

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'ambiente e il territorio

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi di una parete rocciosa e del sottostante
deposito: modelli di frammentazione**



Relatori:

Prof. Daniele Peila

Ing. Valerio De Biagi

Ing. Maddalena Marchelli

Candidato:

Hervé Grange

Marzo 2018

Sommario

1	Introduzione	4
2	Approccio normativo al problema	6
2.1	Introduzione.....	6
2.2	Italia.....	7
2.3	Normativa europea: l'esempio della ETAG 027	11
2.4	Francia	12
2.5	Svizzera	12
2.6	Austria	13
2.7	Conclusione	17
3	Costruzione della distribuzione dei volumi in parete	18
3.1	Introduzione.....	18
3.2	Tecniche tradizionali di calcolo del volume dei blocchi in parete	19
3.3	Tecniche di telerilevamento per l'acquisizione del dato	27
3.4	Tecniche di modellazione numerica per l'elaborazione dei dati	29
3.5	Modello scelto per la costruzione dell'IBSD	31
4	Costruzione della distribuzione dei volumi al piede.....	38
4.1	Introduzione.....	38
4.2	Conformazioni possibili dell'area di accumulo.....	39
4.3	Calcolo del volume: l'esempio di altri ambiti scientifici	48
4.4	Influenza della forma nel calcolo del volume	53
4.5	Utilizzo della legge di potenza e introduzione all'approccio frattale.....	56
4.6	Costruzione dell'RBSD a partire da aree di campionamento.....	59
4.7	Metodologia di rilievo finale	62
5	Confronto tra le curve IBSD e RBSD ottenute in situ.....	69
5.1	Introduzione.....	69
5.2	Descrizione del sito scelto	70
5.3	Risultati del rilievo geologico in parete.....	73
5.4	Costruzione dell'IBSD dalle spaziature con procedura Montecarlo	78
5.5	Costruzione dell'IBSD con l'impiego di un modello numerico.....	81
5.6	Costruzione dell'RBSD al piede della parete	83
5.7	Confronto tra le curve ottenute	89

6	Elaborazione del modello di frammentazione	93
6.1	Introduzione.....	93
6.2	Struttura del modello utilizzato	95
6.3	Applicazione del modello al sito in esame	98
7	Conclusione.....	105
8	Allegato A	107
9	Ringraziamenti	109
10	Bibliografia	110

Capitolo 1

Introduzione

Il distacco di blocchi lapidei da pareti rocciose e il successivo movimento lungo il pendio sottostante senza interazioni tra gli elementi in caduta viene comunemente definito in letteratura (*Ruiz Carulla et al., 2015* a titolo di esempio) con il termine di caduta massi. L'incremento del numero di eventi di questo fenomeno registrati negli ultimi decenni, accentuato anche dai cambiamenti climatici in corso, fa sì che esso costituisca attualmente uno dei fattori di pericolo associati a fenomeni naturali più diffusi in diverse aree del mondo, in particolar modo nei territori montani, rappresentando un rischio notevole per le persone, le infrastrutture e le strutture antropiche in generale. D'altra parte, la conseguente esigenza di mitigazione di tale grandezza ha comportato lo sviluppo di nuove opere e tecnologie in grado di agire come misure di tipo preventivo o protettivo in maniera sempre più efficiente.

Uno degli aspetti principali e di maggior complessità nella progettazione di tali opere è legato alla scelta del volume del blocco di progetto, definibile come il volume dell'elemento roccioso di riferimento preso in considerazione. Infatti l'azione esercitata da fenomeni naturali di vario tipo su un qualsiasi manufatto, tra cui evidentemente anche l'impatto di una massa rocciosa, deve essere debitamente quantificata in fase di dimensionamento affinché il danno che si verifica non risulti sproporzionato all'intensità del fenomeno. L'approccio sviluppato negli ultimi anni (*De Biagi et al., 2016*) ricerca in particolare un legame tra la magnitudo dell'evento e la sua frequenza di accadimento, espressa in termini di tempo di ritorno, affinché la struttura sia in grado di sviluppare le resistenze necessarie per tutto l'intervallo di tempo per cui viene progettata.

Il problema è stato sviluppato negli ultimi anni da importanti contributi presenti in letteratura, come quelli elaborati dal Politecnico di Torino o da quello di Barcellona; al contrario non viene direttamente affrontato all'interno della normativa tecnica attualmente in vigore, come evidenziato nel capitolo 2. Quest'ultima infatti tende a concentrarsi unicamente sugli aspetti legati al dimensionamento dell'opera, lasciando la scelta del volume del blocco di progetto all' «*engineer judgement*».

L'obiettivo di questo lavoro è stabilire che per una corretta scelta progettuale è necessario considerare contestualmente la distribuzione dei volumi presenti sulla parete rocciosa con quella rilevata nel deposito al piede di essa. In letteratura sono stati proposti diversi modelli e tecniche per la determinazione di una e dell'altra, discussi nel capitolo 3 e 4 rispettivamente. Il confronto tra di essi con un algoritmo messo a punto all'interno del Politecnico di Torino, basato su un approccio di tipo statistico, è avvenuto in un sito reale, sulla base di un rilievo manuale in situ sia della parete sia del deposito sottostante, come descritto nel capitolo 5. Infine, la costruzione nel capitolo 6 di un modello di tipo frattale permette di fornire una rappresentazione del fenomeno di frammentazione che determina il passaggio dalla distribuzione dei volumi in parete a quella al piede.

I risultati ottenuti, pur non essendo completamente risolutivi, forniscono un contributo alla soluzione del problema, evidenziando le criticità e i punti di forza dei diversi approcci attualmente disponibili.

Capitolo 2

Approccio normativo al problema

2.1 Introduzione

Il problema della determinazione del volume del blocco di progetto all'interno del fenomeno della caduta massi viene affrontato dalla normativa vigente a livello italiano e internazionale in maniera molto marginale. Attualmente infatti, sia quest'ultima sia le diverse norme tecniche, linee guida e raccomandazioni elaborate negli anni non forniscono direttamente al progettista metodologie o prescrizioni dettagliate da seguire sull'argomento, limitandosi a indicazioni di carattere generale. Queste permettono da una parte di tenere conto della grande eterogeneità del fenomeno da sito a sito, inglobando tutti i casi possibili, ma dall'altra demandano sostanzialmente la scelta al giudizio soggettivo del progettista, basato essenzialmente sulla propria esperienza. L'unica possibilità per poter costruire una sintesi di quanto presente nella normativa tecnica internazionale sulla problematica in analisi è quella di concentrare la ricerca all'interno delle norme che illustrano i principi di progettazione delle principali opere di mitigazione del rischio di caduta massi. All'interno di queste infatti, a margine degli aspetti direttamente legati al dimensionamento dell'opera, si possono ritrovare generiche indicazioni sui parametri di ingresso del progetto, come la massa e dunque il volume del blocco di progetto.

Al contrario, gli standard preparati dai diversi enti nazionali di unificazione tendono a concentrarsi unicamente sulle caratteristiche dei materiali da costruzione delle opere. Un esempio è dato dalla ISO 17746:2016, elaborata dall'International Organisation for Standardization (ISO) e recepita da diversi enti di normazione nazionali, che illustra le caratteristiche tecniche dei materiali per la

produzione di reti in acciaio da utilizzare nelle barriere paramassi a rete. Il controllo e l'omogeneizzazione delle metodologie di produzione dei materiali consente infatti di soddisfare i criteri di consensualità, democraticità e trasparenza che sono alla base di una norma tecnica, dando la possibilità alle aziende produttrici di adeguarsi volontariamente. Al contrario, definire criteri omogenei per la determinazione ad esempio del volume del blocco di progetto, obbligherebbe il progettista di un qualunque intervento a seguire linee guida magari non pienamente applicabili o addirittura errate nel suo caso, a causa della mancanza di un'unica metodologia valida e largamente riconosciuta e per la grande variabilità di casi possibili.

L'obiettivo di questo capitolo è dunque quello di analizzare quanto il problema della determinazione del volume del blocco di progetto sia stato recepito dalla legislazione e dalla normativa tecnica italiana da una parte e da quella internazionale dall'altra. In quest'ultimo caso, la scelta è ricaduta sui Paesi all'interno dei quali gli enti nazionali di unificazione hanno elaborato norme tecniche legate alla caduta massi. Nello specifico, questi risultano essere Francia, Svizzera e Austria, oltre ad alcuni standard validi a livello europeo. D'altro canto invece si evidenzia la mancanza di norme ad hoc sull'argomento in stati come gli Stati Uniti d'America, il Canada o il Regno Unito, particolarmente vasti e sicuramente interessati dal fenomeno della caduta massi.

La consultazione delle norme italiane UNI originali è stata possibile grazie all'abbonamento messo a disposizione dal Politecnico di Torino, mentre per quelle a pagamento redatte dagli altri enti nazionali sono stati utilizzati gli articoli di commento presenti in letteratura e su Internet, come riportato nel dettaglio in bibliografia.

2.2 Italia

In Italia sono attualmente in vigore dal 2008 le Norme Tecniche sulle Costruzioni contenute nel D.M. 14 gennaio 2008, a cui tutti i progettisti devono obbligatoriamente attenersi. All'interno del capitolo 6, dedicato alla progettazione geotecnica, non si fa riferimento nello specifico al fenomeno della caduta massi; perciò è sufficiente seguire quelle che sono le prescrizioni generali, in particolare la necessità di un modello geologico utile a capire il cinematismo del fenomeno

oggetto di studio e l'effetto delle opere realizzate su di esso. Nel caso in esame, questo si traduce nella determinazione del volume di progetto per poter correttamente dimensionare le opere di protezione ritenute più idonee. Quindi, le NTC 2008 si limitano a fornire al progettista alcuni principi teorici a cui deve attenersi, senza tuttavia entrare nello specifico. Un aspetto interessante da sottolineare riguarda l'utilizzo dei fattori di sicurezza parziali nella progettazione, introdotti in Italia a seguito all'entrata in vigore delle NTC 2008. Brevemente, l'introduzione di coefficienti di sicurezza che consentano in qualche modo di tenere conto delle incertezze non avviene alla fine, con un unico parametro globale, ma ogni grandezza viene moltiplicata per un valore che, a seconda del grado di precisione con cui la grandezza è nota, incrementa le azioni e penalizza le resistenze. È importante sottolineare questo aspetto poiché norme più specifiche presentate in seguito adottano proprio questo criterio.

Non essendo presenti all'interno delle NTC 2008 alcuna modalità operativa di dimensionamento delle opere geotecniche in generale, queste sono normalmente ricercate dai progettisti all'interno di documenti specifici (norme tecniche, linee guida, raccomandazioni) elaborate da organismi scientifici nazionali e internazionali.

In Italia è presente dal 1921 l'UNI, ente italiano di normazione, che redige continuamente un gran numero di norme tecniche a cui è possibile fare riferimento in tutti i settori lavorativi, ad esclusione di quello elettrotecnico ed elettronico. I principali compiti di questa associazione privata e degli omologhi enti presenti nella maggior parte dei Paesi del mondo sono quelli di produrre e diffondere nuove norme basate sui principi di consensualità, democraticità, trasparenza e volontarietà, oltre a rappresentare l'Italia nell'ente mondiale di normazione (ISO) ed europeo (CEN). L'utilizzo di queste elaborazioni non è evidentemente obbligatorio, ma consente di motivare adeguatamente le scelte progettuali fatte. In alcuni casi invece l'impatto dell'argomento trattato da una norma, proprio perché dovrebbe costituire il più avanzato livello di conoscenza condiviso da tutti, viene richiamato dagli organismi legislatori all'interno di una legge o di un altro tipo di documento legislativo, attribuendogli un valore cogente.

Per quanto riguarda il fenomeno della caduta massi, ci si riferisce alla serie UNI 11211 pubblicata in quattro parti tra il 2007 e il 2012 che definisce il quadro di riferimento per la progettazione delle opere di mitigazione del rischio di caduta massi, dalla fase iniziale di analisi di rischio alla progettazione vera e propria e alla sua realizzazione.

La serie 11211 è suddivisa in quattro parti così definite:

- UNI 11211 – Parte 1: termini e definizioni
- UNI 11211 – Parte 2: programma di intervento
- UNI 11211 – Parte 3: progetto preliminare
- UNI 11211 – Parte 4: progetto definitivo ed esecutivo

All'interno del paragrafo relativo allo scopo e ai campi di applicazione di ognuna delle quattro parti viene chiaramente indicato che *«[...] La norma si applica a fenomeni di caduta massi che coinvolgono blocchi isolati oppure crolli di piccole masse (con un volume complessivo delle porzioni in frana comunque minore di 10^5 m^3), in cui si possa ritenere che non vi sia nessuna iterazione tra i blocchi in caduta oppure che tale iterazione sia trascurabile.»*, secondo la definizione del fenomeno della caduta massi già presentata nel capitolo 1.

Al blocco di progetto è dedicato il paragrafo 6.3 della parte 3, in cui viene specificato che si tratta del *«[...] Volume roccioso di riferimento da considerare sia nella simulazione delle traiettorie di caduta sia nelle verifiche progettuali delle opere di difesa»*. Si specifica inoltre che deve essere caratterizzato da diversi parametri, tra cui massa volumica, volume e forma., specificando che *«I criteri di scelta dei volumi devono essere chiaramente esposti e commentati»*, senza tuttavia indicarne. Perciò, in mancanza di criteri di valutazione, ai fini di questo lavoro sono stati ricercati all'interno della serie 11211 i parametri che invece dipendono dalla scelta del volume del blocco di progetto, per capire la sua influenza sul dimensionamento delle opere.

Nello specifico il paragrafo 5.3 della parte 4 è dedicato al dimensionamento delle opere di tipo passivo, che si basa essenzialmente sul calcolo della traiettoria e dell'energia posseduta dal blocco di progetto scelto. L'energia cinetica è definita come un'azione di impatto sulle opere paramassi passive con l'espressione

$$E_{sd} = \frac{1}{2} \cdot m_d \cdot V_d^2 \quad (2.1)$$

dove

E_{sd} è l'energia cinetica sollecitante di progetto

m_d è la massa del blocco di progetto

V_d è la velocità del blocco di progetto al momento dell'impatto

La velocità di progetto del blocco viene determinata in corrispondenza del punto di interesse con l'utilizzo di software specifici che sono in grado di produrre migliaia di simulazioni e dunque di costruire una distribuzione di velocità del blocco. Il valore di progetto è ottenuto moltiplicando il valore corrispondente al frattile del 95% delle velocità calcolate nelle analisi delle traiettorie per un fattore di sicurezza γ_F , a sua volta definito come

$$\gamma_F = \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp} \quad (2.2)$$

Il fattore di sicurezza parziale γ_{Tr} è legato all'affidabilità nel calcolo delle traiettorie e vale 1,02 nel caso di simulazioni di caduta basate su coefficienti di restituzione ottenuti da procedure di back analysis oppure 1,10 nel caso di risultati ottenuti sulla base di coefficienti di restituzione desunti da letteratura.

γ_{Dp} invece tiene conto della qualità con cui è stato ricostruito il pendio e vale 1,02 per pendii discretizzati con un rilievo topografico di buona precisione in rapporto alle caratteristiche del sito e 1,10 per pendii discretizzati con una precisione medio-bassa.

L'altro termine chiave dell'equazione dell'energia cinetica è la massa m_d del blocco di progetto, che viene definita come

$$m_d = (Vol_b \cdot \gamma) \cdot \gamma_m \quad (2.3)$$

dove

m_d è la massa del blocco di progetto

Vol_b è il volume del blocco di progetto

γ è la massa per unità di volume della roccia in posto

γ_m è un fattore di sicurezza definito come

$$\gamma_m = \gamma_{VolF1} \cdot \gamma_y \quad (2.4)$$

Il coefficiente γ_{VolF1} è legato alla precisione del rilievo della parete e vale 1,02 per rilievi accurati (per esempio mediante tecniche fotogrammetriche o

topografiche di precisione, rilievi geomeccanici sistematici in parete, misurazione dei blocchi presenti sul detrito alla base delle pareti), oppure 1,10 in assenza di rilievi di dettaglio.

Infine il coefficiente γ_y si basa sulla valutazione della massa per unità di volume e in genere viene assunto pari a 1.

Il problema della determinazione del volume del blocco di progetto risulta quindi di grande importanza poiché da esso, attraverso le equazioni riportate in precedenza, si ricava la massa di progetto e da questa l'energia cinetica. Si tratta perciò di una delle grandezze che condiziona il problema, a cui è importante associare un valore affetto da un'incertezza il più possibile contenuta. Tuttavia, dall'analisi della serie di norme UNI presentata, si evidenzia come non vengano riportate indicazioni o metodologie utilizzabili dal progettista per quantificare la grandezza in situ, ma solo, a seconda del grado di conoscenza del fenomeno e del volume in particolare, il valore da assegnare ai coefficienti di sicurezza. Perciò la scelta ricade sull'esperienza del professionista, che deve essere debitamente motivata con l'utilizzo di valori dei coefficienti di sicurezza adeguati.

2.3 Normativa europea: l'esempio della ETAG 027

Nel 2008 l'EOTA (European Organisation for Technical Approvals) ha elaborato la ETAG 027 "*Guideline for european technical approval of falling rock protection kits*" che standardizza a livello europeo i test in scala reale delle barriere paramassi e i controlli da effettuare sui materiali che le compongono. Il superamento delle prove previste permette di apporre il marchio CE sul prodotto, in maniera tale da garantire la sua commercializzazione negli stati membri dell'Unione e la sua accettabilità nei cantieri. Si tratta dell'unica norma attualmente elaborata e valida a livello europeo nell'ambito delle opere di protezione sulla caduta massi, a cui poi fa anche riferimento la norma italiana UNI 11211 presentata nel paragrafo 2.2.

Senza entrare nel dettaglio della procedura descritta in dettaglio in *Peila et al., 2009*, in questo lavoro ci si limita a dire che i test sono condotti attraverso l'impiego di blocchi di prova artificiali di forme e dimensioni ben definite, che permettono di ricostruire il comportamento dell'opera in condizioni ideali. In questa norma perciò non si entra nel dettaglio della progettazione e dunque non

contiene alcun riferimento alla scelta del volume di progetto da considerare. Si sottolinea dunque l'assenza di una norma tecnica valida a livello europeo che in qualche modo affronti il problema in esame in questo lavoro.

2.4 Francia

L'ente di unificazione francese AFNOR è stato il primo a elaborare nel 1996 una norma tecnica relativa alle opere di mitigazione del rischio caduta massi. Nello specifico si tratta della NF P35-308: "*Équipement de protection contre les éboulements rocheux – écrans de filets*", che si occupa delle barriere paramassi a rete e citata in *Durville et al, 2010*. All'interno di essa, pur non essendo ancora stata elaborata una procedura di certificazione dei prodotti del tipo ETAG 027, si propone una suddivisione dei prodotti in nove classi di energia cinetica. Tuttavia non si fa cenno a indicazioni per la scelta del volume del blocco di progetto e la norma, al di là della sua importanza storica, è stata abrogata a seguito dell'entrata in vigore dell'ETAG 027 a livello europeo.

2.5 Svizzera

La Svizzera, non essendo membro dell'Unione Europea, ha elaborato negli anni una normativa tecnica autonoma in molti settori, compreso quello della caduta massi. In particolare, ben prima dell'ETAG 027 del 2008, il WSL (Istituto svizzero di ricerca) e l'OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et des Paturages) hanno elaborato una direttiva per l'omologazione delle barriere paramassi a rete commentata in *Gerber, 2001*. In essa, oltre a illustrare una procedura che è stata poi ripresa dall'ETAG 027 europea, vengono espresse alcune definizioni e considerazioni utili per la scelta del volume del blocco di progetto. Infatti, secondo questa direttiva, è compito dello "specialista" definire dove si svolge il fenomeno di caduta massi e di stabilirne le dimensioni, la velocità, l'energia dei diversi eventi possibili. Inoltre «[...] Egli valuta la probabilità in termini di tempo di ritorno dei diversi eventi possibili» e «[...] Inoltre definisce il potenziale danno potenzialmente causato a beni e persone». Dunque si fa riferimento a due concetti importanti oggi fondamentali nello studio dei fenomeni naturali.

Un approccio simile è presentato nella direttiva “*Actions sur les galeries de protection contre les chutes de pierres*” edita nel 1998 e aggiornata nel 2008 dall’OFRU (Ufficio federale delle strade) e da CFF, il gestore delle ferrovie svizzere. All’interno di questo documento, è contenuta la procedura di dimensionamento delle gallerie paramassi che affronta in maniera particolare il problema di quantificare l’energia del masso impattante in termini di “azione” da inserire poi all’interno del progetto di dimensionamento della galleria come carico variabile. Infatti il carico dovuto a fenomeni naturali come ad esempio frane o valanghe viene considerato dalle norme svizzere SIA 261 “*Actions sur les structures porteuses*”, equivalenti alle NTC 2008 italiane, come carichi accidentali, quantificati in termini di forza. Come descritto in precedenza, anche all’interno di questa direttiva si demanda a un esperto la quantificazione della massa e della velocità (e di conseguenza l’energia) raggiunti dal blocco prima dell’impatto. Questi dati sono poi trasmessi all’autore del progetto della galleria che provvede, sulla base di questa direttiva, alla definizione delle azioni a cui l’opera sarà soggetta e di conseguenza al dimensionamento.

In conclusione nel caso svizzero, pur avendo sviluppato una normativa piuttosto dettagliata in alcuni aspetti della caduta massi, anticipando spesso quelli che sono gli standard europei, il compito di determinare il volume di progetto viene esplicitamente demandato all’esperienza e al giudizio di un esperto, senza tuttavia fornire alcuna indicazione ulteriore sulla metodologia da seguire.

2.6 Austria

L’analisi della normativa austriaca relativa al fenomeno della caduta massi ha invece evidenziato un approccio nuovo e più vicino al problema affrontato all’interno di questa tesi. La norma 24810 dell’ONR, l’ente austriaco di unificazione, elaborata nel 2013 e aggiornata nel 2016, non si concentra solamente su una tipologia di opera di mitigazione del rischio, ma ne comprende diverse, dalle barriere paramassi ai rafforzamenti corticali e ai rilevati. Inoltre, a differenza dell’ETAG 027 o della UNI 11211, copre in maniera dettagliata l’intera progettazione dell’opera, uniformando le diverse fasi: analisi del sito, approccio probabilistico al problema, progetto degli ancoraggi e delle fondazioni, regole costruttive e infine gestione e manutenzione dell’opera. Per gli scopi di questo

lavoro, l'analisi della norma in questione si è concentrata sulle parti relative all'analisi del sito e all'approccio probabilistico. Le informazioni successive non sono tratte dalla norma originale austriaca, ma da un intervento sull'argomento (Stelzer *et al.*, 2013) elaborato durante il "64th Highway Geology Symposium" americano nel 2013.

L'analisi del sito viene considerata come basilare per la progettazione di una qualunque opera di mitigazione del rischio di caduta massi e si compone di una parte di ricerca dei dati e informazioni e di una parte in situ. La prima consiste nell'attenta consultazione delle mappe (topografiche, geologiche, tematiche, ...) del sito e dei cataloghi e archivi che contengano informazioni su eventi passati più o meno documentati.

Il rilievo in campo viene invece suddiviso in tre diverse zone: l'area di distacco del fenomeno, quella di transizione e quella di deposito; per ognuna di esse la ONR 24810 richiede di acquisire diverse informazioni con differenti tecniche, come riportato di seguito.

1. Zona di distacco: caratterizzazione dell'ammasso roccioso, analisi delle discontinuità presenti, individuazione dei meccanismi di distacco, ...

2. Zona di transizione: morfologia del pendio, cambi di pendenza con eventuali punti di smorzamento dell'energia del blocco, indicatori dell'altezza di rimbalzo del blocco, ...

3. Zona di deposito: morfologia dell'area, differenza di pendenza rispetto al pendio soprastante, identificazione del detrito da eventi precedenti, evidenze particolari che possano dare informazioni sulla frequenza degli eventi o sull'altezza di rimbalzo dei blocchi, accessibilità (in un'ottica futura di costruzione e manutenzione dell'opera di protezione), individuazione di elementi a rischio, ...

Dalle informazioni ottenute è consigliabile, secondo la norma, eseguire alcune analisi preliminari, al fine di ottenere informazioni più complete possibili sul sito, come la distribuzione delle dimensioni dei blocchi, la loro distribuzione di frequenza e quella relativa alle altezze di rimbalzo. In questo modo è possibile identificare e suddividere il sito in aree omogenee e operare una prima scelta sulla posizione delle opere di mitigazione del rischio da realizzare.

