgaggio del masso nel sito di Antey-Saint-André è stato effettuato mediante diversi approcci:

- Monitoraggio in sito;
- Applicazione del metodo probabilistico mediante:
 - Analisi con metodo Lumped Mass con il software RocFall (Rocscience);
 - Analisi tridimensionale mediante Rockyfor 3D (ecorisQ);
- Applicazione del modello ad elementi distinti (DEM) mediante il software PFC2D.

Il monitoraggio controllato del masso è stato eseguito mediante estensimetro, stazione totale e laser scanner. In aggiunta a questi strumenti sono state eseguite delle riprese e delle foto, le quali hanno permesso di studiare e meglio capire quanto successo durante le operazioni in sito e quindi di semplificare la modellazione a posteriori dell'evento di caduta massi. Nel capitolo vengono confrontati i risultati ottenuti nei capitoli precedenti, in modo tale da evidenziare limiti e vantaggi di ogni software.

L'esatta previsione e l'analisi di un fenomeno come il crollo in roccia risulta molto difficoltosa a causa dell'incertezza dei diversi fattori da prendere in considerazione. I pendii a rischio hanno spesso una geometria fortemente variabile. La posizione dei massi instabili è spesso incerta. I materiali che costituiscono il pendio possono variare considerevolmente da una sezione all'altra e le principali proprietà sono solitamente non

note. Tutti questi fattori considerati nel loro insieme rendono estremamente difficile un'accurata previsione dei crolli (Stevens, Warren D., 1998). Per simulare un processo fisico di questo tipo, la scelta dei software è importante in quanto anche le equazioni utilizzate per simulare i crolli sono influenzate dalla variabilità dei parametri. Tutti questi fattori vengono presi in considerazione nello studio effettuato sul sito di Antey-Saint-André ed analizzati, come già detto, mediante un metodo probabilistico e un metodo agli elementi distinti.

Nella maggior parte dei casi, essendo l'area a rischio crollo è molto estesa, la geometria del pendio può variare considerevolmente ed effettuare un rilievo dettagliato e un'analisi dell'intera area a volte non è fattibile sia in termini di praticità ed accessibilità in sito, sia in termini economici. Spesso si hanno a disposizione rilievi di poche sezioni che sembrano essere soggette a crolli, perciò la geometria utilizzata risulta non corretta. La geometria del pendio e le sue variazioni sono critiche per la determinazione dei crolli in roccia, in quanto influenzano fortemente le traiettorie dei blocchi. Un altro aspetto preso in considerazione sono i materiali i quali possono variare considerevolmente lungo il versante e da una sezione trasversale all'altra. Le proprietà caratterizzanti il pendio spesso non sono note, come nel caso in esame, vengono ricavate mediante back analysis nel caso bidimensionale, mentre nel modello tridimensionale si fa riferimento a valori indicati in letteratura.

Si procede con la definizione delle condizioni iniziali del masso, ovvero posizione iniziale, geometria e massa. La posizione iniziale del masso instabile è stata trovata mediante triangolazione dei dati ottenuti da stazione totale e dal vertice trigonometrico fisso a disposizione. Viene definita una massa pari a 27 kN/m^3 , mentre le dimensioni sono definite facendo riferimento alla geometria iniziale del masso presente in sito. Una volta definite le caratteristiche e le proprietà del masso e del pendio si procede con il confronto dei risultati ottenuti mediante analisi bidimensionale.

Nelle Figure 7.1 e 7.2 si riportano le sezioni considerate e le traiettorie.