Successivamente la ONR 24810 elenca le metodologie per determinare, attraverso un approccio di tipo probabilistico, il volume, l'altezza e l'energia del blocco di progetto. Concentrandosi sul primo aspetto, la selezione viene eseguita attraverso due distinte procedure: un approccio semplificato e uno standard. Il primo dei due viene detto semplificato perché il volume può essere determinato dall'esperto sulla base della sua esperienza e delle informazioni ottenute durante la precedente fase di investigazione del sito. Questo però può avvenire solamente in presenza di almeno una delle seguenti condizioni:

- Presenza di meno di 100 blocchi nella zona di deposito;
- Presenza di meno di 100 volumi potenzialmente instabili all'interno della zona di distacco;
- Classe di conseguenza uguale a CC1 definita in tabella 2.1;
- Frequenza degli eventi che ricade nella classe EF1 O EF2 definite in tabella 2.1.

Come classe di conseguenza si intende una valutazione qualitativa del grado di danno, inteso come perdita economica sociale, ambientale o in termini di vite umane che un evento può generare in quel sito. La descrizione delle tre classi previste dalla norma in esame è riportata in tabella 2.1.

tabella 2.1- Classi di conseguenza previste dalla ONR 24810 austriaca

Classi	Descrizione	Esempio di strutture coinvolte
CC3	Elevate conseguenze per la perdita di vite umane o conseguenze di tipo economico, sociale o ambientale molto grandi	Edifici pubblici con presenza di molteplici persone dove le conseguenze di un evento sono elevate (es sala da concerto)
CC2	Conseguenze medie in termini di perdite di vite umane, conseguenze economiche, sociali o ambientali considerevoli	Edifici residenziali e uffici e in generale strutture in cui le conseguenze di un evento sono mediamente gravi
CC1	Basse conseguenze in termini di perdite di vite umane, conseguenze economiche, sociali o ambientali lievi o trascurabili	Strutture a uso agricolo, non abitate in maniera continuativa

Le tre classi di conseguenza rivestono un ruolo importante all'interno della ONR 24810 poiché in base alla classe a cui si fa riferimento e dunque al danno atteso, si adottano metodologie operative più complesse e strutturate e fattori di sicurezza maggiori per tenere conto delle incertezze.

Allo stesso modo, anche la frequenza di accadimento degli eventi, intesa in termini di numero di eventi per anno, viene suddivisa in quattro classi riportate in tabella 2.2.

tabella 2.2 - Classi di frequenza previste dalla ONR 24810 austriaca

Classe	Frequenza eventi n/anno	Fratte del volume considerato
EF4 (molto alta)	$n \geq 10$	V ₉₈
EF3 (alta)	$1 \leq n \leq 10$	V ₉₇
EF2 (bassa)	$0,03 \leq n \leq 1$	V ₉₆
EF1 (evento raro)	$N \leq 0.03$	V ₉₅

Se invece nessuno dei criteri elencati in precedenza è soddisfatto, allora la norma prevede l'utilizzo della metodologia standard. Questa definisce il volume del blocco di progetto uguale a diversi quantili della curva di distribuzione dei volumi a seconda della frequenza del fenomeno, definita nuovamente in tabella 2.2. Dunque l'approccio previsto dalla ONR 24810 è totalmente differente rispetto agli altri standard analizzati. L'importanza data alle caratteristiche del sito e in generale a tutti gli aspetti della progettazione dell'opera ne fanno un modello all'avanguardia nel quadro europeo e mondiale.

In particolare, sono da sottolineare, nell'ambito degli obiettivi di questo lavoro, gli aspetti che maggiormente legano la norma presentata a quelli che sono gli sviluppi più recenti della ricerca sul fenomeno della caduta massi. In particolare, l'importanza di un'indagine nei vari cataloghi di eventi passati (evidenziata, a titolo di esempio, in *Dussauge-Peisser et al., 2002* o in *De Biagi et al., 2017*), la ricostruzione della curva di distribuzione dei volumi nella zona di deposito (*Ruiz Carulla et al., 2015*) e in generale l'approccio probabilistico dato alla scelta del volume del blocco di progetto sono elementi che rendono la ONR 24810 all'avanguardia nel panorama della normativa tecnica internazionale.

2.7 Conclusione

In conclusione, le diverse normative tecniche nel mondo tendono a concentrare l'attenzione sull'unificazione delle procedure per la scelta della tipologia dell'opera prima e dei prodotti commerciali poi, che devono soddisfare determinati requisiti e ottenere ad esempio determinate certificazioni per poter essere impiegati, come avviene in Italia. Invece, altri aspetti come la scelta del volume del blocco di progetto, data l'estrema varietà da sito a sito dei fattori che lo determinano, vengono completamente lasciati all'esperienza del tecnico, senza fornire alcun tipo di supporto al suo giudizio. Questo fatto costituisce un grosso limite perché un importante aspetto della progettazione (si è visto come dal volume si ricavi la massa e di conseguenza l'energia cinetica del blocco di progetto) viene valutato in assenza di un valido supporto scientifico normato. Solamente l'approccio inaugurato dalla norma tecnica ONR 24810 austriaca, proprio perché più recente, va nella direzione di quelli che sono i progressi della ricerca in questo ambito, intervenendo in tutte le fasi della progettazione, anche quelli considerati, a torto, secondari o più difficilmente uniformabili.

Capitolo 3

Costruzione della distribuzione dei volumi in parete

3.1 Introduzione

La presenza di fratture e discontinuità all'interno di un ammasso roccioso fa sì che questo tenda progressivamente nel tempo a perdere le caratteristiche geomeccaniche tipiche della roccia intatta e a suddividersi in volumi definiti sulla base delle diverse intersezioni tra le discontinuità. Queste, derivanti dall'azione di processi naturali sulla roccia intatta, costituiscono il “punto debole” dell'ammasso roccioso e di fatto ne governano le proprietà d'insieme.¹

L'individuazione e la stima delle dimensioni dei volumi isolati dalle discontinuità costituisce uno degli aspetti più importanti nello studio della caduta massi ed evidentemente nella stima del volume del blocco di progetto. In particolare, l'obiettivo a cui questo capitolo tende è quello di illustrare alcuni approcci utili a determinare l'intervallo di variazione dei volumi all'interno dell'ammasso roccioso, che è influenzato dalle principali proprietà delle discontinuità presenti, come la giacitura, la spaziatura e la persistenza. Perciò si agisce costruendo una curva che associ a ogni valore di volume una frequenza espressa in termini di numero cumulato di blocchi o di frequenza relativa cumulata, denominata in letteratura IBSD (InSitu Block Size Distribution). La sua conoscenza è fondamentale in molte applicazioni ingegneristiche, geologiche e minerarie (*Elmoultie et al., 2012*) tra cui appunto la caduta massi.

Le tecniche utilizzate per la costruzione dell'IBSD variano a seconda dell'estensione del sito e della sua accessibilità, oltre che dalle finalità

¹ Per una trattazione delle proprietà delle discontinuità e dell'influenza di esse sulle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso si rimanda ai riferimenti contenuti in *Palmstrom, 2005*.

dell'indagine. Inoltre queste hanno subito un'evoluzione considerevole nel tempo, con l'avvento di nuove tecnologie applicabili sia per l'acquisizione dei dati durante il rilievo che per la successiva interpretazione e modellazione. Inizialmente vengono presentate nel paragrafo 3.2 le modalità di rilievo tradizionale che, anche attraverso l'elaborazione di indici molto utilizzati nella geoingegneria, superficiale o sotterranea, e in geologia (RMi, RQD, RMR, ...), consentono di determinare un solo volume rappresentativo dell'ammasso roccioso. Successivamente nel paragrafo 3.3 sono analizzate le tecniche di acquisizione ed elaborazione laser scanner e foto interpretative utilizzate sia ai fini della costruzione dell'IBSD che dello studio di singoli eventi. Il paragrafo 3.4 è invece dedicato all'utilizzo di modelli numerici per la stima della distribuzione dei volumi basati sull'estrazione casuale da distribuzioni statistiche dei parametri che caratterizzano le discontinuità. Infine nel paragrafo 3.5 viene presentato un modello numerico basato sulle considerazioni del paragrafo 3.4 effettivamente applicato nel sito descritto nel capitolo 5.

3.2 Tecniche tradizionali di calcolo del volume dei blocchi in parete

Nelle applicazioni geo ingegneristiche e in geologia la qualità di un ammasso roccioso, intesa come la valutazione indicativa delle complesse proprietà meccaniche della roccia in posto viene normalmente valutata, soprattutto ai fini di progettazione di interventi di vario tipo, con l'utilizzo di indici proposti negli anni da diversi autori. A titolo di esempio vengono qui riportati quelli più ricorrenti in letteratura e utilizzati nella pratica, come l'RQD (Rock Quality Designation), RMR (Rock Mass Rating) di Bieniawski, la classificazione Q di Barton e il RMi (Rock Mass index) di Palmstrom². La determinazione del blocco di volume risulta essere uno dei più importanti parametri necessari per la costruzione di molti di questi indici e viene normalmente eseguita utilizzando le tecniche tradizionali di rilievo geomeccanico in campo, come quelle proposte dall'ISRM (International Society for Rock Mechanics) nel 1978. Il risultato di queste operazioni porta alla definizione di uno o di un numero limitato di volumi possibili per l'oggettiva

² Si rimanda alla letteratura specifica in materia la definizione e gli ambiti di utilizzo di ogni indice. Una spiegazione sintetica a cui fare riferimento è contenuta in *Palmstrom, 1996*.

difficoltà di rilevare tutti i blocchi presenti; di conseguenza non è possibile costruire tutta la curva di distribuzione dei volumi. In effetti l'intersezione delle discontinuità porta spesso alla formazione di volumi molto eterogenei, non sempre visibili e accessibili. In generale, nel momento in cui la superficie rocciosa è coperta dal suolo o in fase di progettazione di un'opera sotterranea si ricorre a tecniche di rilievo indiretto, come l'analisi sui campioni recuperati durante i sondaggi o misure di tipo geofisico. Al contrario quando si opera su una parete rocciosa accessibile o durante la costruzione di gallerie o la coltivazione di miniere è possibile l'utilizzo di tecniche più accurate.

Le principali metodologie “tradizionali” utilizzate sono riportate in tabella 3.1 suddivise per tipologia e presentate nei sotto paragrafi successivi sulla base di quanto esposto in *Palmstrom, 2005*.

tabella 3.1– Tecniche di determinazione del volume del blocco (modificata da *Palmstrom, 2005*)

Misurazione in parete	Misurazione su campioni	Altre metodologie
Calcolo dal Joint Spacing (S)	Calcolo da RQD	Velocità delle onde sismiche nell'ammasso
Misura diretta del volume	Frequenza delle fratture	
Calcolo da J_v	Intercetta delle discontinuità	
Calcolo da wJ_d (2D)	Calcolo da wJ_d (1D)	

2.1.1 Utilizzo del Joint Spacing (S)

La spaziatura è definita come la distanza perpendicolare che separa due discontinuità appartenenti alla stessa famiglia. Si tratta di un parametro di fondamentale importanza nella definizione delle dimensioni dei volumi in parete. Avendo rilevato tutte le discontinuità presenti nell'ammasso e avendole raggruppate in famiglie viene di norma calcolata la spaziatura media di ogni famiglia. Calcolando poi un valore di spaziatura medio di tutto l'ammasso è possibile ottenere una prima stima molto approssimativa del volume dalla relazione

$$S_a \approx \sqrt[3]{V_b} \quad (3.1)$$

Si tratta sostanzialmente di un valore ottenuto considerando gli angoli tra le famiglie di discontinuità tutti pari a 90° , situazione ideale che si presenta però molto raramente nella realtà.

3.1.2 Misura diretta del volume in parete

Nel caso in cui i singoli blocchi siano direttamente individuabili e accessibili e di dimensioni contenute (nell'ordine dei dm^3) il metodo della misura diretta risulta essere molto più rapido che il rilievo e la successiva elaborazione di tutte le discontinuità presenti. In presenza di tre famiglie di discontinuità il volume è determinato dallo schema delle discontinuità e dalla spaziatura di ogni famiglia e nello specifico uguale a

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 \cdot \sin \gamma_3} \quad (3.2)$$

dove S_1, S_2, S_3 sono i valori di spaziatura media delle tre famiglie di discontinuità mentre $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ gli angoli tra le famiglie, indicati in figura 3.1 .

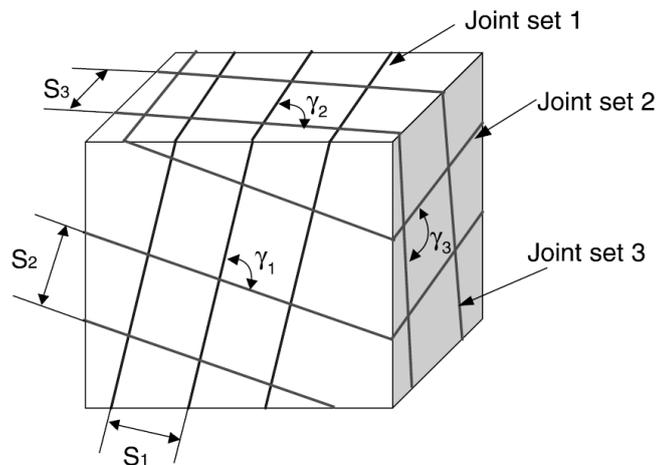


figura 3.1– Rappresentazione dei parametri di spaziatura e di angolo tra le discontinuità
(fonte Kim et al., 2006)

I valori di V_b ottenuti possono essere classificati come suggerito da Palmstrom, 1996 e riportato in tabella 3.2.

tabella 3.2 – Classi di volumi e corrispondenti valori (fonte *Palmstrom, 2005*)

Classi di volume	Valore di V_b m ³
Very small	10 – 200 cm ³
Small	0,2 – 10 dm ³
Moderate	10 - 200 dm ³
Large	0,2-10 m ³
Very large	≥10 m ³

In questo modo è possibile generalmente giungere all'individuazione del volume minimo e massimo presente in parete come rappresentato in figura 3.2.

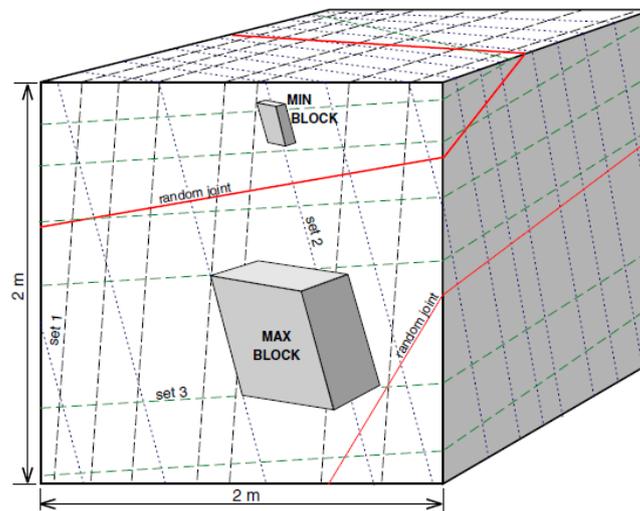


figura 3.2 – Esempio di individuazione dei volumi minimo e massimo in un cubo di 2 m³
(fonte *Palmstrom, 2005*)

È evidente in figura 3.2 come negli ammassi più irregolari possa essere presente una o più discontinuità non classificabile all'interno di nessuna famiglia (discontinuità casuale); generalmente queste non vengono considerate nel calcolo dei volumi.

Nel caso in cui invece siano individuabili all'interno dell'ammasso roccioso solamente uno o due famiglie di discontinuità la formula (3.2) non è applicabile, ma occorre introdurre un volume del blocco equivalente da utilizzare nei calcoli, definito in *Palmstrom, 1996* con diverse formulazioni a seconda delle situazioni.

Inoltre, la formula (3.2) considera tutte le discontinuità presenti come infinitamente persistenti. In realtà nella maggior parte delle situazioni questa

risulta invece essere finita e di difficile valutazione, per la presenza di ponti di roccia che interrompono la continuità della frattura. Al fine di tener conto di questo fenomeno, *Kim et al., 2006* hanno proposto di modificare l'equazione (3.2) con l'espressione

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 \cdot \sin \gamma_3 \cdot \sqrt[3]{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3}} \quad (3.3)$$

dove il parametro p_i viene definito per ogni famiglia di discontinuità come

$$p_i = \begin{cases} \frac{\bar{l}_i}{L} & \text{se } l_i < L \\ 1 & \text{se } l_i \geq L \end{cases} \quad (3.4)$$

in cui \bar{l}_i è pari alla lunghezza totale della discontinuità della famiglia i nel piano di campionamento e L la lunghezza caratteristica dell'ammasso roccioso considerato. In pratica però, per la difficoltà di ottenere una stima accettabile di p_i si preferisce generalmente semplificare il problema considerando le discontinuità come infinitamente persistenti e applicare la (3.2).

3.2.2 Utilizzo del Volumetric Joint Count (J_v) e del Weighted Joint Density (wJd)

Il J_v è definito come il numero di fratture che intersecano un volume pari a 1 m^3 (*Palmstrom, 1996*). In presenza di famiglie di discontinuità definite questo può essere calcolato con la formula

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (3.5)$$

dove S_1, S_2, S_n sono le spazature medie di ogni famiglia di discontinuità presente. I valori di J_v sono classificati sulla base della tabella 3.3.

tabella 3.3 – Classificazione del J_v (fonte *Palmstrom, 2005*)

	Very low	Low	Moderate	High	Very high	Crushed
$J_v =$	<1	1-3	3-10	10-30	30-60	>60

Il legame evidenziato in *Palmstrom, 1996* tra J_v e il volume del blocco V_b è dato da

$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} \quad (3.6)$$

dove β è il fattore di forma del blocco il cui valore dipende dal rapporto tra le dimensioni massime e minime dello spigolo del solido o in altre parole dalla spaziatura delle discontinuità secondo il grafico riportato in figura 3.3.

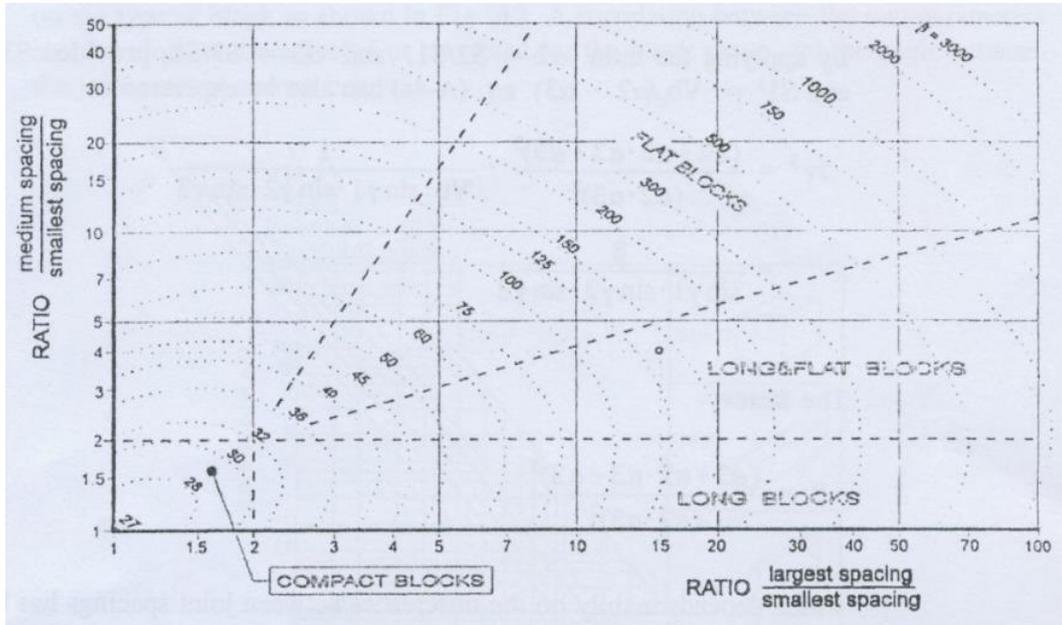


figura 3.3 – Grafico per la determinazione di β (fonte Palmstrom, 1996)

Palmstrom, 1996 ha anche proposto un'espressione per il calcolo di β in cui

$$\beta = 20 + 7 \cdot \left(\frac{S_{max}}{S_{min}} \right) \cdot \left(\frac{3}{n_j} \right) \quad (3.7)$$

dove S_{max} e S_{min} sono rispettivamente la più grande e la più piccola spaziatura rilevata, mentre n_j assume i valori diversi a seconda del numero di famiglie di discontinuità rilevate, come descritto in tabella 3.4.

tabella 3.4 – Valori possibili del parametro n_j (fonte Palmstrom, 1996)

3 famiglie + discontinuità casuali	$n_j = 3,5$
3 famiglie	$n_j = 3$
2 famiglie + discontinuità casuali	$n_j = 2,5$
2 famiglie	$n_j = 2$
1 famiglia + discontinuità casuali	$n_j = 1,5$
1 sola famiglia	$n_j = 1$

Alcuni valori caratteristici di β sono riportati in tabella 3.5.

tabella 3.5 – Intervalli di valori caratteristici di β (fonte *Palmstrom, 2005*)

Forma caratteristica	Valore di β
Blocchi equidimensionali (cubici o compatti)	$\beta = 27$
Blocchi prismatici o tabulari	$\beta = 28 - 32$
Blocchi mediamente lunghi e piatti	$\beta = 33 - 59$
Blocchi lunghi e piatti	$\beta = 60 - 200$
Blocchi molto lunghi e molto piatti	$\beta > 200$

L'utilizzo di questa tecnica fornisce una prima stima di V_b semplicemente a partire dalle spaziature medie delle famiglie di discontinuità rilevate.

Nel caso in cui il rilievo delle discontinuità non possa essere eseguito nel dominio tridimensionale ma solamente su superfici 2D o addirittura solo su campioni prelevati unidimensionali, è possibile in ogni caso fare alcune considerazioni sul volume 3D con l'introduzione di un nuovo parametro: il weighted joint density (wJd). Questo consente di adattare la definizione di J_v al caso 2D o 1D introducendo l'angolo θ tra ogni discontinuità rilevabile e la superficie o il campione utilizzato, come rappresentato in figura 3.4.

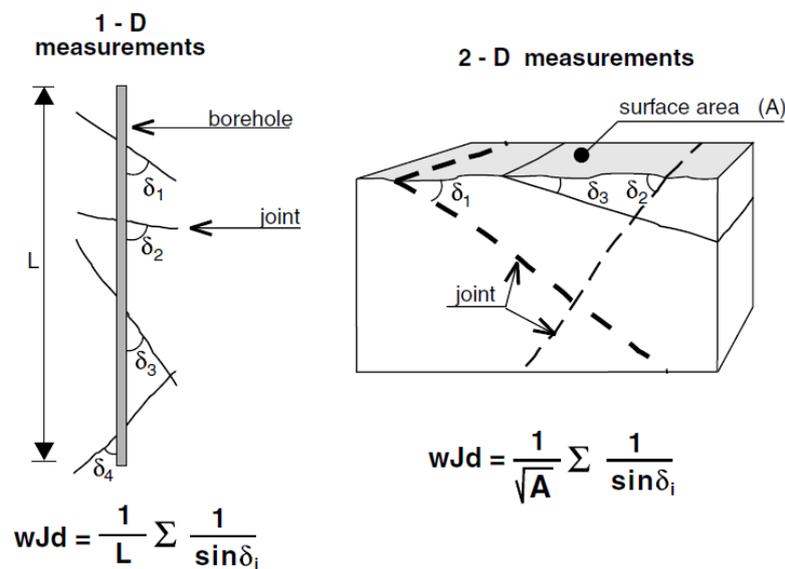


figura 3.4 – Definizione dell'wJd nel caso 1D e 2D (fonte *Palmstrom, 1996*)

Le formule per il calcolo di wJd sono presentate in figura 3.4 e nello specifico in presenza di una superficie 2D

$$wJd = \frac{1}{\sqrt{A}} \cdot \sum \frac{1}{\sin \delta_i} \quad (3.8)$$

con A pari alle dimensioni dell'area su cui avviene il rilievo, mentre lungo un campione 1D

$$wJd = \frac{1}{L} \cdot \sum \frac{1}{\sin \delta_i} \quad (3.9)$$

con L definito come la lunghezza del foro o del campione misurata.

A seguito dell'applicazione di queste correzioni il wJd può essere considerato circa uguale al J_v definito in precedenza e dunque ricavare il volume V_b con l'espressione (3.6).