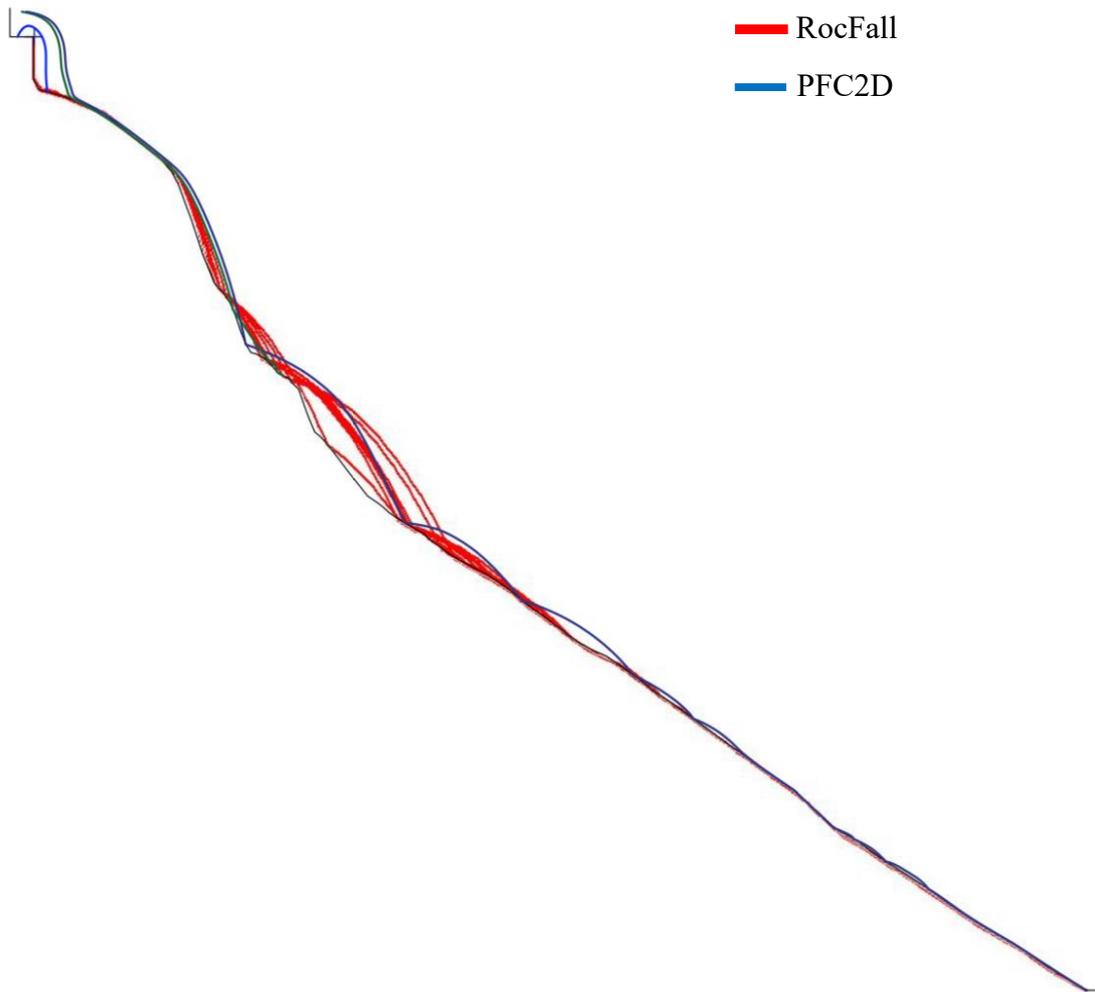


Figura 7.1- Sezione e Traiettorie ottenute mediante RocFall e PFC2D.

Nella Figura 7.1 sono riportate tutte le possibili traiettorie ottenute in RocFall e le traiettorie ottenute in PFC2D, di tre massi scelti in base ai punti in cui si arrestano, il primo si ferma dopo il primo impatto ai piedi della parete verticale, il secondo a circa 45 m dal punto iniziale e infine il blocco che arriva ai piedi del pendio in modo da poter osservare una traiettoria completa. Come è possibile notare, il moto è caratterizzato da tre tipi di cinematismi: la caduta libera, il rotolamento e i rimbalzi lungo il pendio. In entrambi i software si ha la fase di caduta libera iniziale, subito dopo la spinta del masso, lungo la parete verticale di otto metri, alla fine della quale la maggior parte dei blocchi si arresta. Il moto procede con il rotolamento lungo il pendio, fino ad una seconda fase di caduta libera. Nella parte finale del pendio in entrambi i casi si ha un

moto di rotolamento preponderante e i rimbalzi e il moto in aria sono sempre più ridotti. Le traiettorie ottenute sono simili e coerenti con quanto avvenuto in sito.

Per quanto riguarda i punti di arresto invece, come già detto nei Capitoli 5 e 6 le zone in cui i massi si fermano sono prevalentemente due per quanto riguarda il caso di RocFall e tre per quanto riguarda PFC. La maggior parte dei massi si arresta dopo il primo impatto, subito dopo la fase di caduta verticale, e alla fine del pendio, nell'ultimo tratto dove è già presente un deposito di massi di dimensioni diverse formatosi nel corso degli anni. L'impatto dei blocchi durante la fase di caduta con questi massi permette il loro arresto prima di raggiungere il sentiero alla base del versante. I risultati ottenuti differiscono in corrispondenza del tratto compreso tra i 40 e i 50 m in cui si ha una diminuzione della pendenza. In corrispondenza di questo una parte dei blocchi si arresta in PFC, mentre in RocFall questo non avviene. Si procede con il confronto delle velocità ottenute attraverso i due software, riportate nelle Figure 7.4 e 7.5.

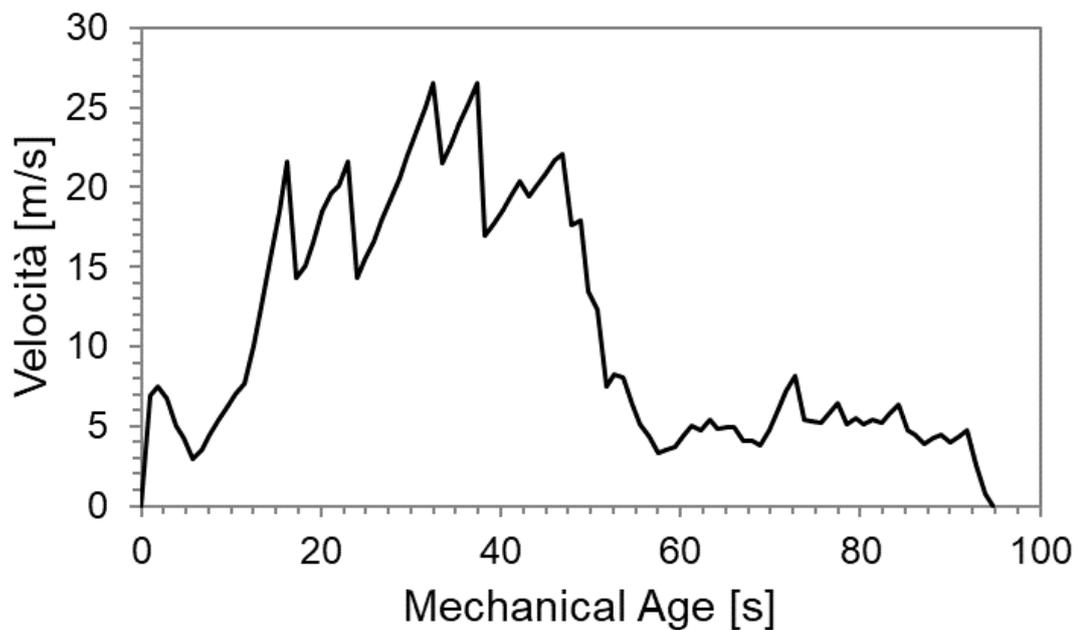


Figura 7.2- Velocità dei blocchi ottenuti mediante l'utilizzo del software RocFall.