2.2.3 Utilizzo dell'RQD e correlazione con il J_v

Il Rock Quality Designation (RQD) è definito come «*La percentuale di pezzi di campione intatti più lunghi di 10 cm sul totale della lunghezza del campione*» (Palmstrom, 2005). Costituisce uno strumento valido per un'indagine preliminare dell'ammasso roccioso, fornendo un valore medio e approssimativo del grado di fratturazione lungo la sezione di perforazione scelta. Tuttavia, per la sua natura di indagine invasiva unidimensionale, presenta alcune importanti limitazioni da tenere in conto. In particolare, non consente una corretta analisi nel caso di discontinuità con spaziatura elevata (si pensi alla differenza tra un RQD pari a 0 nel caso di spaziatura tra le fratture pari o minore di 10 cm e un RQD per una spaziatura uguale a 11) e non fornisce informazioni sulle parti del campione scartate perché di lunghezza minore di 10 cm. Inoltre si tratta di un tipo di indagine direzionale e non permette ovviamente di indagare l'ammasso in tutte le direzioni alla ricerca di eventuali particolarità.

Nonostante ciò, in molte situazioni la sua determinazione è di estrema importanza perché costituisce uno dei parametri di ingresso per il calcolo dell'indice Q di Barton e dell'RMR. In Palmstrom, 1996 è contenuta una correlazione che consente di determinare l'RQD a partire dal J_v

$$RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v \quad (3.10)$$

in cui RQD è pari a zero per $J_v > 35$ e pari a cento per $J_v < 4,5$.

In conclusione, è evidente come tutte le tecniche presentate all'interno di questo capitolo forniscano una semplice stima di uno o al massimo pochi volumi presenti in parete, sulla base di ipotesi molto semplificative tipicamente ben lontane dalle situazioni realmente incontrate. In particolare, le tecniche che prevedono l'utilizzo di valori medi di spaziatura come l'RQD, il J_v o S sono utilizzabili con estrema cautela per la loro impossibilità di tenere conto dell'estrema eterogeneità degli ammassi rocciosi presenti in natura. Per questo motivo gli sviluppi più recenti della ricerca si basano sull'utilizzo delle nuove tecnologie di acquisizione del dato da una parte, per poter analizzare anche pareti di estensioni considerevoli e inaccessibili di cui è oggetto il paragrafo 3.3, e sull'elevata capacità computazionale dei moderni calcolatori dall'altra, in grado di generare numerose simulazioni di volumi, come descritto nel paragrafo 3.4.

3.3 Tecniche di telerilevamento per l'acquisizione del dato

Negli ultimi decenni, l'avvento di nuove tecnologie di telerilevamento come i Terrestrial Laser Scanner (TLS) o i LIDAR (Light Detection and Ranging) ha completamente rivoluzionato le metodologie di indagine delle pareti rocciose. Queste tecniche consentono infatti di ottenere facilmente e velocemente notevoli quantitativi di dati digitali con elevata precisione anche in presenza di siti inaccessibili al rilievo manuale tradizionale, ricostruendo la tridimensionalità delle pareti attraverso l'acquisizione di nuvole di punti anche molto estese. Nell'ambito dello studio delle pareti rocciose le principali applicazioni in cui questi strumenti trovano impiego sono elencate in *Santana et al., 2012*. A titolo di esempio, si ricorda la ricostruzione e la generazione di DEM (Digital Elevation Model), l'identificazione e la caratterizzazione delle famiglie di discontinuità presenti, l'individuazione di volumi potenzialmente instabili o la ricostruzione di eventi passati attraverso lo studio delle tracce lasciate dagli stessi in parete³. Trattandosi di un settore in rapida espansione e oggetto di diversi ambiti di ricerca

³Per i riferimenti bibliografici relativi a tutti gli esempi elencati si rimanda ai lavori di *Santana et al., 2012* e di *Mavrouli et al., 2014*.

vengono nel seguito analizzati solamente alcuni approcci particolarmente vicini alla problematica di costruzione dell'IBSD di questo capitolo.

In generale, il modello digitale 3D della parete rocciosa viene elaborato con l'impiego di appositi software commerciali che, a partire dalle acquisizioni TLS o LIDAR, consentono di uniformare le scansioni eseguite eliminando eventuali outliers e di geo referenziarle correttamente. A partire da queste nuvole di punti, normalmente indicate con il nome di 3D point clouds, è possibile ricostruire le discontinuità esistenti. A ogni punto rilevato viene attribuito un vettore normale sulla base del quale è possibile assegnare a ogni punto un valore di direzione di immersione e di inclinazione. I punti che presentano una giacitura simile vengono classificati come appartenenti a una stessa discontinuità, ricostruendo così l'intera struttura dell'ammasso (*Riquelme et al., 2016, Mavrouli et al., 2015*).

Come evidenziato in *Ruiz Carulla et al., 2017*, la tecnica proposta è in grado di riconoscere solamente le discontinuità che generano una profondità. In alternativa gli autori propongono di utilizzare software fotogrammetrici che permettono, a partire da immagini digitali della parete, di ottenere non solo il DSM ma anche un corretto posizionamento delle tracce delle discontinuità sulla parete basate sull'ispezione visiva.

Una volta ottenuto il DSM e le discontinuità, *Mavrouli et al., 2014* propongono di costruire l'IBSD, inteso come l'insieme dei volumi formati dall'intersezione delle discontinuità al di là di qualunque considerazione cinematica, tramite ispezione visiva della nuvola di punti ottenuta. I punti che, sulla base di un criterio visivo, sono considerati come appartenenti alla medesima superficie sono raggruppati tra loro e interpolati da un piano generato sulla base di opportuni valori limite di distanza e deviazione angolare fissati attraverso apposita calibrazione su fotografie della parete. Successivamente, all'interno di un'area considerata rappresentativa dell'intera parete, viene misurata la distanza perpendicolare media tra due piani vicini. Questa può essere valutata tenendo conto di una persistenza infinita delle discontinuità e dunque un maggior numero di intersezioni con la linea di misura, oppure con una persistenza finita e dunque uno scenario più realistico. A partire dal valore medio di spaziatura ottenuto, la distribuzione del parametro viene ipotizzata assimilabile a una distribuzione di

probabilità esponenziale negativa. Il volume delimitato dalle tre famiglie di discontinuità che entra a far parte dell'IBSD viene calcolato come il prodotto delle tre spazature estratte per ogni simulazione secondo una procedura Monte Carlo dalla distribuzione ricavata in precedenza.

Un'alternativa alla costruzione dell'IBSD per la modellazione di un particolare evento avvenuto è presentata in *Ruiz Carulla et al., 2017* a partire dall'elaborazione di immagini digitali di cui si fornisce una sintesi. Le discontinuità vengono individuate manualmente sulle immagini e modellate sul DSM con una superficie generata da appositi softwares. Il volume totale distaccatosi è ottenuto sottraendo al DSM pre-evento disponibile quello calcolato a seguito dell'evento a partire da immagini digitali trattate con tecniche fotogrammetriche. Successivamente, sovrapponendo lo schema delle discontinuità generato alla parte di parete ricostruita, si ottiene una stima dell'IBSD dalle intersezioni delle discontinuità ipotizzate.

È evidente come la ricerca di tecniche di rilievo a distanza per la determinazione dei volumi presenti in una parete rocciosa sia un settore in grande espansione e di fondamentale utilità in diversi siti altrimenti non indagabili con l'impiego di un rilievo tradizionale. D'altra parte è necessario da una parte avere a disposizione una strumentazione adeguata all'acquisizione dei dati e dall'altra la capacità di saper scegliere il software migliore da utilizzare per l'interpretazione dei dati, sulla base essenzialmente dell'esperienza del rilevatore.

3.4 Tecniche di modellazione numerica per l'elaborazione dei dati

L'approccio per la determinazione dell'IBSD presentato in questo paragrafo prevede invece di ricostruire i sistemi di discontinuità presenti con l'utilizzo di simulazioni statistiche a partire dai dati ottenuti da rilievi tradizionali in campo o in alternativa a partire da immagini trattate con tecniche di fotointerpretazione. In generale, vengono sviluppati specifici algoritmi che generano combinazioni stocastiche dei parametri delle famiglie di discontinuità, creando così un modello discreto dell'ammasso noto in letteratura come Discrete Fracture Networks (DFNs) da cui si valuta la distribuzione dei volumi generati dall'intersezione delle discontinuità a ogni iterazione (*Ruiz Carulla et al., 2017*).

Come sottolineato da *Kim et al., 2006*, i parametri che descrivono le famiglie di discontinuità (giacitura, spaziatura e persistenza principalmente) giocano un ruolo fondamentale nella definizione dei volumi in parete. Sulla base di simulazioni numeriche sperimentali, gli autori di questo studio affermano che non è possibile non tenere conto dell'influenza della persistenza nel calcolo del volume del blocco di progetto in parete. Perciò la formula (3.2) deve essere corretta con l'espressione (3.3) introducendo un parametro p relativo alla persistenza al fine di tenere conto dell'influenza dei ponti di roccia presenti. Inoltre, sempre secondo i risultati delle simulazioni condotte da *Kim et al., 2006*, l'effetto della persistenza sulla definizione dell'IBSD risulta maggiore degli angoli tra le famiglie di discontinuità individuati in *Palmstrom, 2005*.

Elmoultie et al, 2012 hanno evidenziato le principali caratteristiche che i modelli numerici di simulazione devono possedere, via via migliorate e incrementate nel corso degli anni con il contributo di diversi studi e autori⁴. In particolare, l'algoritmo deve essere in grado di costruire domini composti da un numero variabile di famiglie di discontinuità, che isolano, sulla base delle loro proprietà, volumi di qualunque forma e dimensioni non indipendenti tra di loro, ma condizionati da quelli circostanti in modo tale che la loro somma sia uguale a quella del volume dell'intero ammasso.

Il DFNs viene costruito sulla base di alcuni dati di tipo deterministico, come le giaciture, ricavate attraverso un classico rilievo manuale in parete o attraverso sondaggi, e altri invece di tipo stocastico, in particolare modo le spaziature e le persistenze delle discontinuità. Questa seconda tipologia di dati viene tipicamente estratta per ogni simulazione da distribuzioni statistiche definite a priori attraverso una procedura Monte Carlo. La distribuzione da cui vengono estratti i parametri più utilizzata è l'esponenziale negativa, come dimostrato in *Stavropoulou, 2014*, ma in alcuni algoritmi più datati anche la distribuzione normale (si veda *Elmoultie et al., 2012* per i riferimenti).

Per quanto riguarda la procedura di estrazione, in alcuni modelli questa avviene all'interno di un catalogo predefinito di possibili discontinuità, valutando poi se

⁴ Per una sintesi dei principali studi che hanno portato allo sviluppo dei modelli di simulazione numerica attuali si rimanda ai riferimenti contenuti in *Elmoultie et al., 2012*.

queste possono generare un volume di una forma definita, prismatica tipicamente. In altri invece, come in quello presentato nel paragrafo 3.5, la distribuzione di probabilità viene costruita per ogni ammasso roccioso, inserendo i valori campionari richiesti per una stima dei parametri della distribuzione. Ad esempio, ipotizzando che la spaziatura e la persistenza di ogni discontinuità siano modellate da un'esponenziale negativa, l'espressione della funzione di probabilità cumulata si ottiene a partire dal valore medio campionario della grandezza acquisito durante il rilievo in campo. La distribuzione di probabilità può eventualmente essere troncata inserendo due valori limite (tipicamente quello minimo e quello massimo) rilevati all'interno dell'ammasso roccioso, come analizzato nel dettaglio nel paragrafo 3.5.

Perciò in linea generale un algoritmo, affinché sia in grado di individuare i volumi isolati dalle discontinuità all'interno di un ammasso roccioso contribuendo a definirne in maniera efficace l'IBSD, deve essere basato da una parte sulle necessarie semplificazioni indispensabili per la ricostruzione di un dominio molto eterogeneo e complesso come quello di un ammasso roccioso, ma dall'altra su tecniche, ad esempio di simulazione statistica, in grado di tenere conto dell'influenza fondamentale di spaziatura e persistenza sulla formazione dei volumi.

3.5 Modello scelto per la costruzione dell'IBSD

Dopo aver brevemente presentato nel paragrafo 3.4 le caratteristiche generali dei modelli di simulazione utilizzati per la determinazione dell'IBSD, si illustra ora nel dettaglio quello effettivamente utilizzato all'interno di questo lavoro di tesi per l'analisi del sito presentato nel capitolo 5. Si tratta di un algoritmo sviluppato mediante il software Matlab dall'ing. Philippot François durante la sua tesi di laurea magistrale presso il Politecnico di Torino⁵ e scelto proprio perché costruito specificatamente per l'ambito della caduta massi e per la presenza al suo interno di tutte le caratteristiche discusse nel paragrafo 3.4.

⁵ Per i riferimenti esatti riguardo alla tesi di laurea magistrale utilizzata, consultabile presso la biblioteca centrale del Politecnico di Torino, si rimanda alla bibliografia.

Il metodo si suddivide essenzialmente in tre parti principali: la definizione del dominio e dei parametri necessari alla modellizzazione, l'estrazione casuale per ogni simulazione dei valori necessari sulla base di distribuzioni di probabilità definite e infine il calcolo dei volumi vero e proprio da cui, sommando i risultati di tutte le simulazioni, si ottiene l'IBSD.

L'algoritmo riproduce una sezione verticale dell'ammasso roccioso, definita dal fronte e da due sistemi di discontinuità A e B, in cui A costituisce il piano di scivolamento del volume mentre B, con un'inclinazione sub verticale, svolge il ruolo di giunto di trazione che svincola il blocco a monte. Una terza famiglia di discontinuità con immersione circa perpendicolare al fronte e inclinazione sub verticale, parallela alla sezione che costituisce il dominio, deve consentire invece lo svincolamento laterale del blocco. Inoltre il fronte viene considerato come perfettamente piano e viene trascurata la presenza di altre famiglie di discontinuità diverse da quelle presentate, mentre la resistenza degli eventuali ponti di roccia presenti viene ipotizzata come infinita. In conclusione, i cinematismi per i quali il metodo si adatta meglio sono gli scivolamenti planari e i ribaltamenti. Ogni altra situazione risulta ovviamente modellabile, anche se con un grado di approssimazione sicuramente maggiore.

I parametri geometrici da inserire sono inizialmente l'inclinazione α della famiglia di discontinuità A, l'inclinazione β del sistema che costituisce il giunto di trazione a monte e l'inclinazione γ del fronte, come riportato in figura 3.5.

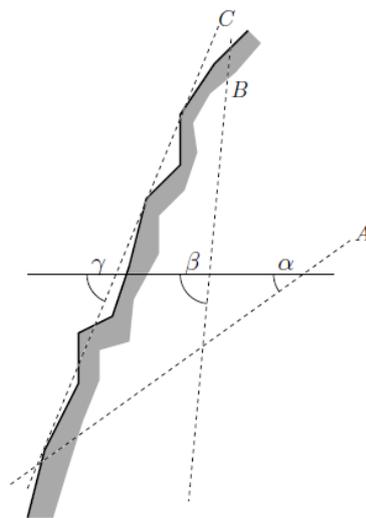


figura 3.5 – Geometria costituente il dominio del modello analizzato (fonte tesi di laurea Philippot F.)

In presenza di diversi sistemi di discontinuità all'interno dell'ammasso roccioso, è importante eseguire un'analisi di stabilità preliminare con l'utilizzo di strumenti come il test di Markland, al fine di individuare le famiglie in grado di generare le situazioni di maggior instabilità e che più si avvicinano alla condizione ideale riprodotta dall'algoritmo. A questo proposito, è importante ricordare che nel caso in esame le famiglie di discontinuità vengono considerate come aventi direzione di immersione coincidente con quella del fronte o al limite con una differenza massima di $\pm 20^\circ$, come avviene normalmente nelle analisi di stabilità bidimensionali.

I valori assegnati agli angoli α , β , γ , assieme alla spaziatura S_{lat} del sistema di discontinuità che costituisce lo svincolo laterale dei blocchi, sono le uniche grandezze di tipo deterministico del modello; tuttavia è consigliabile eseguire diverse misure di giacitura sulle discontinuità appartenenti alla famiglia scelta e trattare poi le misure con tecniche statistiche, utilizzando nell'algoritmo un valore rappresentativo di inclinazione, tipicamente il valore medio estratto dalla distribuzione di probabilità scelta.

I valori di spaziatura e persistenza dei sistemi A e B sono invece considerate due variabili di tipo aleatorio, assumendo per entrambi un andamento modellato da una distribuzione di probabilità esponenziale negativa troncata, come suggerito in letteratura (si veda ad esempio *Stavropoulou, 2014*). La generica espressione della funzione di probabilità cumulata $F(x)$ è definita come

$$F(x) = \frac{\xi - e^{-\frac{x}{\lambda}}}{(\xi - \eta)} \quad (3.11)$$

dove λ corrisponde al valor medio del parametro x , mentre ξ e η sono invece definiti come

$$\xi = \exp\left(-\frac{x_{min}}{\lambda}\right) \quad (3.12)$$

$$\eta = \exp\left(-\frac{x_{max}}{\lambda}\right) \quad (3.13)$$

Dunque la distribuzione esponenziale troncata risulta descritta mediante tre parametri che rappresentano il valore minimo, medio e massimo di spaziatura e persistenza per la famiglia di discontinuità A e per B.

A questo punto è possibile procedere fissando le dimensioni del dominio triangolare costituito dal fronte e dai sistemi A e B, calcolando le lunghezze L_A , L_B , L_V e $L_{B,orth}$, riportate in figura 3.6, a partire dalla lunghezza di L_A stabilita a priori. Il valore utilizzato deve essere sufficientemente elevato rispetto a quelli di spaziatura e persistenza, per evitare che i volumi generati possano essere influenzati da effetti di bordo; in generale si considera un valore di L_A di ordine di grandezza superiore al massimo valore di spaziatura presente.

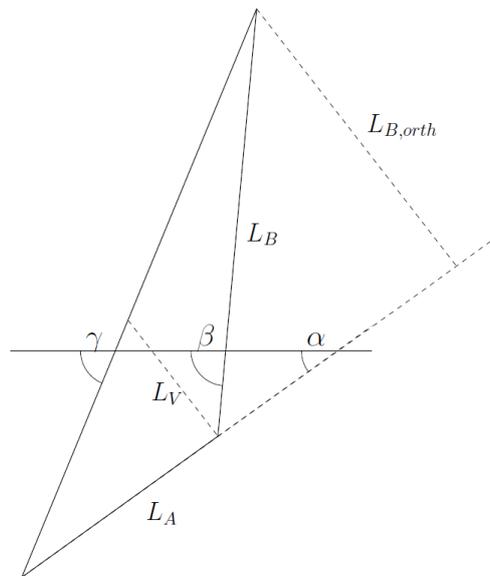


figura 3.6 – Dimensioni del dominio (fonte tesi di laurea Philippot F.)

Infine, per semplificare il successivo passaggio di calcolo dei volumi, il dominio viene normalizzato su un quadrato di lato unitario in cui la sezione verticale dell'ammasso modellata costituisce la porzione a destra della diagonale, come rappresentato in figura 3.7.

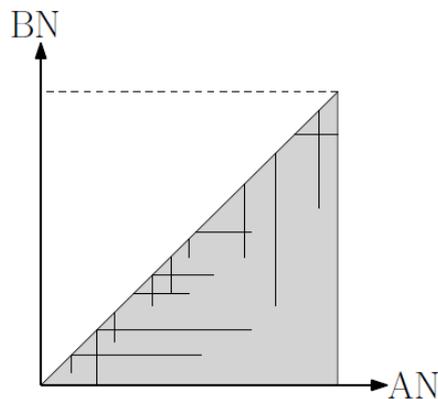


figura 3.7 – Geometria del dominio normalizzato (fonte tesi di laurea Philippot F.)

Le discontinuità appartenenti al sistema A sono modellate con rette orizzontali (AN) mentre quelle appartenenti al sistema B con rette verticali (BN). Tutti i parametri vengono normalizzati con apposite relazioni. Per ogni blocco generato nei passaggi successivi viene infine calcolata l'area della sezione verticale del blocco da cui si ottiene il volume V , definito come

$$V = A_{vert} \cdot L_A \cdot L_{B,orth} \cdot S_{lat} \quad (3.14)$$

Dopo aver completato tutte le simulazioni imposte dall'utente, il vettore V risulta costituito da tutti i valori di volume calcolati nelle N simulazioni, da cui è possibile costruire l'IBSD.

L'introduzione dei parametri di spaziatura e persistenza delle discontinuità nel dominio normalizzato avviene mediante estrazione casuale dalle distribuzioni esponenziali troncate generate a partire dai valori in ingresso inseriti. Per la spaziatura viene creato un vettore H che determina la posizione della generica discontinuità verticale, all'interno del quale ogni elemento H_i è definito come

$$H_i = H_{i-1} + S_{BN*} \quad (3.15)$$

dove S_{BN*} è un valore di spaziatura estratto casualmente dalla distribuzione con l'espressione

$$x^* = -\lambda \ln(\xi - F^* (\xi - \eta)) \quad (3.16)$$

dove x^* è il risultato dell'operazione di estrazione casuale a partire da un numero F^* compreso tra 0 e 1 generato da un generatore casuale (ad esempio in Matlab mediante il comando `rand`). L'operazione si interrompe nel momento in cui il risultato della somma (3.15) eguaglia o supera 1, il che è equivalente ad affermare che è stato percorso tutto il dominio normalizzato. Allo stesso modo si costruisce il vettore V per la definizione della spaziatura del sistema di discontinuità AN.

Per quanto riguarda l'implementazione della persistenza la tecnica utilizzata è simile a quella per la spaziatura. Questa proprietà viene modellata a partire dalla linea del fronte, corrispondente alla diagonale del quadrato nel dominio normalizzato, verso l'interno dell'ammasso roccioso, anche per modellare in maniera più realistica il comportamento dei primi metri della parete, quelli normalmente presi in considerazione per lo studio di fenomeni di caduta massi. In

particolare, viene definito il vettore S_V per ognuna delle discontinuità verticali all'interno del quale il generico elemento $S_{V,i}$ è dato da

$$S_{V,i} = H_i - p_{BN*} \quad (3.17)$$

dove il primo termine rappresenta il punto del fronte in termini di coordinata sull'asse verticale a partire dal quale viene applicata la persistenza, mentre invece il secondo deriva dalla solita procedura di estrazione del quantile della distribuzione applicata per un valore generato casualmente. In maniera del tutto analoga viene modellata la persistenza per le discontinuità orizzontali mediante il vettore S_H all'interno del quale il generico elemento è definito come

$$S_{H,i} = V_i + p_{AN*} \quad (3.18)$$

dove il primo termine rappresenta nuovamente la coordinata sull'asse del fronte su cui applicare la persistenza e il segno positivo del secondo termine prevede l'introduzione della proprietà della discontinuità verso destra in senso concorde all'asse AN. Una rappresentazione grafica delle coordinate presentate in (3.15), (3.17) e (3.18) è riportata in figura 3.8.

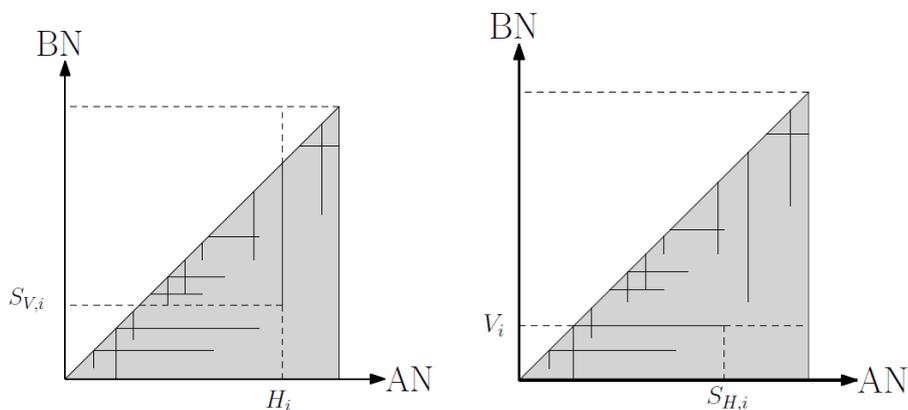


figura 3.8 – Identificazione delle discontinuità nel dominio normalizzato (fonte *tesi di laurea Philippot F.*)

L'ultima e forse più complicata parte dell'algoritmo è relativa al calcolo vero e proprio dei volumi, di cui di seguito si fornisce un'estrema sintesi. L'intero dominio costruito nei passaggi commentati in precedenza risulta suddiviso dalle spaziature generate nella simulazione in una maglia di celle. Per ognuna di esse è necessario calcolare l'area efficace che sarà una parte o tutta dell'area geometrica della cella, a seconda che questa si trovi completamente all'interno della porzione

di dominio identificante l'ammasso roccioso corrispondente al triangolo posto al di sotto della diagonale in figura 3.8.