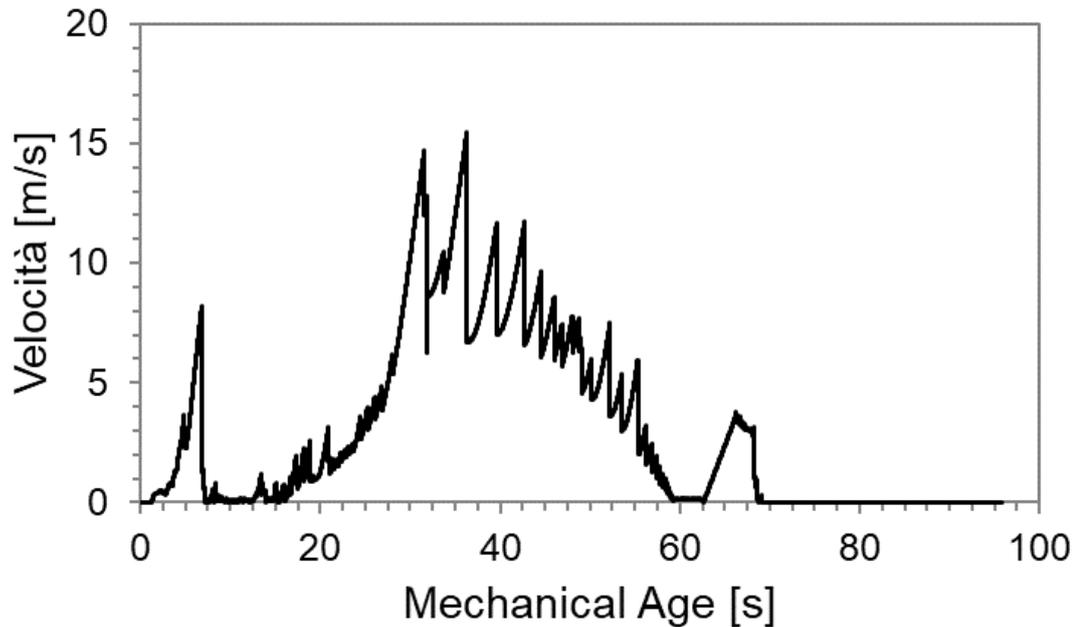


Figura 7.3- Velocità del blocco ottenuta mediante l'utilizzo del software PFC2D 5.0.

Le curve ottenute in RocFall rappresentano la massima velocità dei blocchi in ogni punto del pendio, mentre il grafico riportato nella Figura 7.5 rappresenta la velocità della sfera che arriva ai piedi del pendio ottenuta con PFC. I due andamenti sono difficilmente confrontabili in quanto uno rappresenta il valore medio di velocità di più blocchi, mentre il secondo rappresenta il valore di velocità di un preciso blocco. Tuttavia è possibile vedere come i due andamenti siano coerenti tra di loro. Si ha un picco iniziale, i valori massimi di velocità sono compresi tra i 20 e i 40 secondi e infine i valori di velocità tendono a diminuire fino ad annullarsi nell'ultima parte della curva. L'andamento in PFC è meno regolare e caratterizzato da picchi che rappresentano i rimbalzi durante il tragitto lungo il pendio. I valori massimi di velocità raggiunti in RocFall sono di 25 m/s mentre in PFC di 15 m/s, in generale con quest'ultimo si ottengono valori di velocità minori. La differenza maggiore si ha nella fase finale in cui si cerca di rappresentare l'arresto del blocco nella parte terminale del pendio. In RocFall i valori si mantengono intorno ad un valore di 5 m/s per poi annullarsi a 95 s. in PFC si annullano a 75 s e si mantengono a zero fino alla fine del processo. Infine è importante porre l'attenzione in corrispondenza dell'istante iniziale. È possibile notare come nella prima curva la velocità aumenta istantaneamente fino a raggiungere il picco. Nella

curva ottenuta con PFC questo non succede, in quanto il blocco inizialmente è soggetto alla spinta in testa e quindi si ha una prima fase di rotazione che in RocFall non è presente.

Dal confronto dei risultati ottenuti è possibile fare delle osservazioni dei software utilizzati e capire limiti e vantaggi di ciascuno di essi.

L'utilizzo di un software agli elementi distinti come PFC2D permette di costruire un modello molto raffinato e dettagliato, che permette di prendere in considerazione molti aspetti non contemplati da altri software.

- È stata definita una forma del masso precisa con la quale è possibile riprodurre quanto presente in sito.
- La possibilità di applicare una forza esterna in un preciso punto permette la simulazione della spinta attraverso il martinetto e quindi di osservare una rotazione del masso intorno al punto di appoggio con il pendio, realmente accaduta durante le operazioni di disaggancio, a cui fa seguito la fase di caduta libera presente anche in RocFall.
- Attraverso l'utilizzo degli elementi distinti si considera il masso come formato da sfere unite tra di loro attraverso dei legami. La rottura dei legami a causa delle forze agenti permette di riprodurre la frantumazione del masso che avviene in sito a causa degli impatti con il pendio. È questo il principale vantaggio rispetto al modello creato con RocFall, nel quale l'analisi viene effettuata considerando la massa come concentrata in un punto.
- La possibilità di analizzare ogni sfera separatamente dalle altre permette di ottenere risultati molto più precisi, mentre in RocFall, essendo un metodo probabilistico, i risultati sono ottenuti come media delle varie simulazioni effettuate.
- Durante la fase di calibrazione dei parametri del pendio, risulta più facile il controllo delle traiettorie e dei punti di arresto dei singoli blocchi, di conseguenza è possibile riprodurre in maniera più esatta quanto successo in sito.

Un modello così complesso e dettagliato può a volte non essere adatto per riprodurre un fenomeno come la caduta massi, caratterizzato da molteplici fattori spesso difficilmente individuabili e quindi caratterizzato da una forte incertezza. Al contrario, i modelli probabilistici sono più semplici e richiedono un numero inferiore di dati di input per l'analisi del fenomeno. Questo rappresenta un vantaggio quando le informazioni a disposizione sono limitate. Infatti, come detto precedentemente, gli andamenti ottenuti sono simili, in particolare i tratti in cui si annullano le velocità e l'energia, informazioni necessario quando è contemplato, ad esempio, come intervento l'installazione di una barriera paramassi. I modelli 2D forniscono una buona descrizione del fenomeno e dei risultati sufficienti qualora sia necessaria la progettazione di interventi di difesa dalla caduta massi. Tuttavia un'analisi completa e più accurata del fenomeno necessita lo sviluppo di un modello 3D.

L'utilizzo di Rockyfor3D ha permesso di valutare il percorso dei blocchi non più solo lungo una sezione considerata come più probabile, ma lungo tutto lo sviluppo del versante. Attraverso il Modello Digitale del Terreno sono state valutate le traiettorie e i punti di arresto dei blocchi in tutta l'area coinvolta nelle operazioni di disaggio. Come quanto detto nel caso di RocFall, l'analisi probabilistica effettuata presenta dei limiti, i quali possono essere superati mediante la costruzione di un modello in tre dimensioni con l'utilizzo degli elementi finiti.

Il caso di Antey-Saint-André è un esempio di come l'integrazione di un sistema di monitoraggio con un modello numerico permetta una buona descrizione di un fenomeno diffuso e problematico come la caduta massi. Grazie al monitoraggio controllato è possibile conoscere la fase di innesco del fenomeno, difficilmente riproducibile durante la modellazione. Spesso una corretta interpretazione dell'evoluzione del fenomeno è impedita dalla presenza di ostacoli e elementi di disturbo. La scarsa visibilità e l'impossibilità di accedere alle aree in cui i massi si sono arrestati costituiscono ulteriori limiti. Nei fenomeni di caduta massi in cui gli strumenti di monitoraggio non sono sufficienti ad andare a descrivere il reale comportamento del masso, avvalersi della modellazione numerica garantisce un risultato soddisfacente per la previsione dell'evoluzione del fenomeno.

BIBLIOGRAFIA

- Astè J.P., Cambou B., Facletta J. L. 1984. "Comportement des masses rocheuse instables. De la prevision a la prevention." IV symposium on Landslides, Toronto, vol. I, II, pp. 441-446.
- Bassato G., Cocco S. e Silvano S. 1985. "Programma di simulazione per lo scoscendimento di blocchi rocciosi." *Dendronatura* 6 (2), pp. 34-46.
- Broili L. 1973. "In situ tests for the study of rockfall. *Geologia Applicata e Idrogeologia* 8 (1)".
- Broili, L. 1974. "Ein Felssturz in Großversuch." *Rock Mechanics Suppl.*, n.3, pp.69-78.
- Cho N, Martin CD, Segol DC. A clumped particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2007;44(7):997e1010.
- Coutard J.P., Francou B. 1989. "Rock temperature measurements in two alpine environments: implications for frost shattering." *Arctic and Alpine Research*, n.21, pp.399-416.
- Cundall, P. A. "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems," in *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics (Nancy, France, 1971)*, Vol. 1, Paper No. II-8 (1971).