Una volta memorizzate le aree delle celle in una matrice M_V , il modello procede alla valutazione delle adiacenze. In altre parole, si tratta della fase in cui vengono identificati i blocchi generati dalla simulazione costituiti da una o più celle, tra loro non completamente separate da discontinuità persistenti, totalmente separate dal resto dell'ammasso e dai contorni del dominio. Le aree di queste celle vengono infine sommate tra di loro e, tramite l'applicazione della (3.14), è possibile passare ai volumi effettivi. Il vettore V finale contiene tutti i volumi dei blocchi calcolati in ogni simulazione e, diagrammato sotto forma di istogramma, costituisce l'IBSD della porzione di ammasso roccioso indagato.

In conclusione, il metodo di costruzione dell'IBSD presentato in sintesi all'interno di questo paragrafo costituisce una metodologia innovativa per la stima dei volumi in parete, che supera quelli che sono i metodi tradizionali presentati nel paragrafo 3.2. Nello specifico, il suo impiego consente di definire un'intera distribuzione di volumi utilizzabile per confronti con quella ricostruita al piede della parete rocciosa o per altre esigenze. Al contempo il suo funzionamento si basa sui risultati ottenuti da un rilievo in campo manuale o dalle nuove tecnologie di acquisizione del dato presentate nel paragrafo 3.3 permettendo così il suo impiego in qualunque tipo di sito.

Capitolo 4

Costruzione della distribuzione dei volumi al piede

4.1 Introduzione

Il rilievo dei volumi presenti al piede di una parete rocciosa costituisce l'altro importante aspetto nella determinazione del volume del blocco di progetto, al pari dei volumi presenti in parete, illustrato nel capitolo 3. Anche in questo caso, l'obiettivo di questo capitolo è di ricercare un metodo per giungere alla costruzione della curva volume-frequenza, unicamente sulla base degli elementi presenti al piede della parete rocciosa.

Gli studi presenti in letteratura sottolineano l'importanza fondamentale di un adeguato rilievo al piede sia condotto in campo (*De Biagi et al., 2017*) che sulla base di cataloghi di eventi registrati se disponibili (*Dussauge-Peisser et al., 2002*) ma non forniscono generalmente alcuna metodologia operativa per la costruzione della curva volumi-frequenza nell'area di accumulo, indicata in seguito con l'acronimo RBSD (Rock Block Size Distribution). Probabilmente nella maggior parte dei casi sono stati presi in considerazione alcuni blocchi significativi ben individuabili oppure l'esiguo numero degli elementi presenti ha permesso la misura manuale del volume di ognuno.

Il risultato ottenuto deve risultare completamente indipendente dalla parete sovrastante in modo da poter essere confrontato con l'IBSD generato. In aggiunta a ciò, sulla base di alcune metodologie di recente sviluppo (*De Biagi et al., 2016*), a partire da tale curva è possibile giungere direttamente alla determinazione del volume del blocco di progetto corrispondente a una determinata probabilità di accadimento (espressa normalmente in termini di tempo di ritorno), utilizzabile nell'ambito della progettazione di opere di mitigazione del rischio.

L'operazione fondamentale da eseguire è il calcolo del volume dei blocchi presenti, che vengono successivamente suddivisi in classi. Queste raggruppano al loro interno tutti i blocchi che ricadono in un intervallo di volume specificato e permettono di ricavare la curva di probabilità cumulata decrescente (CPD), che associa a ogni volume la probabilità (espressa in termini di numero di blocchi o di frequenza tra zero e uno) di individuare volumi maggiori dello stesso. Si tratta di una metodologia ampiamente utilizzata in innumerevoli ambiti scientifici e ben consolidata anche per lo studio dei fenomeni naturali quali ad esempio terremoti (si veda ad esempio i riferimenti contenuti in *De Biagi et al., 2017*), frane (*Dussauge-Peisser et al., 2002*), valanghe (*De Biagi et al., 2012*), alluvioni (*Geist et al., 2014*) tra cui naturalmente anche la caduta massi (si veda ad esempio *Ruiz Carulla et al., 2015*).

In questo capitolo vengono dunque affrontate le problematiche relative alla costruzione della curva di distribuzione dei volumi al piede, a partire dalle diverse conformazioni dell'area di accumulo possibili. Successivamente il problema della misura manuale di notevoli quantità di elementi e l'influenza della forma nel calcolo del volume vengono analizzati ricercando in altri ambiti scientifici esempi di metodologie di conteggio e di calcolo adattabili al caso in esame. Infine sulla base di alcune importanti proprietà analizzate nel paragrafo 4.5 viene presentata una metodologia di rilievo in campo nel paragrafo 4.7, in grado di tenere conto di tutti gli aspetti elencati nel capitolo. Questa è stata realmente applicata nel sito descritto nel capitolo 5.

4.2 Conformazioni possibili dell'area di accumulo

L'area di accumulo, intesa come la superficie ai piedi della parete rocciosa all'interno della quale avviene l'arresto e il deposito dei blocchi caduti, presenta una conformazione molto eterogenea, variabile da sito a sito. Questa dipende essenzialmente dalla topografia del versante su cui avviene il fenomeno della caduta massi, sviluppandosi normalmente nel punto in cui vi è un cambio di pendenza che permette la dissipazione dell'energia posseduta dal blocco e dunque l'arresto. Tuttavia, l'aspetto di queste aree dipende anche dalla distribuzione dei volumi in parete e dall'instaurarsi o meno di un processo di frammentazione. Infatti, la generazione di un numero elevato di frammenti a seguito di molteplici

impatti lungo la traiettoria di caduta comporta la formazione di uno strato più o meno continuo di blocchi e detriti di dimensioni variabili. Al contrario, il distacco di volumi di dimensioni anche elevate da una parete con poche famiglie di discontinuità ben definite e un basso grado di frammentazione è caratterizzato dalla presenza nell'area di accumulo di un numero limitato di blocchi distanziati tra di loro e ben individuabili. Infine, un terzo aspetto determinante nell'analisi dell'area di accumulo è legato alla frequenza annuale di accadimento del fenomeno di caduta massi. Infatti, nei siti in cui questa è alta, si manifestano diversi eventi in periodi di tempo piuttosto ristretti, ricoprendo continuamente l'area di accumulo con nuovi blocchi che si aggiungono a quelli precedenti. Al contrario, in presenza di un numero limitato di eventi per anno, il deposito può essere ricoperto da vegetazione erbacea e da arbusti prima e da piante di alto fusto poi, che hanno il tempo necessario per svilupparsi. Inoltre, se i blocchi presenti sono di piccole dimensioni, sono stati rimossi e riutilizzati dall'uomo nei secoli e l'area di deposito è stata destinata a coltivazioni o a pascolo. Nei casi peggiori invece, la zona è stata interessata dalla costruzione di edifici e infrastrutture a uso agricolo prima e abitativo o produttivo poi.

I casi presentati nell'elenco che segue vogliono dunque dare la possibilità di ricondurre qualunque sito in analisi a una delle tipologie presentate. In questo modo è possibile facilitare la scelta del metodo da utilizzare per la costruzione della curva di distribuzione dei volumi. Infatti è importante sottolineare come i diversi scenari individuati comportano diversi gradi di difficoltà nella determinazione dei volumi presenti. In particolare, gli ultimi due casi risultano essere i più eterogenei e i più difficili da analizzare ed è indispensabile trovare delle tecniche operative di rilievo in campo diverse dal conteggio manuale di tutti gli elementi presenti. La casistica ipotizzata viene presentata come naturale, perciò in assenza di elementi antropici sull'area di accumulo. La presenza di quest'ultimi, al di là degli aspetti legati alla stima delle traiettorie dei massi e della quantificazione del rischio, costituisce un ostacolo che interferisce ulteriormente con le operazioni di rilievo in campo per il calcolo dell'RBSD.

4.2.1 Superficie “pulita”

Il primo caso presentato può essere considerato come il modello “ideale” e risulta particolarmente semplice da analizzare. Al piede della parete rocciosa da cui avvengono i distacchi si trova una superficie pianeggiante o inclinata con o senza copertura erbosa, in cui si individuano pochi blocchi di grandi dimensioni distanziati l’uno dall’altro. L’area totale di accumulo è dunque facilmente individuabile nel suo complesso e la costruzione della curva volume-frequenza si basa essenzialmente sul volume di pochi massi di dimensioni considerevoli (qualche m³) che possono essere misurati uno per uno singolarmente. Un esempio è riportato in figura 4.1, nella quale i due blocchi che dal pendio sovrastante hanno raggiunto il prato e la strada sono facilmente identificabili e misurabili, in assenza di altro materiale lapideo.



figura 4.1 – Esempio del caso 4.2.1 (fonte catasto dissesti Regione autonoma Valle d’Aosta)

4.2.2 Superficie “pulita” con blocchi non associabili a eventi monitorati

L'area di accumulo è nuovamente caratterizzata dall'assenza di detrito e vegetazione e dunque facilmente individuabile nel suo complesso. I blocchi accumulati non sono direttamente associabili a specifici eventi, ma comunque caratterizzati da dimensioni notevoli e distanziati l'uno dall'altro. Nel caso in esame è possibile eseguire una misura del volume di ogni singolo blocco eventualmente suddividendo l'area in sotto aree omogenee e misurando poi all'interno di specifiche aree di campionamento rappresentative nel caso in cui il numero dei blocchi sia elevato.

In alternativa, in presenza di vaste aree di accumulo, può risultare particolarmente vantaggioso l'impiego di immagini aeree o satellitari realizzate con le più avanzate tecnologie di ripresa disponibili che permettono, con l'aiuto di specifici software informatici, di automatizzare innanzitutto le operazioni di perimetrazione dell'intera area di accumulo e delle eventuali aree di campionamento e successivamente quelle di classificazione dei volumi presenti. Per quanto riguarda il secondo aspetto, si può dire che è stato oggetto di diversi filoni di ricerca in vari ambiti scientifici, come discusso nel paragrafo 4.3. Qui si anticipa che nel caso in esame si può pensare di adattare ad esempio le tecniche di MPS (Manual Photo Sieving) o AGS (Automated Grain Sized) descritte in *Cislaghi et al., 2015*.

In generale i siti che ricadono all'interno di questa casistica sono quelli che più si prestano all'utilizzo delle più avanzate tecniche di realizzazione ed elaborazione assistita di immagini, poiché i pixel che costituiscono gli elementi che devono essere riconosciuti e classificati all'interno della ripresa si distinguono nettamente. Questo permette a un algoritmo di classificazione di identificare quelli associabili a ogni singolo blocco, stimarne una dimensione nel sistema di riferimento locale adottato da cui ricavare infine il volume ipotizzando una forma geometrica elementare del blocco. I risultati ottenuti, proprio per la “semplicità” della conformazione dell'area di accumulo possono essere facilmente confrontati con quelli ottenuti da un conteggio manuale. In figura 4.2 viene riportato un esempio di un sito rientrante nella casistica descritta. Si tratta di un'area soggetta periodicamente a eventi di caduta massi che si distaccano dalle alte pareti

retrostanti, come risulta evidente dai blocchi ciclopici presenti in mezzo ai prati, evidenziati con cerchi azzurri, oltre al masso di dimensioni considerevoli presente in primo piano.

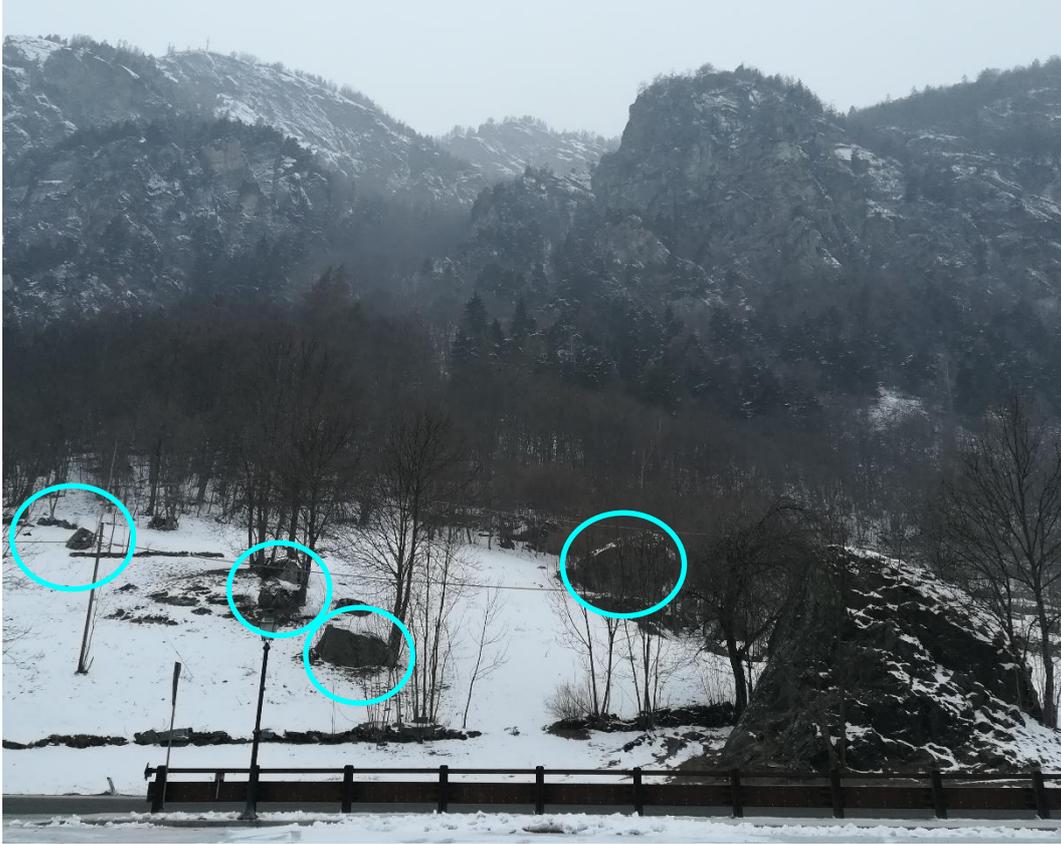


figura 4.2 – Esempio del caso 4.2.2

4.2.3 Superficie con arbusti

In questo caso l'area di accumulo è costituita da un numero anche elevato di blocchi per la maggior parte distanziati, che sono però in parte coperti o distanziati da erba alta, arbusti o comunque da vegetazione tipica di aree incolte. La perimetrazione dell'area di accumulo e l'individuazione delle eventuali aree di campionamento richiede una difficoltà maggiore, ostacolando l'utilizzo di tecniche di fotointerpretazione. Nell'esempio di figura 4.3, che si colloca a metà tra il caso qui presentato e quello nel sottoparagrafo 4.2.5, la stima delle dimensioni dell'area di accumulo e la ricerca dei blocchi sono ostacolati dalla presenza di cespugli.



figura 4.3– Esempio del caso 4.3

4.2.4 Superficie con piante di alto fusto

L'area di accumulo è ancora costituita da blocchi di dimensioni anche notevoli, di per sé facilmente identificabili e misurabili perché non costituiscono uno strato continuo di detrito, che tuttavia sono circondati da vegetazione di alto fusto a partire da singole piante isolate per arrivare a veri e propri boschi. A seconda dei casi, le piante possono avere un'altezza comparabile con quella dei blocchi oppure essere di dimensioni tali da interferire con le traiettorie di elementi di dimensioni medio-piccole, anche provocandone l'arresto.

Il contributo della vegetazione nella stima delle traiettorie, sia in termini di ricostruzione di traiettorie di eventi passati (processo di back analysis) sia come misura di protezione in grado di influenzare i cinematismi futuri, costituiscono argomenti di ricerca attuali e diffusi che esulano però dagli scopi di questo lavoro. In letteratura sono presenti numerosi lavori a cui fare riferimento; a titolo di esempio si cita il lavoro di *Perret et al, 2004* che analizza il ruolo dei boschi nelle traiettorie dei massi nelle alpi svizzere.

Le difficoltà legate allo studio dell'area di accumulo dipendono dal tipo di bosco che si è sviluppato, dalla specie prevalente, dalla presenza o meno del sottobosco, oltre che dal diametro medio delle piante e dalla loro densità. I fattori

elencati concorrono a complicare o meno la ricerca e la misurazione dei volumi presenti.

È evidente come in queste situazioni è sostanzialmente impossibile quantificare l'estensione dell'area di studio e l'individuazione di aree omogenee dall'analisi di immagini di qualunque tipo, ma la ricerca deve necessariamente essere condotta in campo e la determinazione del volume dei blocchi eseguita manualmente. Un esempio di sito rientrante in questa categoria è riportato in figura 4.4. Il deposito è costituito da singoli blocchi di dimensioni anche elevate distaccatisi dalla parete rocciosa sovrastante non tutti facilmente individuabili per lo sviluppo di boschi di roverella, oltre alla difficoltà di individuare, anche eventualmente su un supporto cartografico, i limiti dell'area di accumulo.



figura 4.4 – Esempio del caso 4.2.4

4.2.5 Superficie con arbusti e pietraia

Alla situazione con gli arbusti presentata in precedenza in figura 4.3 si somma la presenza di uno strato continuo di detrito e blocchi, che in pratica limita notevolmente la possibilità di misurare singolarmente ogni singolo volume presente. Inoltre i diversi strati di materiale potrebbero contenere in profondità volumi differenti dallo strato più superficiale e che non possono essere indagati

direttamente. Perciò è necessario individuare alcune aree rappresentative dell'intero deposito all'interno delle quali misurare tutti i volumi presenti, estendendo poi la curva ottenuta all'intera superficie.

4.2.6 Superficie con vegetazione di alto fusto e pietraia

Si tratta dell'unione di due delle situazioni presentate in precedenza. Nel caso in esame diventa indispensabile l'individuazione di aree rappresentative, che devono essere tracciate e verificate in situ per la presenza delle piante. Queste vengono tracciate e suddivise in aree di campionamento percorrendo e analizzando scrupolosamente l'intera area di deposito che spesso non risulta però facilmente perimetrabile.

Probabilmente si tratta del caso più vario e al contempo più difficile da studiare tra quelli proposti; le caratteristiche dell'area di deposito non consentono di utilizzare alcun supporto tecnologico e la ricostruzione dell'RBSD può essere basata solo sull'esperienza e la capacità di operare in campo del rilevatore. Un esempio è riportato in figura 4.5. L'area di accumulo, originata dalla parete rocciosa ben evidente anche dall'altro lato della valle, si estende all'interno di un'ampia area boscata di cui è veramente difficile individuarne i limiti, ipotizzati in verde. In alcuni punti la vegetazione più rada permette di distinguere nettamente la presenza di pietraie, in altri punti invece solo un attento rilievo in campo consente di individuare i volumi presenti tra le piante.



figura 4.5 – Esempio del caso 4.2.6

4.2.7 Pietraia

L'area di accumulo è costituita da diversi strati continui di materiale detritico e blocchi di dimensioni molto eterogenee (possono presentarsi alcuni blocchi isolati di dimensioni ciclopiche) che comportano un intervallo di distribuzione dei volumi molto elevato. L'estensione areale totale è normalmente definibile e facilmente individuabile in assenza di ostacoli, ma diventa impossibile, dato l'elevato numero di blocchi presenti, il singolo conteggio e il calcolo del loro volume. L'elevata frequenza annuale di accadimento degli eventi di caduta impedisce la crescita di vegetazione.

È indispensabile individuare una o più aree rappresentative da suddividere in sotto aree di campionamento; queste possono essere inizialmente individuate a partire da immagini dell'area di deposito e poi verificate in situ. Normalmente, dato l'elevato numero di blocchi da evidenziare e la grande varietà di dimensioni e forme presenti, l'impiego di algoritmi di classificazione automatica è sconsigliabile per la poca affidabilità dei risultati. Un esempio di sito rientrante in quest'ultimo caso analizzato è riportato in figura 4.6.



figura 4.6 – Esempio del caso 4.2.7

4.3 Calcolo del volume: l'esempio di altri ambiti scientifici

La determinazione del volume di ogni singolo elemento consiste essenzialmente nella misura delle dimensioni principali del blocco da cui si ottiene, attraverso una semplice moltiplicazione dei valori, il volume. Tuttavia, come descritto nel paragrafo 4.2, le diverse conformazioni dell'area di accumulo possono fare sì in alcune situazioni che il numero di blocchi sia tale da rendere praticamente impossibile una misura singola di ognuno, per un'evidente limite di tempo e di costi.

Attualmente non sembra che nella letteratura specifica sulla caduta massi siano indicate delle metodologie operative per il conteggio dei blocchi al piede di una parete rocciosa e per il calcolo del volume che possano essere universalmente applicate. Molto spesso, si considera questo come un aspetto secondario, troppo legato al sito in esame e dunque da effettuare basandosi sull'esperienza. In altri casi invece si studiano e si basano metodi innovativi sulle casistiche più "semplici" come possono essere i primi casi descritti nel paragrafo 4.2.

La soluzione pensata per affrontare il problema prevede di ricercare all'interno di altri ambiti della scienza, anche apparentemente "distanti" dall'ambito di

questo lavoro, soluzioni innovative per il conteggio di grandi quantità di elementi. Le situazioni elencate sono alcune di quelle in cui vi è la necessità di individuare e di quantificare le dimensioni di elementi presenti in un insieme, valutando per ognuna di esse l'adattabilità al caso della caduta massi.

4.3.1 Conteggio del numero di persone

La prima idea seguita è stata quella di cercare di capire come vengono stimati il numero di persone presenti in un determinato luogo. Si tratta di un ambito di ricerca particolarmente attivo negli ultimi anni, per la crescente necessità di garantire standard di sicurezza sempre più elevati, in particolare nelle città e in occasione di manifestazioni o grandi eventi. La maggior parte della letteratura in materia si basa però su un conteggio di tipo dinamico, sviluppando algoritmi che, con l'aiuto di sistemi di videosorveglianza posizionati in un punto fisso, permettono di riconoscere e contare i transiti.

Nel nostro caso invece occorre fare riferimento a un conteggio di tipo statico, cioè di elementi non in movimento. Questo ad esempio avviene in fase di pianificazione di una manifestazione, in cui occorre quantificare il numero di persone che possono essere ospitate all'interno di una piazza o di una struttura. Il calcolo si basa essenzialmente sul prodotto tra l'area della superficie, facilmente ottenibile anche da fotografie aeree o satellitari, e il numero di persone che possono rimanere in piedi all'interno di un metro quadrato di superficie. Quest'ultimo parametro è sostanzialmente definito a priori e facilmente ottenibile in letteratura. Un esempio del procedimento presentato è dato in *Yip et al., 2010*.

In alcuni casi particolari vengono invece individuate delle sotto aree in cui effettuare il conteggio manuale delle persone presenti e poi il risultato viene esteso a tutta la superficie; quest'ultimo procedimento presuppone l'esistenza e l'individuazione di una sotto area omogenea, al cui interno si ritrovano tutti gli elementi della popolazione. Effettuando un conteggio (in termini statistici si potrebbe definire un campionamento) all'interno di essa il campione ottenuto può essere considerato rappresentativo dell'intera popolazione. Si tratta di un concetto abbastanza banale nel caso di persone, ma di fondamentale importanza invece nel rilievo dei blocchi al piede di una parete rocciosa, come descritto nei paragrafi 4.5 e 4.6.

4.3.2 Conteggio del numero di cellule presenti nei tessuti

In biologia si ha spesso la necessità di contare e stabilire le dimensioni degli elementi analizzati siano essi cellule, neuroni o altri componenti di un organismo sviluppando tecniche che possono essere di nostro interesse, data la notevole quantità di elementi presenti e indagabili unicamente attraverso l'osservazione al microscopio, per l'impossibilità di effettuare una misura manuale. Senza voler scendere nei dettagli di ricerche molto complesse che richiedono una conoscenza approfondita della materia, si può dire ai fini del nostro lavoro che le tecniche usualmente praticate prevedono il conteggio manuale degli elementi di interesse, indicando per semplicità con questo termine le cellule all'interno dei tessuti, effettuato dall'operatore al microscopio su più vetrini estratti da sezioni diverse dei tessuti.

Al contrario, i lavori più recenti (le considerazioni qui esposte sono basate su *Mouton et al., 2016*) hanno sviluppato specifici algoritmi in grado di riconoscere all'interno di una fotografia ad alta risoluzione il numero di cellule presenti, sulla base del contrasto di queste con lo "sfondo", calcolandone poi le dimensioni. Si tratta in estrema sintesi di un processo di automatizzazione del conteggio manuale.