- Cundall, P. A., and R. Hart. "Numerical Modeling of Discontinua," *J. Engr. Comp.*, 9, 101-113 (1992).
- Dorren L.K.A. & Simoni, S., 2014. Rockyfor3D (V5.1) rivelato – Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi. ecorisQ Paper (www.ecorisQ.org): 27 p
- Grove J.M. 1972. "The incidence of landslides, avalanches and floods in western Norway during the Little Ice Age." *Arctic and Alpine Research*, n. 4, pp.131-138.
- Hillerborg A., Modéer M., Petersson PE. "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements." *Cement Concrete Res* 1976;6:773-82.
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. "Empirical strength criterion for rock masses." *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 106(GT9), 1013-1035.
- Hoek E., 1987. "Rockfall. A program in basic for the analysis of rockfall from slope." Unpublished notes, University of Toronto. Canada.
- Hungr O., Evans S. G. 1988. "Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards." *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*. Lausanne, Switzerland, I, pp. 685-690.
- Kazerani T, Zhao J. Micromechanical parameters in bonded particle method for modelling of brittle material failure. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2010;34(18):1877e95.
- Labuz J. F., Shah S. P., Dowding C. H. 1987. "The fracture process zone in granite: evidence and effect."
- McCarroll D., Shakesby R.A., Matthews J.A. 1998. "Spatial and temporal patterns of late Holocene rockfall activity on a Norwegian talus slope: a lichenometric and simulation modelling Approach." *Arctic and Alpine Research*, n.30(1), pp.51-60.

- Mahabadi O. K., Lisjak A., Munjiza A., Grasselli G. "New Combined Finite-Discrete Element Numerical Code for Geomechanical Applications."
- Malvar L. J., Warren G. E. 1987. "Fracture energy for three-point-bend tests on single-edge-notched beams."
- Matsuoka N., Sakai H. 1999. "Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods", *Geomorphology*, n. 28(3), pp.309-328.
- Mazzanti P. 2012. "Il monitoraggio degli spostamenti con Inerferometria SAR Terrestre."
- Paiola A. 1978. "Movimenti franosi in Friuli. Comportamento dei corpi che cadono su di un pendio e calcolo del limite di espansione potenziale." *Tecnica Italiana*, p. 6.
- Pariseau W.G. and Voight B. 1979. "Rockslides and avalanches: basic principles and perspectives in the realm of civil and mining operations". *Rockslides and avalanches. Engineering sites*. Elsevier, The Netherlands, pp. 1-92.
- PFC 5.0 Documentation. Itasca Consulting Group Inc.
- Pfeiffer T., Bowen T. 1989. "Computer simulation of rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, XXVI, 1, pp. 135-146.
- Piteau D.R. e Clayton R., 1976. Computer rockfall model. Proceeding Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness. Bergamo, Italy. ISMES, 90, 123-125.
- Porter S.C., Orombelli G. 1981. "Alpine rockfall hazards", *American Scientist*, n.69(1), pp.67-75.
- Potyondy DO. A flat-jointed bonded-particle material for hard rock. In: Proceedings of the 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Chicago, USA: American Rock Mechanics Association; 2012.
- Potyondy, D., and P.A. Cundall. "A bonded-particle model for rock," *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.*, 41, 1329-1364 (2004).