L'idea alla base è molto simile a quella presentata per i sedimenti dei fiumi descritta nel sottoparagrafo 4.3.4 e dunque le criticità riscontrate sono presentate in seguito. Ovviamente si tratta di metodi che richiedono tecnologie e software importanti e delicati, adatti a un utilizzo controllato in laboratorio, ma che difficilmente sono utilizzabili in un rilievo in campo.

4.3.3 Conteggio degli elementi presenti all'interno delle leghe metalliche

Una situazione per certi versi analoga a quella precedente è individuata nella produzione di leghe metalliche per le quali è necessario, in fase di controllo della qualità, verificare il numero e le dimensioni delle particelle presenti all'interno del prodotto realizzato. Ad esempio nel lavoro analizzato (*Takahashi et al., 2003*) si cerca di ricostruire con formulazioni matematiche la terza dimensione delle particelle a partire da fotografie al microscopio di campioni prelevati in punti diversi del prodotto. Anche in questo caso, oltre alle difficoltà matematiche di eventualmente adattare questi metodi al caso della caduta massi, si giunge al

calcolo del diametro di particelle che sono considerate sostanzialmente sferiche. Dunque nel caso della metallurgia si trascura l'influenza della forma sulla determinazione del volume; questo aspetto è ovviamente accettabile nello studio di elementi dell'ordine di grandezza dei micrometri, ma al contrario non può sicuramente essere trascurato del tutto alla scala dei metri di nostro interesse.

4.3.4 Costruzione della curva granulometrica

Una problematica analizzata molto più vicina alla caduta massi è quella legata alla costruzione della curva granulometrica nei terreni granulari. La conoscenza e l'analisi di tale curva è di basilare importanza non solo per lo studio della meccanica dei terreni, ma anche ad esempio per il calcolo di un parametro determinante per la modellazione delle correnti fluviali come la scabrezza di fondo in un corso d'acqua. Gli esempi a cui si fa riferimento in questo sotto paragrafo, tratti dai lavori di *Cislaghi et al., 2015* e *Bunte et al., 2009*, sono riferiti a questo ultimo ambito di applicazione, ma le considerazioni fatte possono essere estese a tutti gli ambiti della geotecnica, della sedimentologia e ogniqualvolta si ha la necessità di determinare la curva granulometrica di un terreno superficiale.

Bisogna dire però subito che in questi casi non si è interessati al calcolo del volume, ma solo effettivamente alle dimensioni delle particelle. Un aspetto positivo è però legato al fatto che si agisce comunque a scala macroscopica, come nel caso della caduta massi, poiché le dimensioni maggiori dei ciottoli possono arrivare ad essere paragonabili a quelle dei detriti più piccoli di cui vogliamo ricostruire il volume e dunque le idee su cui si basano le metodologie descritte sono valide.

L'approccio classico al problema su cui si basano tutte le varianti successive prevede di costruire una griglia di campionamento con maglie di uguali dimensioni e di camminare poi lungo le linee della maglia. In corrispondenza dei nodi, si raccoglie il primo elemento che si trova ai propri piedi e si misura il diametro, considerando sempre gli elementi come sferici. Una procedura di rilievo del tutto simile viene utilizzata anche per la costruzione della curva granulometrica nei depositi di valanga, secondo quanto presentato in *De Biagi et al., 2012*.

A partire da questo metodo di “base”, si sono sviluppati negli anni altri più complessi che prevedono di automatizzare la procedura e di realizzarla su fotografie dell’area, come ad esempio i metodi di tipo MPS (Manual Photo Sieving) o AGS (Automated Grain Sized). Nel primo caso, una griglia costruita con un semplice applicativo di tipo GIS viene sovrapposta a una fotografia. Su questa viene individuato un elemento in corrispondenza di ogni nodo che poi si misura, sulla fotografia, semplicemente tracciando la linea del diametro e facendo eseguire il calcolo della lunghezza al programma. Al contrario, la procedura AGS è più complicata e prevede di costruire un algoritmo in grado di riconoscere ogni singolo elemento presente e di misurarne le dimensioni. Naturalmente, oltre a un’oggettiva difficoltà legata alla realizzazione di algoritmi specifici, questa metodologia non è probabilmente indicata in presenza di pietraie dove gli elementi non sono nettamente separati tra di loro. Invece sia il conteggio manuale che il metodo MPS potrebbero essere adattati ad alcune possibili conformazioni delle aree di accumulo, come anticipato nel paragrafo 4.2.

L’approccio presentato da *Crosta et al., 2007* per la caratterizzazione dei depositi derivanti da un imponente fenomeno di *rock avalanche* avvenuto nel 1987 nelle alpi centrali italiane illustra invece l’utilizzo di una tecnica fotogrammetrica più tradizionale. Questa prevede il riconoscimento manuale da parte dell’operatore degli elementi presenti all’interno di fotografie digitali appositamente stampate con elevati ingrandimenti e poste al di sotto di fogli trasparenti. La stima delle dimensioni corrispondenti avviene per confronto con la scala di riferimento dell’immagine. Il foglio trasparente risultante viene poi scannerizzato, ottenendo una stima dell’area occupata dal frammento sull’immagine (A_{eq}), oltre ad altri parametri come le coordinate e il centro del più piccolo rettangolo circoscritto al frammento o la lunghezza degli assi dell’ellisse che meglio lo approssima. La terza dimensione delle particelle viene stimata introducendo un diametro equivalente definito come

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{eq}}{\pi}} \quad (4.1)$$

da cui si ottiene il volume della particella dal prodotto di esso con l'area occupata dal frammento A_{eq} .

A conclusione di questo confronto si può notare come problemi simili a quelli da affrontare per la costruzione della curva di distribuzione dei volumi al piede siano presenti in altri settori scientifici. In particolare, è evidente come ogniqualvolta il numero di elementi da misurare sia molto elevato si tenda ad effettuare la misura manuale solamente in una sotto area considerata come rappresentativa e i risultati vengano poi estesi all'intera popolazione. Inoltre, in tutti i settori di ricerca si cerca di automatizzare le procedure di conteggio e misurazione con l'elaborazione di algoritmi in grado eseguire le operazioni su fotografie digitali di varia natura. Quest'ultimo aspetto deve essere utilizzato con attenzione nello studio dei fenomeni di caduta massi, poiché nella maggior parte dei casi la grande eterogeneità dei siti e la loro distanza dai casi ideali limita notevolmente l'utilizzo delle nuove tecnologie. Per questo motivo, il metodo di sintesi elaborato al termine di questo capitolo si basa essenzialmente sul conteggio manuale.

4.4 Influenza della forma nel calcolo del volume

I casi provenienti da altri ambiti scientifici presentati nel paragrafo 4.3 hanno come solo obiettivo la stima del numero e delle dimensioni degli elementi presenti; nello sviluppo di questo lavoro invece è necessario giungere a determinare il volume di elementi di dimensione macroscopica. Il calcolo può essenzialmente avvenire solamente a partire dalla misura delle dimensioni principali del blocco. Gli unici modi per ottenere il volume senza l'utilizzo di una formula geometrica sono quelli basati sulla spinta di Archimede, nei quali il corpo viene immerso in acqua, dove viene misurato il volume di liquido spostato da cui, per differenza con il volume di acqua iniziale, si ottiene quello dell'oggetto. All'interno del lavoro di *Gupta et al., 2016*, lo stesso principio viene utilizzato sostituendo l'acqua con la sabbia, consentendo di superare le naturali differenze di dimensioni e forma dei campioni geotecnici che giungono in laboratorio. Si tratta di metodi validi, che consentono di limitare la propagazione degli errori attraverso le formule geometriche moltiplicative, ma che sono ovviamente impraticabili in campo e perciò inutilizzabili all'interno di questo lavoro.

L'utilizzo delle formule della geometria solida risulta dunque essere l'unico approccio possibile per il calcolo del volume del singolo blocco. A ogni elemento deve dunque essere associato un solido geometrico elementare con la corrispondente formula. Questo passaggio, tutt'altro che semplice e molto soggettivo, dipende dalla forma del blocco. Infatti, se questa ricorda quella regolare di un cubo o di una sfera, il calcolo del volume risulta immediato dalla misura di una sola dimensione; in caso di forme più irregolari invece il problema si complica perché è necessario compiere due o tre misurazioni di lunghezza e utilizzare formule più complesse, amplificando gli errori.

Nello studio del fenomeno della caduta massi la forma, assieme alle dimensioni e alle caratteristiche meccaniche della roccia che lo compone, viene considerata uno dei fattori che influenzano la traiettoria del blocco. All'interno dei modelli numerici di simulazione più complessi e avanzati è possibile specificare la forma del blocco in movimento, determinando così la sua influenza sui punti di impatto e di arresto. Al contrario, sono pochi gli studi in cui viene analizzata e tenuta in considerazione la forma degli elementi presenti nell'area di accumulo e la sua importanza per il calcolo del volume.

Fityus et al., 2013 hanno condotto uno studio relativo alla regione del New South Wales in Australia in cui ricercavano un legame tra l'origine geologica delle rocce e le dimensioni e la forma dei frammenti che derivano da fenomeni di crollo. In particolare è interessante ai fini di questo lavoro i rilievi in campo eseguiti in diverse aree di accumulo in tutta la regione, dove sono stati raccolti dai 30 ai 50 campioni in ogni sito. Per ognuno di essi sono state misurate le tre dimensioni principali, oltre al numero di facce e la curvatura, quest'ultimi parametri utili per lo studio delle traiettorie. La dimensione massima d_{max} è stata identificata come la maggiore del blocco, la minima d_{min} come la più piccola misurata in direzione perpendicolare a d_{max} . L'ultima è quella intermedia misurata in direzione perpendicolare a d_{max} e d_{min} .

Le combinazioni possibili sono teoricamente infinite, ma gli autori dello studio definiscono una serie di forme elementari, raggruppate sulla base di traiettorie simili. Ad esempio, è piuttosto evidente e facilmente verificabile come i blocchi con una forma riconducibile a quella di una sfera tendano a rotolare diversamente

da quelli a forma piramidale e di conseguenza ad avere traiettorie e punti di arresto differenti.

La suddivisione all'interno delle cinque famiglie si basa sul confronto fra le tre dimensioni principali misurate, secondo i criteri presentati in tabella 4.1. I principali esempi di forme possibili per ogni famiglia sono presentati in figura 4.7.

tabella 4.1 – Caratteristiche delle principali famiglie di forme (fonte *Fityus et al., 2013*)

Tipologia	Caratteristica	Esempi di forme possibili
Regolare	$d_{max} \approx d_{mid} \approx d_{min}$	Sfera, cubo, ottaedro, dodecaedro
Cilindrica	$d_{max} > (d_{mid} \approx d_{min})$	Cilindro, prisma, ellissoide
Disco	$(d_{max} \approx d_{mid}) > d_{min}$	Disco o emisfero
Conica	$d_{max} > (d_{mid}, d_{min})$	Cono o piramide
Acuta	Presenza di angoli acuti	Tetraedro, cuneo, fette triangolari o rettangolari

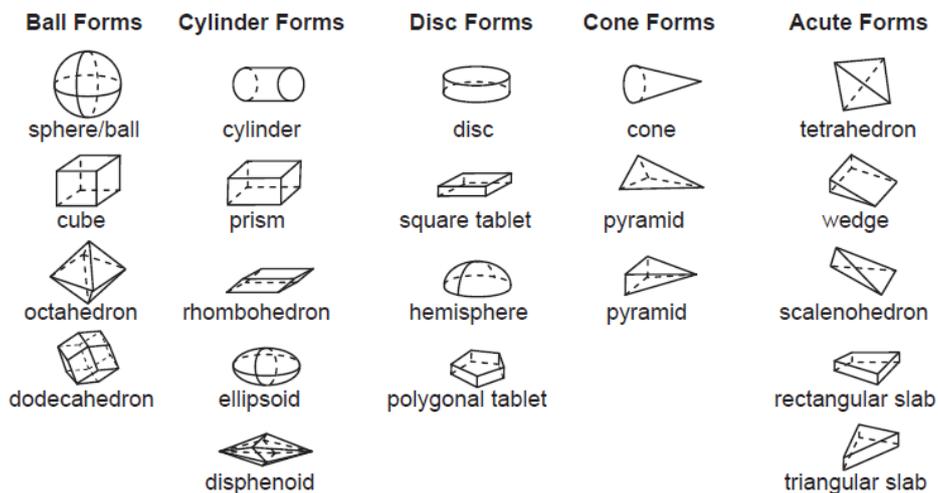


figura 4.7 – Esempi di forme possibili per le cinque famiglie (fonte *Fityus et al., 2013*)

Dunque a partire dal confronto delle tre dimensioni principali si ricerca la forma che più approssima il blocco, cercando anche di immaginarsi il comportamento dell'elemento durante il movimento. Per ogni forma è disponibile una o più formule che permette di calcolare il volume, facilmente reperibile in qualunque testo di geometria solida. In generale si può dire che la struttura delle formule è ricorrente all'interno di ognuna delle cinque famiglie; questo avviene ad esempio nella famiglia delle “Ball forms”, dove in tutte le forme elencate è necessaria una sola dimensione che elevata al cubo e moltiplicata per un coefficiente fisso fornisce il risultato. È evidente come una struttura simile porta come in questo a

una propagazione dell'errore associato alla misura dello stesso ordine di grandezza per forme appartenenti alla stessa famiglia.

Naturalmente si tratta di un procedimento caratterizzato da un certo grado di soggettività legato alla scelta della forma; in ogni caso è importante sottolineare lo sforzo per la ricerca di un criterio di classificazione oggettivo. Inoltre la metodologia presentata è stata applicata per un numero limitato di campioni; naturalmente non può essere utilizzata in caso di conteggio manuale di un numero elevato di blocchi.

Tuttavia, è possibile ipotizzare che in una fase di pianificazione del rilievo vengano visivamente confrontate le forme di alcuni blocchi, in modo da capire se l'intero deposito possa essere associato a una sola famiglia di quelle presentate oppure no. In questo modo, il volume dei blocchi scelti come rappresentativi può essere calcolato con la formula del solido geometrico che meglio lo approssima e tutti i blocchi successivi con forma e dimensioni simili essere facilmente associati alla stessa famiglia.

4.5 Utilizzo della legge di potenza e introduzione all'approccio frattale

La costruzione della curva di distribuzione dei volumi, sia ottenuta dall'analisi di fenomeni avvenuti nel passato contenuti all'interno di cataloghi o archivi (*Dussauge-Peisser et al., 2002*), sia sulla base dei volumi presenti al piede (tra i tanti esempi si cita *Ruiz Carulla et al., 2015*) permette di ottenere un legame tra la magnitudo di un evento in termini di volume del singolo blocco o dell'evento e la sua frequenza cumulata. Si tratta di una metodologia ben consolidata nello studio di diversi fenomeni naturali, a partire dai terremoti e dalle alluvioni per arrivare recentemente alle frane e alla caduta massi. In generale però il calcolo dei parametri della distribuzione si basa su un'ampia disponibilità di dati storici contenuti negli archivi.

Al contrario invece, nello studio delle frane e nella caduta massi difficilmente è possibile disporre di dati storici distribuiti su ampi intervalli di tempo. Ecco perché gli studi più recenti (si veda ad esempio *De Biagi et al., 2017*) cercano di fornire una modellazione matematica che non solo tenga conto dei dati storici, ma anche dei rilievi compiuti in campo, nei quali i volumi al piede sono visti come l'insieme di tutti i volumi mai caduti.

Diversi autori hanno evidenziato come nel caso della caduta massi la relazione che interpola i valori rilevati risulta matematicamente espressa (De Biagi et al., 2017) da una legge di potenza negativa nella generica forma

$$n(v \geq V) = a \cdot V^{-b} \quad (4.2)$$

dove $n(v \geq V)$ è la frequenza di blocchi con volume maggiore di V e a e b sono due costanti da determinare tipicamente attraverso una regressione lineare o attraverso metodi di stima della massima verosimiglianza. Esprimendo il volume e la frequenza in termini logaritmici la relazione risulta essere di tipo lineare come mostrato in figura 4.8. In questo caso, il coefficiente a può essere visto come il valore di frequenza corrispondente a un blocco di volume pari all'unità di misura considerata (in figura 4.8 viene considerato 1 m^3), mentre b risulta essere il coefficiente angolare della retta e la dimensione frattale del problema.

Il valore di a presenta una relativa differenza tra sito e sito mentre quello di b viene ipotizzato da diversi autori come indipendente dalla scala di studio del problema e dal sito considerato, quanto piuttosto influenzato dal grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, con un valore del coefficiente più basso per ammassi più integri⁶.

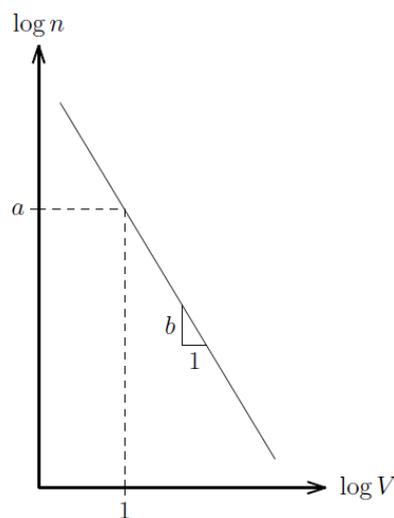


figura 4.8 – Rappresentazione della legge di potenza che lega volume e frequenza con assi logaritmici (fonte De Biagi et al., 2017)

⁶ Per una approfondita panoramica degli autori che hanno proposto valori dei parametri a e b si rimanda ai riferimenti contenuti all'interno di De Biagi et al., 2017.

In figura 4.9 viene invece riportato un esempio tratto da *Dussauge-Peisser et al., 2002* di approssimazione dei dati storici presenti in un catalogo con una legge di potenza.

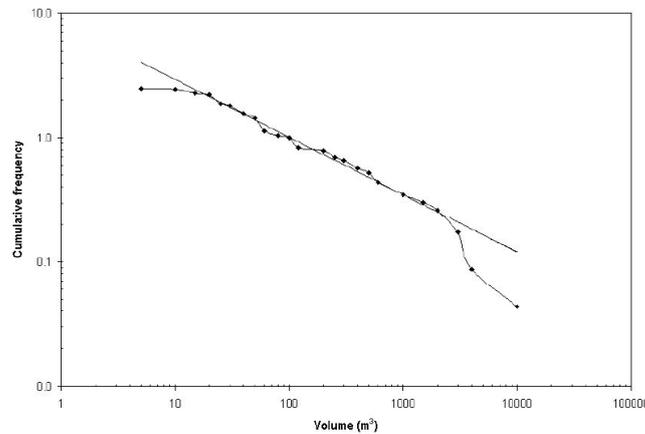


figura 4.9 – Esempio di approssimazione di dati storici con una legge di potenza
(fonte *Dussauge-Peisser et al., 2002*)

È evidente dalla lettura del grafico di figura 4.9 che l'approssimazione risulta accettabile per un intervallo centrale di valori di volume, mentre sulle code, sia per quanto riguarda i volumi più piccoli che quelli più grandi la legge di potenza tende a sovrastimare la frequenza associata a un determinato volume. Per questo motivo, soprattutto nelle analisi di rischio o nella progettazione delle opere in cui si lavora estrapolando un valore corrispondente a tempi di ritorno elevati è necessario agire con cautela, valutando attentamente i limiti di validità dell'estrapolazione e determinando ad esempio il massimo volume che può essere predetto con i modelli (*Corominas et al., 2017*) e il massimo volume fisicamente individuabile in parete⁷.

Nel caso invece di basse magnitudo la distanza tra dati e modello è principalmente dovuta alla limitata durata temporale delle serie storiche di eventi e dal fatto che volumi troppo piccoli possono erroneamente essere considerati come appartenenti a uno stesso evento e non indipendenti. Perciò si ricorre all'utilizzo di distribuzioni più complesse come la Pareto (si veda ad esempio *De Biagi et al., 2017*) che tendono ad adattarsi meglio a campioni meno numerosi e

⁷ Per una trattazione dettagliata degli errori legati alla stima dei parametri delle leggi di potenza si rimanda a Geist et al., 2014 e a Clauset et al., 2009.

introducendo un valore minimo di soglia, che rappresenta, sempre secondo *De Biagi et al., 2017* «[...] *La dimensione minima del blocco caduto che è stata sempre osservata e registrata dopo il suo accadimento*». La curva viene perciò elaborata escludendo i volumi minori del valore di soglia.

La struttura generale (4.2) della legge di potenza può essere riscritta nella forma

$$n(v \geq V) = a \cdot \left(\frac{1}{v^b}\right) \quad (4.3)$$

tipica di un modello frattale, dove b viene considerato come la dimensione frattale del problema, considerando il fatto che in tutti gli studi proposti (*De Biagi et al., 2017*) il suo valore non è intero, quanto piuttosto appartenente all'insieme Q^+ dei numeri razionali positivi. La struttura della (4.3) e il modo in cui il valore di b viene ricavato come coefficiente angolare della retta in un dominio logaritmico ricade esattamente nella definizione di dimensione frattale ricavata con il metodo del “box counting” (*Turcotte, 1997*).

Ai fini di questo capitolo è importante sottolineare come l'invarianza di scala del processo, proprietà fondamentale di un modello frattale presentata nel dettaglio nel capitolo 6, garantisca la presenza di tutta la distribuzione dei volumi non solo alla scala globale del problema e dunque sull'intera area di accumulo, ma anche all'interno di sola parte di essa. Dunque è possibile eseguire il campionamento e la misura dei volumi dei blocchi solamente su aree omogenee di dimensioni minori rispetto all'intero deposito, avendo garantita la presenza di tutti i volumi da rilevare. Proprio su questo tipo di approccio si basa sia la metodologia di rilievo contenuta in *Ruiz Carulla et al., 2015* presentata nel paragrafo 4.6 che quella effettivamente utilizzata nel rilievo in campo svolto e illustrata nel paragrafo 4.7.

4.6 Costruzione dell'RBSD a partire da aree di campionamento

Dopo aver esposto nei capitoli precedenti i casi, le problematiche e i modelli teorici relativi alla costruzione della curva di distribuzione dei volumi al piede è possibile presentare una prima metodologia di rilievo presente in letteratura da cui trae origine quella effettivamente utilizzata in campo all'interno di questo lavoro.

La tecnica ipotizzata da *Ruiz Carulla et al., 2015* è stata pensata per la costruzione della curva dei volumi relativa a un singolo evento di magnitudo elevata, ma può essere utilizzata come nel caso di questo lavoro di tesi anche per il rilievo di tutta la volumetria presente al piede, indipendentemente dall'accadimento di eventi particolari. Uno schema sintetico dei passaggi da eseguire viene presentato in figura 4.10. L'intero accumulo viene suddiviso in aree omogenee (da A1 a A3 in figura 4.10) basate sull'osservazione visiva o su tecniche fotointerpretative a seconda del sito; al loro interno vengono individuate alcune aree definite di campionamento, nelle quali viene misurato il volume di tutti i blocchi presenti costruendo così per ognuna la curva di distribuzione. I blocchi di dimensioni ciclopiche presenti in tutto il deposito vengono individualmente georeferenziati e misurati, ottenendo una curva apposita di relazione tra volume e frequenza basata sui dati puntuali chiamata LSB (Large Scattered Blocks). L'unione di tutte le distribuzioni costruite avviene attraverso alcuni fattori di scala giungendo a una curva che corrisponde all'RBSD.

Nello specifico, ogni blocco misurato in ogni area di campionamento viene classificato in classi di volume j precedentemente identificate; è importante valutare diversi valori di intervalli per le classi, al fine di trovare i più rappresentativi, soprattutto per quanto riguarda le classi di volume maggiore. Il numero di blocchi di ogni classe j esteso su tutta l'area omogenea i (nel caso presentato in figura 4.10 $i=3$) è dato dal numero dei blocchi di ogni classe misurati in ogni area di campionamento moltiplicato per un fattore di scala

$$n(V_j)_i^{RBSD} = n(V_j)_i^{misurata} \cdot R_i \quad (4.4)$$

dove R_i è definito come

$$R_i = \frac{A_i}{A_i^{camp}} \quad (4.5)$$

in cui A_i è l'area di ogni superficie omogenea i e A_i^{camp} è l'area della superficie di campionamento individuata nella superficie i .

Infine il valore dell'RBSD relativo a ogni classe di volume j risulta essere

$$n(V_j)^{RBSD} = \sum_{i=1}^r n(V_j)_i^{RBSD} + n_{LSB}(V_j) \quad (4.6)$$

dove $n(V_j)^{RBS D}$ è il numero stimato di blocchi nella classe j nell'intera area di accumulo, $n(V_j)_i^{RBS D}$ il numero stimato di blocchi in ogni classe di volume j all'interno di ogni i -esima delle r aree omogenee individuate e $n_{LSB}(V_j)$ il numero di LSB presenti in ogni classe di volume j . Il risultato finale ottenuto può essere espresso sia in termini di numero cumulativo di blocchi oppure come frequenza relativa cumulata.

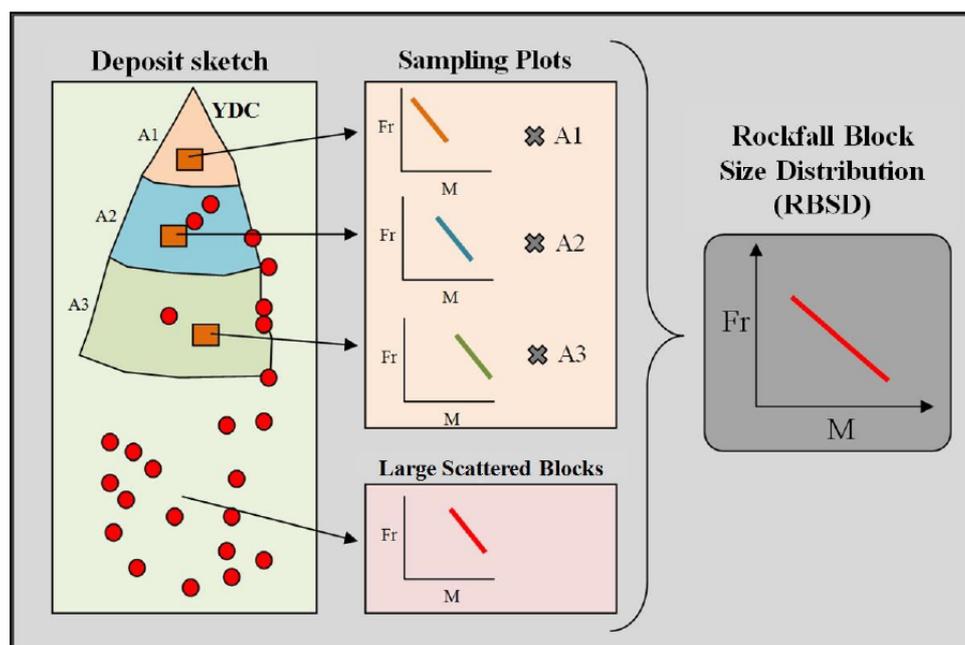


figura 4.10 – Rappresentazione schematica della determinazione dell'RBSD (fonte Ruiz Carulla et al., 2015)

Risulta conveniente in un'analisi di questo tipo scegliere più di un'area di campionamento per ognuna delle aree omogenee. In effetti confrontando le curve ottenute dai diversi campionamenti ed eseguendo un'analisi di sensibilità escludendo ogni volta un campione diverso è possibile capire se la superficie all'interno della quale sono stati eseguiti i campionamenti sia effettivamente da considerarsi omogenea oppure no e l'influenza di ogni campione sul risultato finale. Inoltre, le dimensioni delle aree di campionamento dipendono dalle dimensioni dei blocchi da misurare; come regola di base viene proposta una differenza minima tra le due di almeno un ordine di grandezza. Di conseguenza, in presenza di blocchi di dimensioni maggiori, maggiore sarà l'estensione dell'area in cui dover compiere le misurazioni.

Infine la curva finale che lega volumi e frequenza relativa cumulata può essere approssimata da una legge di potenza come presentato nel paragrafo 4.5, sia

eseguendo un'interpolazione lineare della curva in un diagramma con i due assi logaritmici sia eseguendo una stima dei parametri della legge attraverso i metodi della massima verosimiglianza e utilizzando il test del χ^2 per la verifica dei risultati (Dussauge et al., 2003). Come già discusso nel paragrafo 4.5 e dall'analisi di figura 4.11 che riporta i risultati dell'approssimazione condotti da Ruiz Carulla et al., 2015 al termine del loro lavoro, la legge di potenza non consente di modellare adeguatamente il fenomeno sulle code della distribuzione.

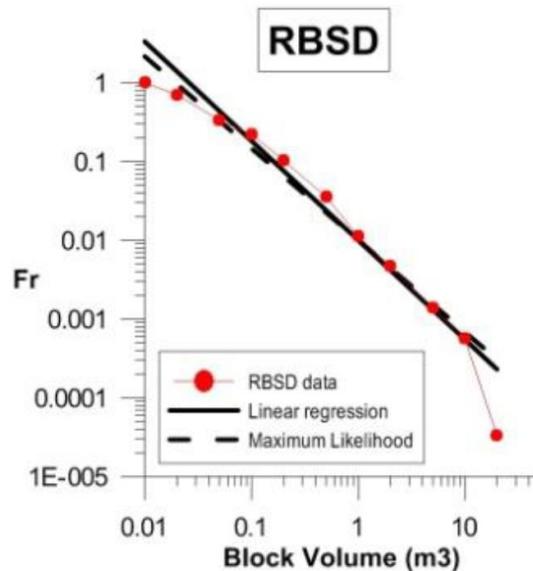


figura 4.11 – Risultati della stima dei parametri della legge di potenza (fonte Ruiz Carulla et al., 2015)

In conclusione, l'utilizzo di questo metodo per la costruzione del RBSD risulta particolarmente vantaggioso nei casi di pietraie o comunque in quelli in cui il conteggio manuale di ogni singolo blocco risulta nella pratica impossibile per la presenza di un numero considerevole di elementi da misurare.

Proprio per questo motivo, la metodologia di rilievo effettivamente utilizzata nella costruzione della curva di distribuzione dei volumi nel sito analizzato all'interno di questo lavoro di tesi risulta essere una variante di quella appena analizzata ed è presentata nel paragrafo 4.7.

4.7 Metodologia di rilievo finale

Le considerazioni presentate nei capitoli precedenti hanno permesso di giungere alla conclusione che la frammentazione che avviene durante un evento di caduta massi e di conseguenza il risultato di questo processo costituito dalla distribuzione dei volumi al piede della parete rocciosa può essere associato ad un processo di

tipo frattale. Sulla base di questa affermazione è possibile pertanto osservare la ripetizione del fenomeno di frammentazione a differenti scale, sfruttando il concetto di invarianza di scala dei processi governati da leggi di tipo frattale. Per questo motivo, come già indicato nel metodo proposto da *Ruiz Carulla et al., 2015* analizzato nel paragrafo 4.6, all'interno dell'area di accumulo viene individuata una porzione supposta omogenea entro cui avviene il campionamento vero e proprio, inteso come la misura del volume di tutti i blocchi presenti. I risultati ottenuti sono poi estesi all'area omogenea e da questa all'intero deposito. I passi da compiere per giungere alla costruzione della curva di distribuzione al piede vengono ora analizzati e commentati nel dettaglio.

4.7.1 Individuazione dell'area omogenea e delle aree di campionamento

Per prima cosa, è necessario individuare una porzione di zona di accumulo dove, sulla base di un'analisi visiva, appare che la distribuzione dei volumi crollati sia omogenea. In tale porzione, che per comodità viene denominata S , sono indicativamente presenti blocchi di dimensioni estremamente eterogenee, da piccola a ciclopica. Se possibile, è bene individuare tale area su un supporto cartografico.

All'interno di S deve essere scelta un'ulteriore area entro la quale non siano presenti blocchi di dimensioni ciclopiche, facilmente percorribile e che possa essere perimetrata. Questa è costituita da un rettangolo di dimensioni 12 m x 12 m, successivamente riquadrato in quattro sotto aree di dimensione 6 m x 6 m, denominate A_1 , A_2 , B_1 e B_2 come rappresentato nello schema riportato in figura 4.12 .

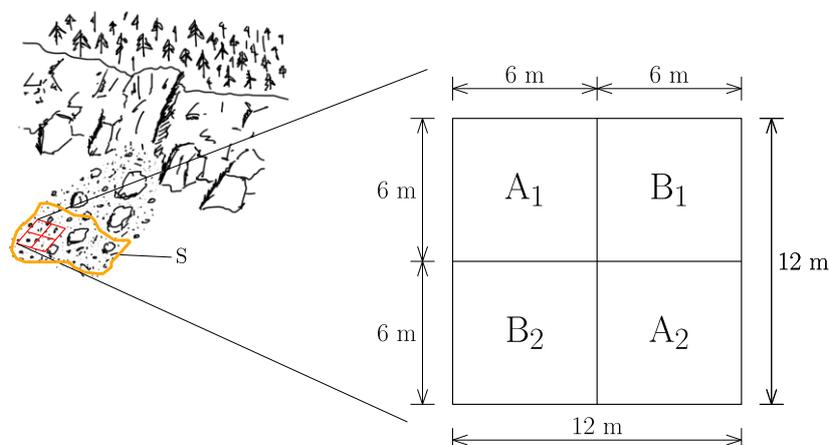


figura 4.12 – Schema di costruzione dell'area di campionamento

Nelle aree indicate con A₁ e A₂ vengono rilevati i blocchi da piccoli a medi, mentre in B₁ e B₂ quelli da medi a grandi, su tutto il quadrato 12 m x 12 m i blocchi molto grandi e infine sull'intera superficie S i blocchi di dimensioni ciclopiche.

4.7.2 Rilievo dei volumi presenti nelle aree di tipo A

Si procede innanzitutto con il rilievo delle volumetrie inferiori. Nelle due aree di tipo A i volumi sono suddivisi in cinque classi volumetriche i cui limiti superiori, assieme alle dimensioni ideali dei volumi di riferimento, sono riportati in tabella 4.2.

tabella 4.2 – Classi di suddivisione dei volumi per le aree di tipo A

Classe	Dimensioni indicative dm	Volume dm³
0	2 x 2 x 2	8
I	2,8 x 2,8 x 2,8	22,6
II	4 x 4 x 4	64
III	5,7 x 5,7 x 5,7	181
IV	8 x 8 x 8	512
V	11,3 x 11,3 x 11,3	1448,2

Prima di iniziare il rilievo vero e proprio è dunque necessario individuare all'interno del deposito cinque volumi che possano essere rappresentativi delle classi volumetriche indicate in tabella 4.2. Tali blocchi “di riferimento” devono essere marcati in maniera chiara in modo tale che durante il rilievo l'operatore possa sempre vederli. La forma dei blocchi di riferimento deve essere il più simile possibile a quella della maggior parte dei blocchi rinvenuti in sito, come discusso nel paragrafo 4.4.

A questo punto, si procede al rilievo di tutti i blocchi presenti nell'area A₁. Il rilevatore classifica ciascun blocco sulla base dei blocchi di riferimento e ad alta voce indica al suo assistente in quale classe inserirlo. I valori presentati in tabella 4.2 si riferiscono al limite superiore di ciascuna classe. Dunque, a titolo di esempio, tutti i blocchi di dimensione inferiore a 8 dm³ devono essere inseriti in classe 0. I blocchi individuati di dimensioni superiori a 1,45 m³, ossia al limite superiore della classe V, devono invece essere misurati singolarmente e annotati

sul taccuino di campagna. Le stesse operazioni vengono successivamente compiute sull'area A₂.

4.7.3 Rilievo dei volumi presenti nelle aree di tipo B

Nelle aree di tipo B si rilevano invece le volumetrie superiori a 512 dm³, ovvero al limite superiore della classe IV. In generale, considerato che il numero dei blocchi di tali dimensioni sull'area B è assai limitato, risulta conveniente annotare sul taccuino di campagna le dimensioni di tutti gli elementi considerati, in maniera tale da calcolare facilmente il volume. Le classi di volume e i relativi limiti sono riportati in tabella 4.3.

tabella 4.3 - Classi di suddivisione dei volumi per le aree di tipo B

Classe	Dimensioni indicative m	Volume m³
V	1,13 x 1,13 x 1,13	1,45
VI	1,36 x 1,36 x 1,36	2,50
VII	1,71 x 1,71 x 1,71	5
VIII	2,15 x 2,15 x 2,15	10

Il rilievo viene dunque eseguito nelle aree B₁ e B₂ con le medesime modalità operative presentate in precedenza.

Infine i blocchi ciclopici di dimensione superiore a 5 m³ vengono rilevati sull'intera area S e per ognuno di essi le misure ottenute sono riportate nel taccuino di campagna.

4.7.4 Elaborazione delle misure effettuate

Dopo aver terminato il rilievo all'interno delle singole aree i risultati ottenuti devono essere riportati all'intera superficie 12 m x 12 m e successivamente da questa a tutta l'area S. La tabella 4.4, facilmente realizzabile all'interno di qualunque programma di calcolo, descrive le operazioni di omogeneizzazione da eseguire.

tabella 4.4 – Sintesi delle operazioni da eseguire per l'omogeneizzazione del rilievo su S

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Classe	A ₁	A ₂	A ₁ + A ₂	2 x (A ₁ +A ₂)	B ₁	B ₂	B ₁ + B ₂	2 x (B ₁ +B ₂)	su 12 x 12 m	su S	
0			(2)+ (3)	2 x (4)					(5)	(10) x S/144	
I			(2)+ (3)	2 x (4)					(5)	(10) x S/144	
II			(2)+ (3)	2 x (4)					(5)	(10) x S/144	
III			(2)+ (3)	2 x (4)					(5)	(10) x S/144	
IV			(2)+ (3)	2 x (4)					(5)	(10) x S/144	
V			(2)+ (3)				(6) + (7)		(4) + (8)	(10) x S/144	
VI			(2)+ (3)				(6) + (7)	2 x (8)	(4) + (9)	(10) x S/144	
VII			(2)+ (3)				(6) + (7)	2 x (8)	(4) + (9)	(10) x S/144	
VIII			(2)+ (3)				(6) + (7)	2 x (8)	(4) + (9)	(10) x S/144	

Successivamente il numero cumulato di blocchi viene espresso in termini di funzione di probabilità cumulata decrescente, compiendo le operazioni presentate in tabella 4.5. La somma di tutte le frequenze della colonna (11) precedente fornisce una stima del numero totale di volumi presenti nell'area S, mentre la cumulata decrescente viene valutata sottraendo dal numero totale dei blocchi la frequenza di ciascuna classe o blocco ciclopico. Per quanto riguarda quest'ultimi, vengono ordinati al minore al maggiore e a ognuno viene assegnata una frequenza unitaria.

tabella 4.5 – Sintesi delle operazioni da eseguire per la costruzione della CPD

(1) (2) (3) (4) (5)

Classe	Volume m³	Frequenza	Cumulata decescente	CPD decescente
0	0,008	col (11)	(sum)	(4) / (sum)
I	0,023	col (11)	(prec) - Fr ₀	(4) / (sum)
II	0,064	col (11)	(prec) - Fr _I	(4) / (sum)
III	0,181	col (11)	(prec) - Fr _{II}	(4) / (sum)
IV	0,512	col (11)	(prec) - Fr _{III}	(4) / (sum)
V	1,448	col (11)	(prec) - Fr _{IV}	(4) / (sum)
VI	2,5	col (11)	(prec) - Fr _V	(4) / (sum)
VII	5	col (11)	(prec) - Fr _{VI}	(4) / (sum)
VIII	10	col (11)	(prec) - Fr _{VII}	(4) / (sum)
Volumi ciclopici ordinati in maniera crescente	CICL 1	1	(prec) - Fr _{VIII}	(4) / (sum)
	CICL 2	1	(prec) - 1	(4) / (sum)
	...	1	(prec) - 1	(4) / (sum)
	...	1	(prec) - 1	(4) / (sum)
	...	1	(prec) - 1	(4) / (sum)
	CICL n	1	(prec) - 1	(4) / (sum)
SOMMANO		(sum)		

Inserendo all'interno di un grafico con assi logaritmici i valori delle colonne (2) in ascissa e (5) in ordinata della tabella 4.5 si ottiene la curva CPD che, in un intervallo centrale di valori tende ad assumere un andamento lineare simile a quello di una legge di potenza.

Il metodo presentato rappresenta una buona sintesi di tutto quanto esposto all'interno di questo capitolo. Infatti può essere adattato alla maggior parte delle conformazioni presentate nel paragrafo 4.2 e permette in parte di aggirare le

problematiche relative alla forma contenute in 4.4. Infatti i blocchi rappresentativi che individuano i limiti delle classi devono essere scelti in modo tale da essere il più possibile simili alla forma più ricorrente all'interno dell'area. Il volume può dunque essere calcolato sulla base del solido geometrico che si presuppone approssimi l'elemento. In seguito negli altri blocchi il problema del calcolo del volume non si pone poiché vengono assegnati alle classi sulla base di un semplice confronto.

Infine è necessario sottolineare come i valori dei limiti delle classi volumetriche siano stati scelti ipotizzando per i valori delle dimensioni ideali del blocco di riferimento gli elementi di una progressione geometrica di ragione $\sqrt{2}$ fino alla classe V, così come utilizzato per esempio nella classificazione granulometrica di Wentworth oppure per i grani di neve durante il rilievo di un deposito di valanga, come proposto in *De Biagi et al., 2012*. Le classi di volume superiori sono invece suddivise utilizzando alcuni valori limite di volumi "comodi", data l'impossibilità di utilizzare quelli derivanti dalla progressione precedente poiché troppo elevati per i volumi normalmente rilevati in campo. Infine, la classe V, che viene rilevata sia in A_1, A_2 sia in B_1, B_2 , costituisce il raccordo tra i due diversi tipi di aree e consente, allo stesso modo di quanto presentato in *Ruiz Carulla et al., 2015* ed esposto nel paragrafo 4.6, di valutare l'effettiva omogeneità della superficie S scelta.

Il metodo presentato è stato applicato per il rilievo al piede della parete rocciosa descritta nel capitolo 5, dove i risultati ottenuti sono poi stati confrontati con i diversi IBSD ottenuti in parete.

Capitolo 5

Confronto tra le curve IBSD e RBSD ottenute in situ

5.1 Introduzione

Dopo aver presentato nel capitolo 3 i principali approcci attualmente disponibili per la costruzione della curva di distribuzione dei volumi in parete e nel capitolo 4 quelli per la curva al piede è possibile passare ora alla fase operativa di questo lavoro di tesi, con l'applicazione in un sito appositamente scelto di alcune delle tecniche di costruzione dell'IBSD e dell'RBSD analizzate. La presentazione della parete rocciosa utilizzata, contenuta all'interno del paragrafo 5.2, consente di capire le motivazioni per cui è stata scelta, mentre nel successivo 5.3 vengono riportati i risultati del rilievo geologico eseguito sulla parete che permettono di definire le principali famiglie di discontinuità presenti.

Il calcolo dell'IBSD in parete avviene attraverso due delle tecniche presentate nel capitolo 3. Inizialmente nel paragrafo 5.4 vengono utilizzate alcune delle formule presentate nel paragrafo 3.2 e contenute in *Palmstrom, 2005*, sostituendo ai valori medi delle spazature delle discontinuità quelli estratti da distribuzioni statistiche con procedura Monte Carlo. In seguito nel paragrafo 5.5 viene invece applicato il modello numerico presentato nel dettaglio nel paragrafo 3.5, poiché la struttura della parete in esame risulta essere molto simile a quella ideale prevista dall'algorithm.

L'area di accumulo da rilevare si accosta facilmente a uno dei casi possibili presentati nel paragrafo 4.2 e la costruzione dell'RBSD avviene sulla base della metodologia di rilievo in campo presentata nel paragrafo 4.7, come illustrato nel paragrafo 5.6.

Infine all'interno del paragrafo 5.7 avviene il confronto tra le due curve ottenute, evidenziando le conclusioni che si possono trarre dall'analisi congiunta di entrambe.

5.2 Descrizione del sito scelto

La parete rocciosa scelta nell'ambito di questo lavoro è situata nel comune di Saint Christophe in Valle d'Aosta, nei pressi della località Plan Teppes, a una quota di 1500 m s.l.m. circa, come individuato nel dettaglio in figura 5.1.

Si tratta di un affioramento roccioso situato sulla cresta che, scendendo dal Mont Mary (2815 m s.l.m.), digrada verso Saint Christophe, separando la conca del torrente Parléaz dalla valle principale della Valle d'Aosta. L'ammasso roccioso e il deposito sottostanti emergono da boschi a prevalenza di roverella al confine con quelli di conifere tipici delle quote più elevate, che delimitano nettamente i limiti dell'area di studio.⁸

Nelle vicinanze non sono presenti insediamenti, infrastrutture o elementi antropici in generale per i quali la caduta di un blocco possa generare un rischio tangibile. Il sito non è dunque stato scelto per la sua capacità di generare un danno a un eventuale elemento a rischio o per indagare specifici eventi accaduti in passato, quanto piuttosto per poter facilmente sperimentare in situ le tecniche di determinazione dell'IBSD e RBSD ritrovate in letteratura e presentate nei capitoli 3 e 4.

La parete rocciosa presenta un fronte poco inclinato (52°), una larghezza di 30 m circa e un'altezza verticale di 10 m circa. Inoltre è percorsa da numerose cenge che permettono di raggiungere e rilevare le principali discontinuità presenti senza dover necessariamente ricorrere a tecniche alpinistiche o di rilievo in remoto.

⁸Data la natura isolata del luogo per eventuali riferimenti più precisi in merito alla localizzazione del sito si rimanda alle coordinate GPS riportate in tabella 5.7

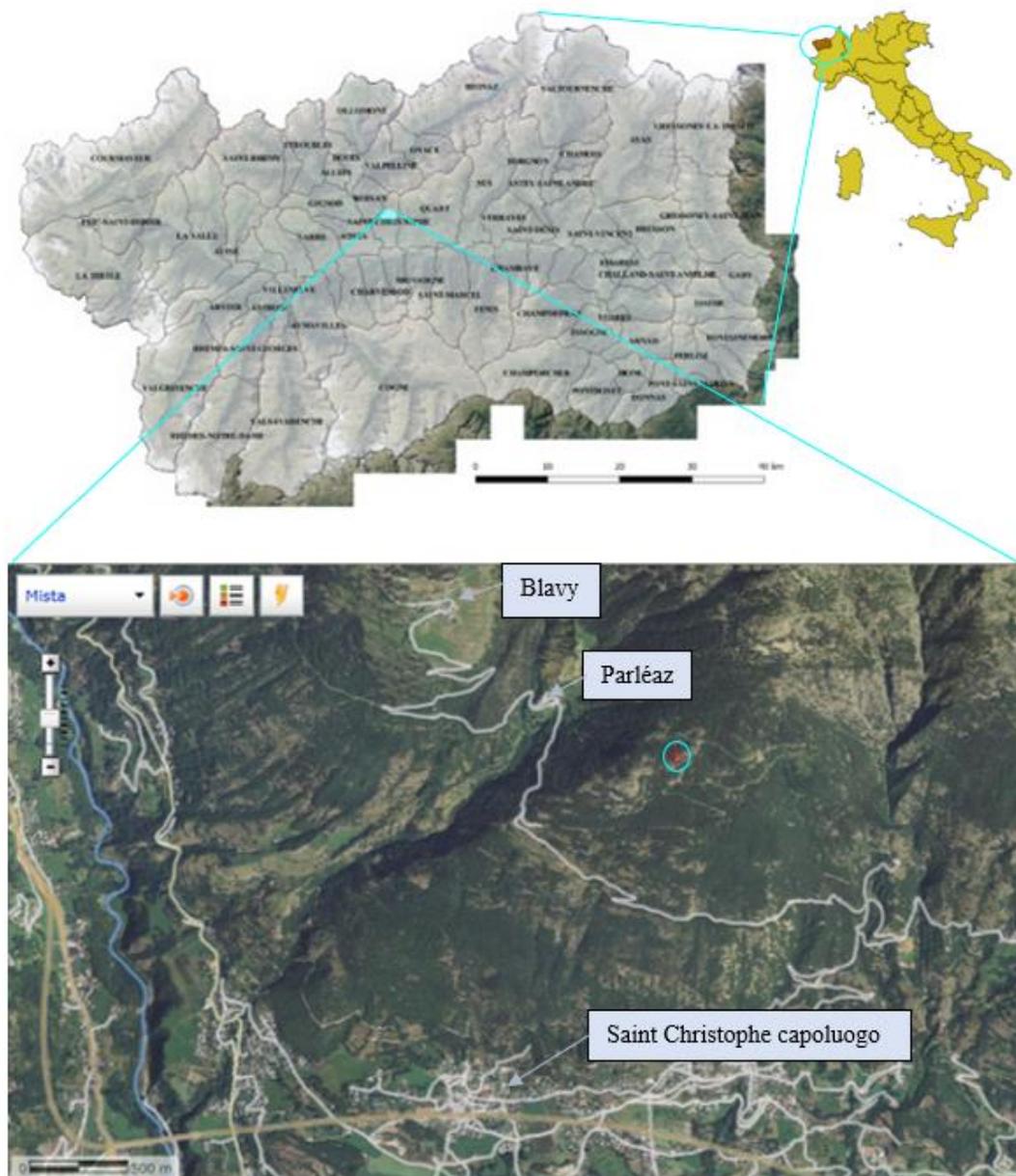


figura 5.1 – Inquadramento dell’area di studio (cerchio azzurro) all’interno della Valle d’Aosta
(fonte geo navigatore Regione autonoma Valle d’Aosta)

Ai piedi della parete rocciosa si estende una superficie continua di accumulo dei blocchi caduti di area approssimativamente trapezoidale con una superficie totale di 430 m² circa. All’interno di essa non è presente alcun tipo di vegetazione e tutta l’area risulta ben individuabile e circoscritta. In particolare, è relativamente semplice individuare, date anche le dimensioni piuttosto limitate, alcune sotto aree rappresentative dell’intero deposito, come previsto dal metodo presentato in precedenza nel paragrafo 4.7. Per questo motivo, unito alla facilità di accesso e

alla possibilità di muoversi in maniera assai semplice all'interno di essa, l'area di accumulo costituisce uno degli esempi più semplici da analizzare rientranti all'interno della categoria delle pietraie, le cui caratteristiche sono descritte nel sotto paragrafo 4.2.7.