- Richards L. 1988. "Rockfall protection: a review of a current analytical and design methods." Secondo Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce, Torino, I(A).
- RocFall, Risk Analysis of Falling Rocks On Steep Slopes. User's guide. 1998 – 2002. Rocscience Inc.
- Selby M.J. 1982. "Hillslope materials and processes", *New York: Oxford University Press*.
- Spang R.M., Krauter E. 2001. "Rockfall simulation – a state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriers", in *Kühne M., et al., International Conference on Landslides– Causes, Impacts and Countermeasures*, Unides Foundation Engineering Davos, Switzerland, pp.607-613.
- Stevens, Warren D., 1998. "RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls." A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- Varnes D. 1978. "Slope movement, types and processes". *Special Report, National Academy of Sciences*, Washington, DC, volume 176, pp.11-33.

ALLEGATO A

```
new
title 'Prova di compressione_Bonded Particle Model'

domain extent -0.05 0.05 -0.1 0.1 condition destroy

cmat default model linear method deform emod 1.0e9 kratio 0.0
cmat default property dp_nratio 0.5

wall create vertices -0.05,0.08 0.05,0.08 id 1
wall create vertices -0.05,-0.08 0.05,-0.08 id 2
wall create vertices -0.04,-0.08 -0.04,0.08 id 3
wall create vertices 0.04,-0.08 0.04,0.08 id 4

set random 10001
ball distribute porosity 0.01 radius 0.001 0.004 box -0.04 0.04 -
0.08 0.08
ball attribute density 2700 damp 0.7

cycle 1000 calm 10

set timestep scale
solve aratio 1e-4
set timestep auto
calm

wall delete range id 3
wall delete range id 4

save unbonded
contact model linearpbond range contact type ball-ball
contact method bond gap 0.5e-4
contact method deform emod 3e10 krat 1
contact method pb_deform emod 3e10 krat 1
contact property pb_ten 4e7 pb_coh 15e6 pb_fa 48
contact property dp_nratio 0.5
contact property fric 0.5 range contact type ball-ball
```

```
ball attribute displacement multiply 0.0
contact property lin_force 0.0 0.0 lin_mode 1
ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0
cycle 1
solve aratio 1e-5
save parallel_bonded

set echo off
call ss_wall.fis
call fracture.p2fis
set echo on

@setup_wall

wall attribute yvel -0.001 range id 1
wall attribute yvel 0.001 range id 2

ball attribute damp 0.1

history id 1 @axial_stress_wall
history id 2 @axial_strain_wall

@track_init
history id 3 @crack_num

cyc 1000

SET @peak_fraction = 0.7
solve fishhalt @loadhalt_wall
list @peak_stress
```

ALLEGATO B

```
new
title 'Prova di compressione_Flat Joint Model'

domain extent -0.05 0.05 -0.1 0.1 condition destroy

cmat default model linear method deform emod 4e10 kratio 0.0
cmat default property dp_nratio 0.5

wall create vertices -0.05,0.08 0.05,0.08 id 1
wall create vertices -0.05,-0.08 0.05,-0.08 id 2
wall create vertices -0.04,-0.08 -0.04,0.08 id 3
wall create vertices 0.04,-0.08 0.04,0.08 id 4

set random 10001
ball distribute porosity 0 radius 0.001 0.004 box -0.04 0.04 -0.08
0.08
ball attribute density 2700 damp 0.7

cycle 1000 calm 10

set timestep scale
solve aratio 1e-4
set timestep auto
calm

wall delete range id 3
wall delete range id 4

contact model flatjoint
contact property fj_track on
contact method bond gap 0.5e-4 range contact type ball-ball
contact method deform emod 4e10 krat 1.0
contact property fj_ten 3e6 fj_coh 20e6 fj_fa 0
contact property fj_fric 0.5 range contact type ball-ball
cmat default model flatjoint ...
    property fj_n 4 fj_track on ...
    method deform emod 4e10 krat 1.0
```

```
ball attribute displacement multiply 0.0
contact property lin_force 0.0 0.0 lin_mode 1
ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0
cycle 1
solve aratio 1e-5

save flatjoint
set echo off
call ss_wall.fis
call fracture.p2fis
set echo on

@setup_wall

wall attribute yvel -0.001 range id 1
wall attribute yvel 0.001 range id 2

ball attribute damp 0.1

history id 1 @axial_stress_wall
history id 2 @axial_strain_wall

@track_init
history id 3 @crack_num

cyc 1000

SET @peak_fraction = 0.7
solve fishhalt @loadhalt_wall
list @peak_stress
```