La parete rocciosa è ben individuabile all'interno della carta geologica della Valle d'Aosta scala 1:10000, disponibile sul sito internet della Regione Autonoma Valle d'Aosta. Dalla lettura della legenda, emerge che l'ammasso roccioso in esame appartiene all'unità inferiore del lembo del Mont Mary. Nello specifico la carta geologica lo definisce come: «*Complesso polimetamorfico indifferenziato. Paragneiss e micascisti prealpini a dominante retrocessione alpina in facies scisti verdi a mica chiara, clorite, epidoto, alite porfiroblastica; locali filloniti*». Ai fini del nostro lavoro, è importante dire solamente che si tratta di una roccia metamorfica con un'elevata tendenza alla frammentazione dovuta alla sua struttura gneissica e scistosa. È evidente come l'altezza modesta della parete determina una bassa energia di caduta del blocco, che tuttavia tende a disgregarsi all'impatto con il pendio proprio per la sua natura geologica. In figura 5.2 viene riportata una visione globale della parete e del relativo deposito oggetto dello studio, mentre in figura 5.3 si evidenzia come i limiti del deposito siano ben individuabili anche dall'alto.



figura 5.2 – Visione d'insieme della parete rocciosa in esame e del relativo deposito



figura 5.3 – Veduta dall'alto del deposito ben delimitato dalla vegetazione circostante

5.3 Risultati del rilievo geologico in parete

La relativa accessibilità della parete rocciosa ha permesso di eseguire un rilievo geomeccanico tradizionale, al fine di poter individuare, caratterizzandole con le adeguate proprietà, le principali discontinuità presenti all'interno dell'ammasso roccioso. La tecnica utilizzata è quella dello stendimento, nella quale vengono rilevate tutte le discontinuità intercettate da una rotella metrica fissata alla parete, secondo quanto presentato in *ISRM, 1978*. Per ciascuna di esse vengono riportati sul taccuino di campagna i valori progressivi di distanza dallo zero, di giacitura in termini di direzione di immersione e inclinazione, di persistenza e altre caratteristiche in grado di descrivere le proprietà della discontinuità come la forma, l'eventuale riempimento, alterazione o presenza di acqua. Ai fini del nostro lavoro i parametri più importanti da rilevare sono la giacitura, la persistenza e la spaziatura; quest'ultima viene ricavata come differenza di distanze progressive dall'origine dello stendimento. Naturalmente è necessario eseguire numerosi stendimenti, diversamente orientati tra di loro, al fine di intercettare tutte le principali discontinuità presenti e ottenere un risultato affidabile. Infatti, la direzione che consente di minimizzare gli errori derivanti da questo tipo di rilievo è quella ortogonale ai piani che contengono le tracce delle discontinuità; è dunque

importante cercare di posizionare lo stendimento in modo tale da intercettare ortogonalmente il maggior numero di discontinuità possibili.

Nel caso in esame sono stati realizzati cinque stendimenti, la cui posizione sulla parete è tracciata in figura 5.4, mentre in tabella 5.1 sono contenuti i valori di orientazione e lunghezza di ognuno.



figura 5.4 – Rappresentazione schematica degli stendimenti eseguiti

tabella 5.1 – Principali proprietà degli stendimenti eseguiti

Stendimento	Colore	Giacitura Dip /Dip direction	Lunghezza m	Numero discontinuità rilevate
1	Verde	0°/123°	27	34
2	Blu	64°/220°	13	9
3	Arancione	90°/0°	1,25	5
4	Viola	0°/240°	1,10	2
5	Rosso	0°/170°	1,15	4

È evidente come gli stendimenti 1 e 2 di lunghezza maggiore contengano il numero maggiore di discontinuità, mentre gli altri tre sono stati tracciati solamente per tentare di delineare la struttura dell’ammasso nella terza dimensione, valutando la presenza di fratture in grado di svincolare a tergo i volumi rocciosi. Questo è stato possibile solamente in due punti della parete, dove emergono due “nasi” su cui sono stati tracciati gli stendimenti 3 e 4 da una parte e 5 dall’altra.

L’inserimento di tutte le giaciture raccolte all’interno del software “Dips” permette di raggruppare tutte le discontinuità in famiglie, sulla base delle aree

dello stereogramma a maggior densità di poli, fornendo poi un'orientazione rappresentativa per ognuna. I risultati ottenuti evidenziano la presenza di sette famiglie di discontinuità suddivise nei cinque stendimenti, come riportato in tabella 5.2.

tabella 5.2 – Principali famiglie di discontinuità rilevate

Stendimento	Set	Giacitura rappresentativa Dip / Dip direction	Spaziatura reale media m
1	1	76°/219°	1,3
2	2	41°/356°	0,87
2	3	40°/247°	1,91
2	4	17°/329°	1,71
3	5	37°/219°	0,37
3	6	14°/218°	0,29
4 e 5	7	52°/215°	0,32

Dall'analisi dei risultati riportati in tabella 5.2 e dall'esame della parete in situ, è evidente come alcune famiglie, pur presentando diverse direzioni di immersione nei diversi stendimenti, siano accumulate da un'inclinazione simile. In particolare, è possibile ipotizzare che i sistemi di discontinuità con inclinazione quasi orizzontale (15° circa) e quelli con inclinazione di circa 40° gradi tra gli stendimenti 2 e 3 abbiano la medesima influenza sulla determinazione dei volumi rocciosi, sulla loro eventuale instabilità e il possibile cinematismo che si instaura, svolgendo il ruolo di piano di scivolamento su cui avviene lo spostamento del blocco. Al contrario, analizzando i risultati degli stendimenti 4 e 5, è evidente come in profondità sia presente un set di discontinuità con la medesima giacitura del fronte della parete che svolge la funzione di svincolo a monte del blocco. Infine, la famiglia di discontinuità più rappresentata è quella rilevata nello stendimento 1 che, con un'inclinazione sub-verticale (76°) e una direzione di immersione approssimativamente perpendicolare a quella del fronte, è in grado di isolare lateralmente i blocchi. Le principali proprietà delle famiglie riunite appena presentate sono riassunte in tabella 5.3.

tabella 5.3 – Principali proprietà delle famiglie di discontinuità raggruppate

Set	Giacitura media Dip / Dip direction	Spaziatura reale media m	Persistenza media m
A1	40/274	1,05	0,55
A2	15/274	1,00	1,33
B	52/215	0,32	2,68
C	76/291	1,30	2,98
Fronte	52/215	-	-

Le famiglie di discontinuità raggruppate sono state successivamente rappresentate su stereogramma con l'impiego del software *Stereonet*, al fine di verificare con l'impiego del test di Markland, i cinematismi e le eventuali instabilità derivanti dall'intersezione dei piani rappresentati le famiglie. In figura 5.5 è rappresentato lo stereogramma ottenuto. Su di essa sono rappresentati i set A1, A2, C rispettivamente in verde, in azzurro e in rosa, mentre il sistema B risulta essere lo stesso del fronte e di colore blu scuro. Inoltre è tracciato in marrone il cerchio rappresentate l'angolo di attrito residuo, ipotizzato in assenza di misurazioni specifiche in sito, pari a un valore generico di 30° , mentre le due linee nere tratteggiate rappresentano l'intervallo di deviazione di $\pm 20^\circ$ dalla direzione di immersione del fronte.

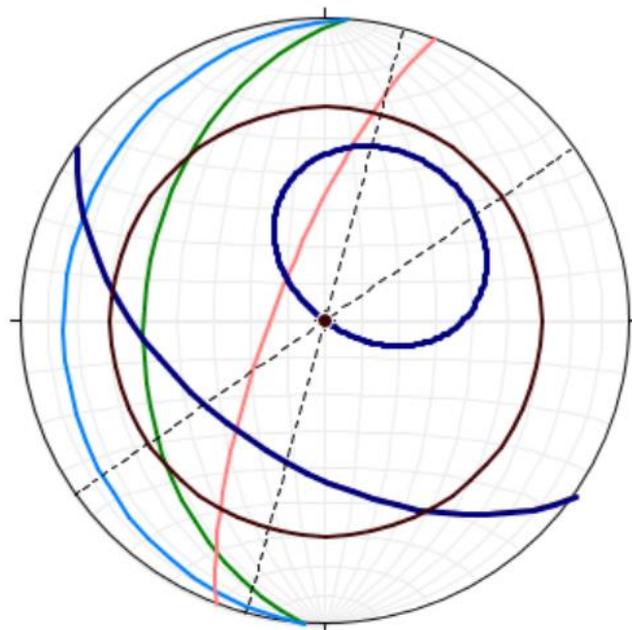


figura 5.5 – Analisi di stabilità eseguita con l'impiego del software Stereonet

Dall'analisi dello stereogramma di figura 5.5, è evidente come l'unico cinematismo da considerare sia legato allo scivolamento planare sul set A1 rappresentato in azzurro, pur registrando una differenza considerevole con l'immersione del fronte. Infatti questo risulta essere l'unico piano con angolo di inclinazione superiore all'angolo di attrito e contemporaneamente minore di quello del fronte, anche per l'assenza di piani a immersione sostanzialmente differente in grado di sviluppare fenomeni di ribaltamento o di cunei tridimensionali. Inoltre, pur avendo solamente ipotizzato il valore dell'angolo di attrito dei piani, la misura del quale richiederebbe l'impiego dello sclerometro di Schmidt o un tilt test in laboratorio, non è sensato considerare, anche nel caso peggiore, come critico il sistema A2 che presenta un'inclinazione media di soli 15° .

In conclusione, lo schema di discontinuità ipotizzato prevede la presenza di tre famiglie di discontinuità in grado di isolare volumi potenzialmente in grado di distaccarsi dalla parete, come riassunto nello schema presentato in figura 5.6, dove la famiglia A1 svolge il ruolo di piano di scivolamento, B da svincolo a monte, mentre C consente lo svincolamento laterale nel piano perpendicolare alla sezione rappresentata nello schema.

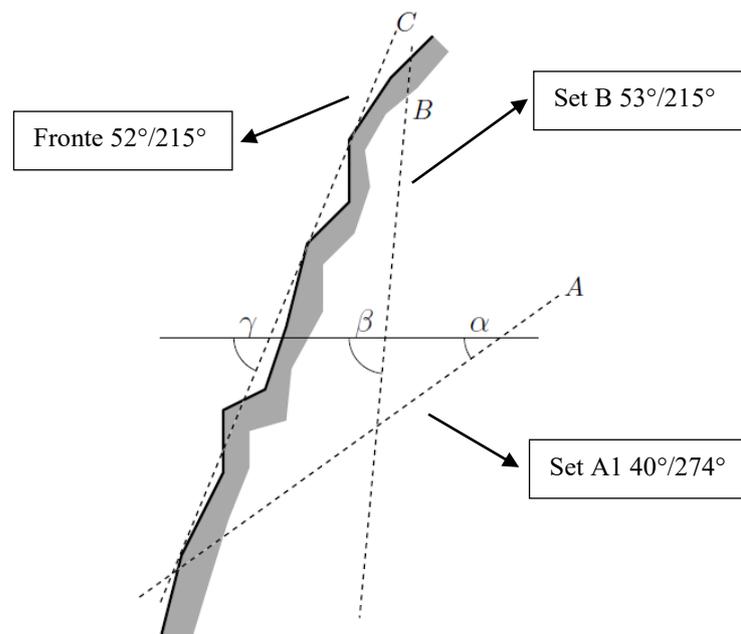


figura 5.6 – Schema riassuntivo considerato (fonte tesi di laurea Philippot F.)

5.4 Costruzione dell'IBSD dalle spaziature con procedura Montecarlo

A partire dai risultati del rilievo condotto in parete è possibile determinare una prima stima dei volumi presenti con l'impiego di alcune delle formule esposte in *Palmstrom, 2005* e illustrate nel dettaglio nel paragrafo 3.2. In particolare, nel caso in esame basato sui tre sistemi di discontinuità A1, B e C è possibile utilizzare l'espressione (3.2) che utilizza i valori medi di spaziatura di ogni famiglia di discontinuità individuate e gli angoli tra di esse.

Applicando la (3.2) si ottiene

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 \cdot \sin \gamma_3} = \frac{1,05 \cdot 0,32 \cdot 1,3}{\sin(53 + 40) \cdot \sin(76 + 53) \cdot \sin(76 + 40)} = 0,63 \text{ m}^3 \quad (5.1)$$

mentre trascurando l'influenza degli angoli tra le famiglie di discontinuità, ipotizzando cioè che gli angoli tra di esse siano tutti pari a 90° , si ottiene

$$V_b = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 1,05 \cdot 0,32 \cdot 1,3 = 0,44 \text{ m}^3 \quad (5.2)$$

L'espressione (5.1) e la sua semplificazione (5.2) sono applicabili nel momento in cui il volume in parete sia facilmente individuabile e i limiti ben definibili. Nella maggior parte delle situazioni invece questo non avviene in maniera così netta, per l'oggettiva difficoltà a rilevare lungo la dimensione della profondità della parete, oltre alla presenza di discontinuità irregolari non assimilabili ad alcuna famiglia. Perciò, come già dettagliato nel paragrafo 3.2, si introduce il concetto del blocco equivalente, il cui volume si ottiene, secondo *Palmstrom, 2005*, a partire dal Volumetric Joint Count J_v introducendo un fattore di forma β . Il volume calcolato nuovamente a partire dai valori medi di spaziatura è uguale a

$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} = 44,55 \cdot 4,86^{-3} = 0,39 \text{ m}^3 \quad (5.3)$$

dove

$$\beta = 20 + 7 \cdot \left(\frac{S_{max}}{S_{min}} \right) \cdot \left(\frac{3}{n_j} \right) = 20 + 7 \cdot \left(\frac{1,30}{0,32} \right) \cdot \left(\frac{3}{3,5} \right) = 44,55 \quad (5.4)$$

$$J_v = \frac{1}{S_{A1}} + \frac{1}{S_B} + \frac{1}{S_C} = \frac{1}{1,05} + \frac{1}{1,30} + \frac{1}{0,32} = 4,86 \text{ joint/m} \quad (5.5)$$

I valori calcolati con le espressioni (5.1), (5.2) e (5.3) rappresentano un volume che secondo *Palmstrom, 2005* può essere considerato rappresentativo della parete rocciosa, anche se non risulta essere il volume massimo possibile né è correlabile a un particolare elemento rilevato al piede della parete.

D'altra parte i valori medi fin qui utilizzati di spaziatura risentono di una serie di errori di misurazione, sia sistematici che casuali, che solo in parte possono essere adeguatamente controllati con l'impiego di tecniche statistiche di trattamento dei campioni di misure. Infatti l'utilizzo della tecnica dello stendimento può generare errori di inaccuratezza, dovuti alla non sufficiente lunghezza dello stesso per il calcolo di tutte le spaziature, e di imprecisione, in presenza di campioni poco numerosi che generano un'incertezza del valore medio del campione. A questo proposito, in tutti gli stendimenti realizzati nel caso in esame tranne il primo, la bassa numerosità del campione di misura non soddisfa sicuramente il teorema del limite centrale, secondo il quale un campione numeroso tende a seguire una distribuzione normale. Il valore medio delle spaziature non è dunque sicuramente uguale alla media campionaria calcolata. Infine durante il rilievo delle discontinuità presenti è importante tenere conto e tentare di correggere il cosiddetto errore di Terzaghi, dovuto alla deviazione della direzione dello stendimento dalla perpendicolare alla traccia della discontinuità. Il valore di spaziatura calcolato come differenza tra due distanze progressive, chiamato spaziatura apparente, viene corretto con l'impiego dell'espressione

$$S_{reale} = S_{apparente} \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{cos} \beta \quad (5.6)$$

dove α è uguale all'angolo tra la direzione del fronte e la traccia delle discontinuità e β tra la direzione dello stendimento e la traccia perpendicolare alle direzioni delle discontinuità.

Alla luce di tutte le considerazioni esposte e nell'impossibilità di ottenere un risultato statisticamente robusto data il numero davvero limitato di campioni in alcuni stendimenti, le espressioni (5.1), (5.2) e (5.3) utilizzate sono elaborate, con l'impiego del software Matlab, estraendo i valori di spaziatura reale in ingresso alle formule del calcolo del volume da specifiche distribuzioni di probabilità con procedura Monte Carlo. Inizialmente la distribuzione dei valori delle spaziature

delle tre famiglie di discontinuità viene ipotizzata come uniforme, associando dunque la stessa probabilità di estrazione a tutti i valori compresi nell'intervallo delimitato dai valori minimo X_{min} e massimo X_{max} .

Il comando *rand* di Matlab genera per ognuna delle 1000 simulazioni eseguite un valore casuale compreso tra 0 e 1 che permette di calcolare il quantile della distribuzione, noti i valori limite dell'intervallo, con l'espressione

$$x(F) = X_{min} + (X_{max} - X_{min}) \cdot F \quad (5.7)$$

dove F rappresenta il valore compreso tra 0 e 1 generato casualmente.

Il volume del blocco è calcolato poi per ogni simulazione con le tre espressioni (5.1), (5.2) e (5.3), inserendo in un vettore dei volumi il risultato del calcolo di ogni simulazione, ottenendo al termine dell'intero ciclo la distribuzione dei volumi.

Infine, per ognuna delle formule (5.1), (5.2) e (5.3), viene calcolato il valore massimo possibile, inteso come il volume ottenuto dai valori massimi di spaziatura riscontrati per ognuna delle tre famiglie di discontinuità, che isolano quindi il più grande volume possibile all'interno della parete. I risultati ottenuti dall'impiego della distribuzione uniforme sono riportati in tabella 5.4.

tabella 5.4 – Risultati ottenuti con 1000 simulazioni e l'impiego di una distribuzione uniforme

	Volume minimo generato m³	Volume massimo generato m³	Volume massimo possibile m³
$V=s_1*s_2*s_3$	0,0218	6,8061	7,5421
$V= (s_1*s_2*s_3) / (\sin\gamma_1*\sin\gamma_2*\sin\gamma_3)$	0,0434	9,7705	10,8125
$V=\beta*J_V^{-3}$	0,0355	5,9638	6,9882

L'ipotesi che tutti i valori di spaziatura presentino la stessa probabilità di accadimento, com'è facilmente intuibile, costituisce una semplificazione piuttosto marcata del problema; in generale si evidenzia infatti la tendenza a una netta predominanza dei valori più piccoli, a cui deve necessariamente essere associata una probabilità di estrazione maggiore. La distribuzione più ricorrente in letteratura, come anticipato nei paragrafi 3.4 e 3.5, è quella esponenziale, definibile a partire da un valore medio di spaziatura, corrispondente al parametro λ , e troncata poi con l'impiego delle espressioni (3.12) e (3.13) da due valori X_{min}

e X_{max} che rappresentano il valore minimo e massimo rilevato per ogni famiglia di discontinuità. L'impiego di questa distribuzione alla medesima procedura di tipo Monte Carlo e delle formule (5.1), (5.2) e (5.3) porta ai risultati esposti in tabella 5.5.

tabella 5.5 - Risultati ottenuti con 1000 simulazioni e l'impiego di una distribuzione esponenziale

	Volume minimo generato m³	Volume massimo generato m³	Volume massimo possibile m³
$V=s_1*s_2*s_3$	0,0231	3,9391	7,5421
$V= (s_1*s_2*s_3) / (sin\gamma_1 *sin\gamma_2* sin\gamma_3)$	0,0234	7,2037	10,8125
$V=\beta*Jv^{-3}$	0,0142	4,5757	6,9882

Dal confronto tra i dati di tabella 5.4 e di tabella 5.5, è evidente come la distribuzione uniforme, prevedendo una funzione di densità di probabilità costante, tenda a produrre volumi molto più elevati; inoltre tra tutte le espressioni utilizzate, quella basata sulla (5.1) restituisce sempre i valori maggiori. Infine è importante sottolineare come in tutti i calcoli presentati all'interno di questo paragrafo le discontinuità sono sempre considerate come infinitamente persistenti, trascurando quindi completamente quelli che sono i valori di persistenza rilevati in campo.

5.5 Costruzione dell'IBSD con l'impiego di un modello numerico

I risultati del rilievo in situ eseguito, presentati nel paragrafo 5.3 e sintetizzati in figura 5.6, evidenziano come la struttura dell'ammasso roccioso in termini di volumi generati dalle discontinuità sia molto simile a quella ideale simulata dal modello presentato nel dettaglio nel paragrafo 3.5. Questo fatto permette di poter agevolmente utilizzare anche questo tipo di metodologia per la costruzione dell'IBSD. Come già anticipato, l'algoritmo ipotizza non solo i valori di spaziatura come nel paragrafo 5.4, ma anche quelli di persistenza come estratti da distribuzioni esponenziali troncate, i cui parametri sono determinabili a partire dai valori minimi, medi e massimi delle due grandezze con le espressioni (3.12) e (3.13) già presentate. I valori dei parametri in ingresso al modello utilizzati sono riportati in tabella 5.6.

tabella 5.6 – Parametri di ingresso al modello utilizzati (1000 simulazioni eseguite)

Set	Inclinazione °	Spaziatura m			Persistenza m		
		Minima	Media	Massima	Minima	Media	Massima
A1	40	0,37	1,05	1,91	0,3	0,55	0,8
B	53	0,1	0,32	0,675	0,8	2,68	9,7
Fronte	52	1,3 (Set C laterale)			-		

Al termine dell'elaborazione, l'algoritmo restituisce un vettore di tutti i volumi calcolati durante le 1000 simulazioni eseguite. Il numero totale di blocchi generati è pari a 127124 e il volume massimo calcolato è pari a 3,53 m³. Questi valori sono poi suddivisi, tramite la funzione *histcounts* di Matlab, in classi di volume definite sulla base di una progressione geometrica di ragione $\sqrt{2}$, come avviene per il rilievo al piede, per un miglior confronto successivo tra le due curve. La distribuzione dei volumi generata dal modello è riportata in figura 5.7, approssimabile da una funzione esponenziale di cui viene riportata l'equazione calcolata in Excel.

Dal confronto con i risultati ottenuti nel paragrafo 5.4 è evidente come la modellazione appena presentata, tenendo in debita considerazione il ruolo della persistenza, individui un numero maggiore di volumi di dimensioni minori. Infatti la presenza di discontinuità solo in parte persistenti consente di isolare porzioni molto minori dell'ammasso, difficili da ricercare e modellare con l'approccio del paragrafo 5.4, ma sicuramente molto più numerose e frequenti di quelle di dimensione maggiore e dunque assolutamente da tenere in conto.