ALLEGATO C

```
new
title 'Disgaggio masso Antey-Saint-André'
domain extent -10000 10000

cmat default model linear method deform emod 1.0e9 kratio 0.0
cmat default property dp_nratio 0.3

wall create vertices -0.5 1246.5 -1 1246.5
wall create vertices -1 1246.5 0 1246.5
wall create vertices -1 1246.5 -3 1247
wall create vertices -3 1247 -3 1251
wall create vertices -3 1251 0.25 1251
wall create vertices 0.25 1251 0 1246.5

wall create vertices 0 1246 -0.5 1246.5
wall create vertices -0.5 1246.5 -4 1246.5
wall create vertices 196.29 1067 230 1067
wall import filename nuovopendio.dxf
wall create vertices -4 1246.5 -4 1251

set random 10001
ball distribute porosity 0.1 radius 0.1 0.4 box -3 0.25 1246.5 1251
ball attribute density 2700 damp 0.7
cycle 2000 calm 50
set timestep scale
solve aratio 1e-3
set timestep auto
calm

ball delete range id 20
ball delete range id 27
ball delete range id 50
ball delete range id 61
wall delete range id 1 6

contact model flatjoint
contact property fj_track on
```

```

contact method bond gap 0.5e-4 range contact type ball-ball
contact method deform emod 4e10 krat 1.0
contact property fj_ten 3e6 fj_coh 20.0e6 fj_fa 0
contact property fj_fric 0.577 range contact type ball-ball
cmat default model flatjoint ...
    property fj_n 4 fj_track on ...
    method deform emod 4e10 krat 1.0

ball attribute displacement multiply 0.0
contact property kn 0.0 lin_force 0.0 0.0
ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0
cycle 1
solve aratio 1e-5

cmat default type ball-facet model linear ...
    property kn 1e7 ks 1e4 fric 0.1 dp_nratio 0
wall create vertices -0.5 1246.5 -4 1246.5
wall create vertices 196.29 1067 230 1067
cmat add model linear property kn 1e11 ks 1e8 fric 1.5 dp_nratio 0
range x 0 5.747 y 1236 1234.74

set gravity 10
ball attribute xappliedforce 100000 range id 29

cmat default model flatjoint ...
    property fj_n 5 fj_track on ...
    method deform emod 4.0e10 krat 1.0

history id 1 mechanical age
history id 2 ball xvelocity id 6
history id 3 ball xvelocity id 31
history id 4 ball xvelocity id 16
set energy on
history id 8 mechanical energy ekinetic

cycle 190000
save caduta_masso
restore caduta_masso.p2sav
ball attribute xappliedforce 0 range id 29
wall create vertices 196.29 1067 230 1067
cmat add model linear property kn 1e10 ks 1e4 fric 0 range x 26.31
27.21 y 1219.99 1218.33
cmat add model linear property kn 1e8 ks 1e4 fric 0 range x 38.078
41.019 y 1193.2 1186.15
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e11 fric 3 range x 41.019
48.047 y 1186.15 1181.31
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e6 fric 1 range x 63
109.56 y 1158.91 1127.42
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e8 fric 1 range x 109.56
143.14 y 1158.91 1103.19
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e11 fric 3 range x 143.14
150.88 y 1103.19 1096
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e8 fric 1 range x 150.88
155.03 y 1096 1093.62

```

```
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e11 fric 3 range x 155.03  
160.6 y 1093.62 1089.62  
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e8 fric 1 range x 160.6  
175.18 y 1089.62 1079.77  
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e11 fric 3 range x 175.18  
180.17 y 1079.77 1076.76  
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e8 fric 1 range x 180.17  
190.34 y 1076.76 1070.11  
cmat add model linear property kn 1e7 ks 1e11 fric 3 range x 190.34  
230 y 1070.11 1067  
  
cycle 7000000
```