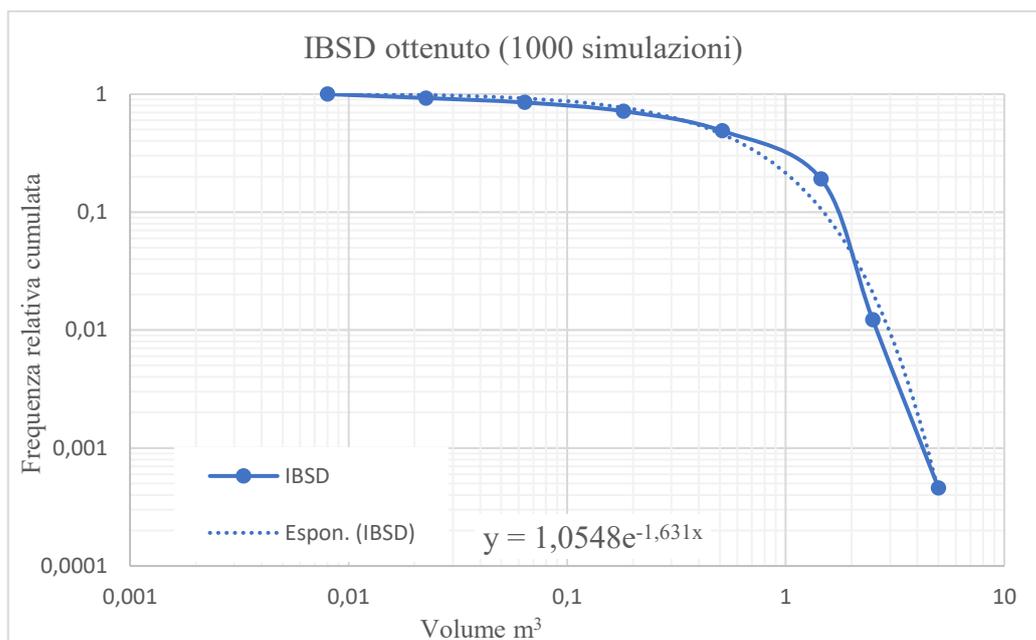


figura 5.7– Curva IBSD ottenuta dall’utilizzo del modello numerico

5.6 Costruzione dell’RBSD al piede della parete

La costruzione della curva di distribuzione dei volumi presenti all’interno dell’area di accumulo avviene come già anticipato con il metodo presentato in dettaglio nel paragrafo 4.7. La limitata estensione del deposito permette di considerare la superficie S, area rappresentativa in cui sono presenti tutti i volumi da rilevare, come coincidente con l’intera superficie al piede della parete. Le quattro aree di campionamento illustrate in figura 4.12 sono state tracciate e delimitate sul deposito, come visibile in figura 5.8, nella quale i vertici del quadrato esterno sono indicati da punti rossi mentre quelli interni da punti blu. Le coordinate GPS dei vertici del quadrato di lato 12 m disegnati in rosso sono riportate in tabella 5.7 e costituiscono indicativamente anche un punto di riferimento per l’inquadramento generale del sito scelto.

tabella 5.7 – Coordinate GPS dei vertici dell’area di campionamento

Punto	Coordinate GPS WGS84
1	N 45° 46’ 10.7’’ E 7° 21’ 19.7’’
2	N 45° 46’ 10.5’’ E 7° 21’ 19.8’’
3	N 45° 46’ 10.1’’ E 7° 21’ 19.8’’
4	N 45° 46’ 10.3’’ E 7° 21’ 19.5’’

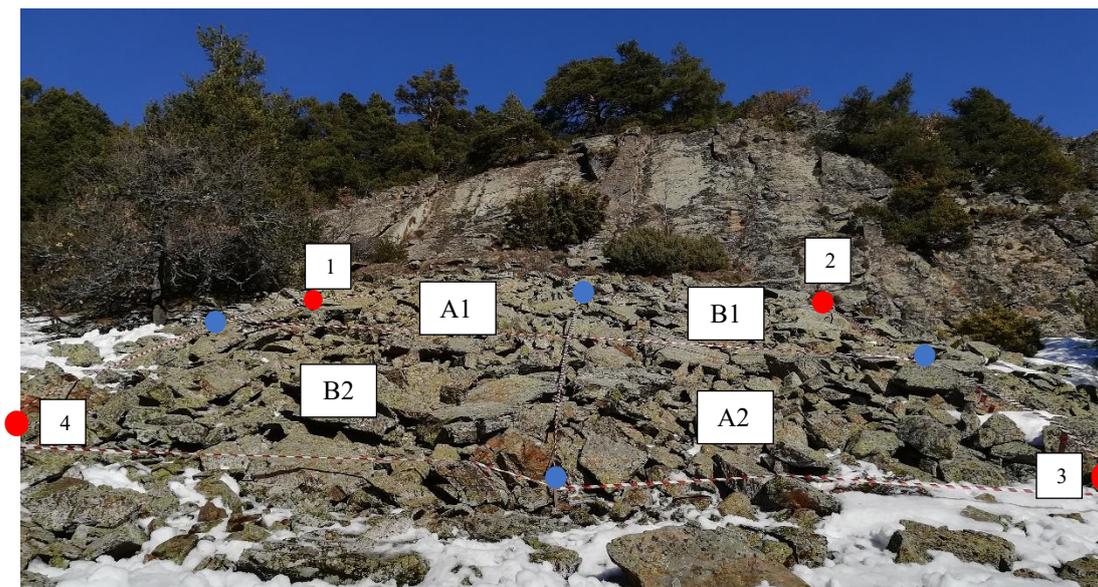


figura 5.8 – Rappresentazione delle aree di campionamento tracciate con i relativi vertici

All'interno delle aree A1 e A2 indicate in figura 5.8 sono stati rilevati i blocchi di volume massimo compreso all'interno della classe V, secondo la suddivisione riportata in tabella 4.2, mentre nelle aree B1 e B2 quelli delle classi uguali o superiori alla V.

Prima di iniziare il rilievo vero e proprio sono stati individuati i blocchi di riferimento il volume dei quali corrisponde al limite superiore della classe in esame, da cui per confronto visivo è possibile classificare i restanti elementi. In figura 5.9, figura 5.10 e figura 5.11 sono riportati i blocchi di riferimento scelti per le classi 0 e I, II, III rispettivamente.



figura 5.9 – Blocchi di riferimento per la classe 0 ($0,008 \text{ m}^3$) e per la classe I ($0,023 \text{ m}^3$). La lunghezza riportata sul metro è di 1 m



figura 5.10 – Blocco di riferimento per la classe II ($0,064 \text{ m}^3$). La lunghezza riportata dal metro è di 0,5 m



figura 5.11 – Blocco di riferimento della classe III (0,181 m³). La lunghezza riportata dal metro è di 0,5 m

Per le restanti classi, il numero esiguo di blocchi presenti ha suggerito di misurarli singolarmente senza confronto visivo con uno di riferimento. In generale, la classificazione è avvenuta confrontando ogni singolo volume di dimensione maggiore a 0,0005 m³ (i frammenti di dimensione minore sono stati volutamente trascurati) con i blocchi di riferimento per l'assegnazione. In caso di dubbi il blocco in esame è stato misurato con l'impiego di un metro a nastro e il volume ottenuto come prodotto delle tre dimensioni massime, come mostrato in figura 5.12.



figura 5.12 – Esempio di misurazione di una dimensione di un blocco in esame

Dal blocco misurato in figura 5.12 e anche da quelli di riferimento presentati in precedenza, si evidenzia come la forma prevalente sia assimilabile alla categoria delle forme piatte e a disco della tabella 4.1. Dunque una dimensione delle tre misurate risulta essere molto minore delle altre due, che invece sono grosso modo confrontabili e il volume può essere facilmente ottenuto come prodotto delle tre dimensioni con errori accettabili.

Il numero di blocchi ottenuto per ogni classe al termine del rilievo e l'estensione attraverso il processo di omogeneizzazione descritto in tabella 4.4, è riportato in tabella 5.8.

tabella 5.8 – Numero di blocchi rilevati per classe su ogni area e su S

Classe	A1	A2	B1	B2	su 12x12 m	su S
0	225	221			892	2667
I	105	114			438	1309
II	20	47			134	401
III	4	5			18	54
IV	6	8			28	84
V	2	1	1	1	5	15
VI	0	0	1	1	4	12
VII	0	0	0	0	0	0
VIII	0	0	0	0	0	0

Durante il rilievo sono stati classificati manualmente 758 blocchi che, estesi sull'area S, corrispondono a un numero totale ipotizzato di blocchi pari a 4541. Il volume massimo rilevato è presente all'interno dell'area B2 con un volume stimato pari a 2,1 m³ e risulta perciò appartenere alla classe VI.

È interessante notare come il numero di blocchi rilevati all'interno delle aree A1 e A2, in particolare per quanto riguarda le classi più piccole, sia sorprendentemente simile. Si tratta di un'evidenza della bontà della scelta delle aree di campionamento e soprattutto dell'invarianza di scala tipica di un processo frattale.

Infine, a partire dai dati raccolti, è possibile costruire la curva di frequenza relativa decrescente con le operazioni presentate in tabella 4.5. I risultati numerici

sono riportati in tabella 5.9, mentre in figura 5.13 viene riportata la curva tracciata in scala logaritmica.

tabella 5.9 – Risultati ottenuti per la costruzione della CPD decrescente

Classe	Volume m ³	Frequenza	Cumulata decrescente	CPD decrescente
0	0,008	2667	4541	1
I	0,023	1309	1874	0,4128
II	0,064	401	565	0,1244
III	0,181	54	164	0,0362
IV	0,512	84	111	0,0244
V	1,448	15	27	0,0059
VI	2,5	12	12	0,0026
VII	5	0	0	0
VIII	10	0	0	0
SOMMA		4541		

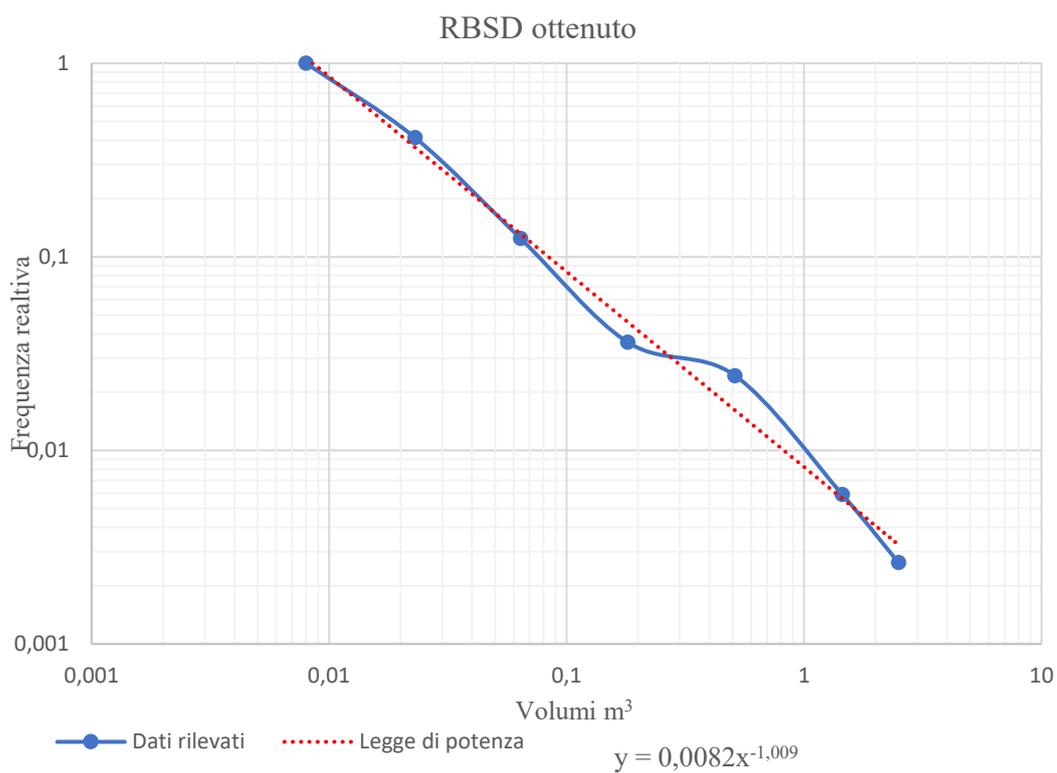


figura 5.13 - Curva RBSD ottenuta in situ

Dall'analisi del grafico riportato in figura 5.13, si nota come la curva tracciata sia molto ben approssimata da una legge di potenza con esponente b uguale a 1,009. Questo valore risulta essere in linea con quelli discussi nel paragrafo 4.5 e costituisce la dimensione frattale del problema.

5.7 Confronto tra le curve ottenute

Le curve ottenute al termine delle elaborazioni descritte nei paragrafi precedenti costituiscono la distribuzione dei volumi in parete (IBSD) e quella dei blocchi presenti al piede (RBSD). A questo punto è finalmente possibile confrontare i risultati ottenuti per capire se e con quali tecniche di rilievo è possibile ritrovare un legame tra le due.

Come primo caso vengono rappresentate in figura 5.14 le due curve ottenute con l'espressione (5.2) sia ipotizzando una distribuzione uniforme delle spaziature che esponenziale, indicato come caso 1 nel grafico. In seguito le due curve costruite utilizzando la formula (5.1) in figura 5.15 (caso 2) e quelle basate sull'espressione (5.3) in figura 5.16 con il caso 3. Infine, il confronto avviene tra l'IBSD calcolato dal modello numerico del paragrafo 5.5 e l'RBSD del 5.6 in figura 5.17.

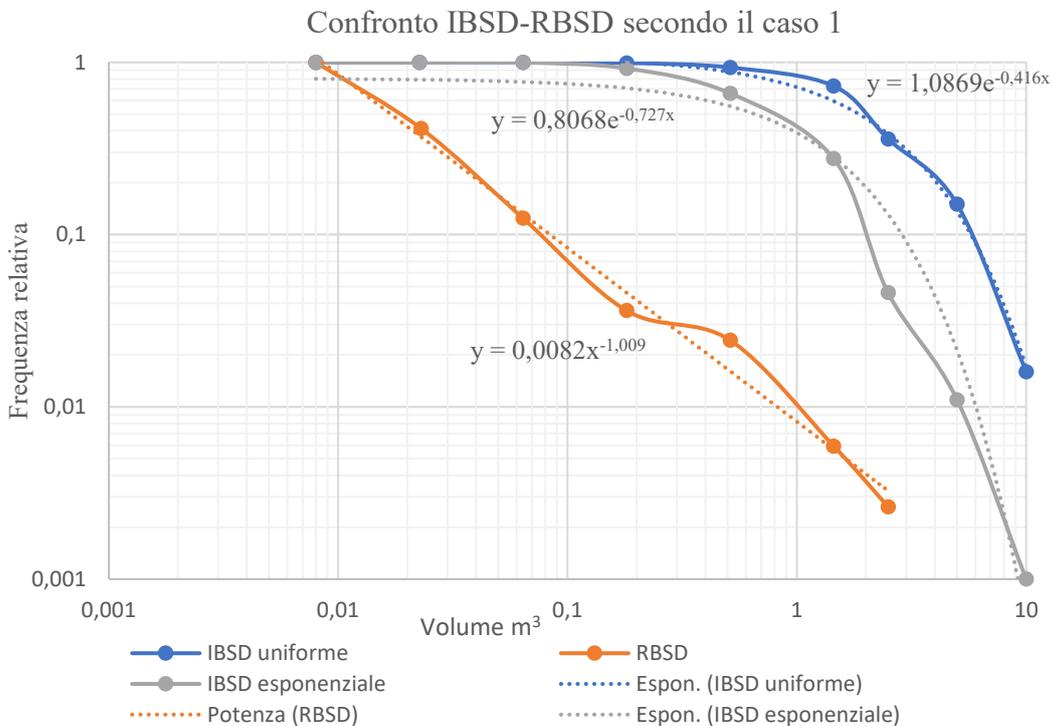


figura 5.14 – Confronto tra le curve calcolate con l'espressione (5.2) e la curva RBSD

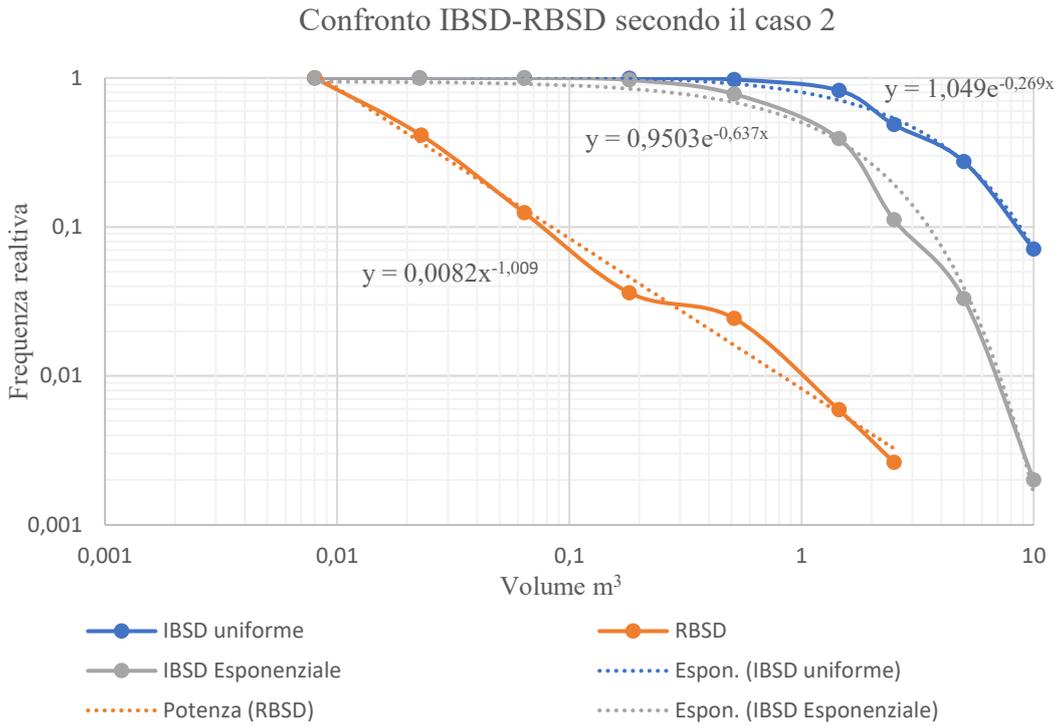


figura 5.15 - Confronto tra le curve calcolate con l'espressione (5.1) e la curva RBSD

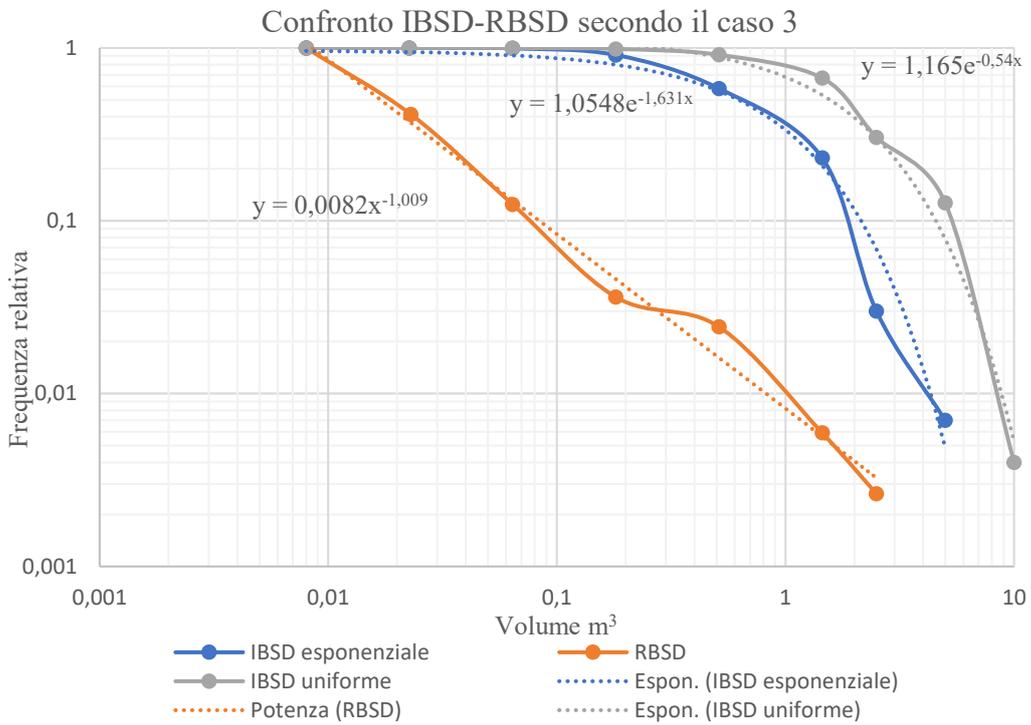


figura 5.16 - Confronto tra le curve calcolate con l'espressione (5.3) e la curva RBSD

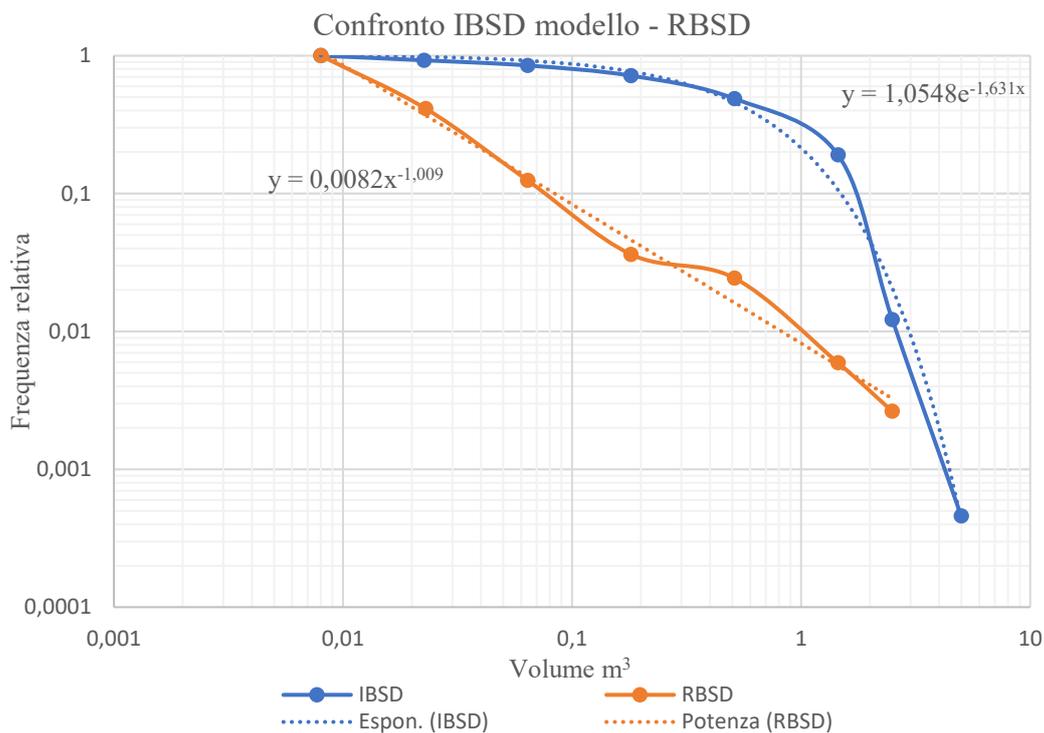


figura 5.17 - Confronto tra la curva calcolata con il modello numerico e la curva RBSD

In tutti i casi presentati si evidenzia, nel confronto tra l'IBSD e l'RBSD, una diminuzione di frequenza nelle classi più elevate e un aumento del numero dei frammenti rientranti nelle classi a volumetria minore. Questo è evidentemente un indicatore di un fenomeno di frammentazione che prevede la disgregazione dei volumi presenti, con la generazione di nuovi elementi come descritto nel dettaglio nel capitolo 6.

Dall'analisi delle figura 5.14, figura 5.15, figura 5.16, figura 5.17, emergono profonde differenze tra le curve generate a partire dal modello numerico e dalle formule proposte in *Palmstrom, 2005*. Infatti nel secondo caso l'ipotesi di persistenza infinita comporta la formazione di un numero molto più elevato di volumi medio-grandi e limita fortemente invece quelli più piccoli, associati però a una frequenza più elevata. Inoltre è evidente la differenza tra la modellazione delle spazature con la distribuzione uniforme e quella esponenziale; nel secondo caso infatti la diminuzione della funzione di densità di probabilità per i valori più elevati permette di limitare maggiormente la formazione di volumi maggiori di 1 m³.

In ogni caso il volume massimo ipotizzato dai diversi IBSD risulta essere sempre superiore al massimo valore rilevato al piede, indice di come il processo di frammentazione avvenga a qualunque scala.

In conclusione, la miglior modellazione dell'IBSD del sito in esame è data dal modello numerico presentato nel paragrafo 3.5, che permette di tenere conto e di modellare secondo un'adeguata distribuzione di probabilità non solo i valori di spaziatura, ma anche quelli di persistenza, proprietà che evidentemente influenza notevolmente la generazione di volumi distaccabili in parete.

Capitolo 6

Elaborazione del modello di frammentazione

6.1 Introduzione

Durante un evento di caduta massi si instaura generalmente un processo di frammentazione, inteso genericamente come la separazione dei volumi in parti più piccole a seguito di impatti con il pendio. L'azione di disgregazione provoca la generazione di nuovi blocchi di dimensioni minori di quelli di partenza, che, a differenza di fenomeni più complessi come le *rock avalanches*, si muovono poi lungo il pendio sostanzialmente come corpi rigidi con traiettorie indipendenti tra di loro.

Senza voler entrare nello studio dei complessi meccanismi che determinano il fenomeno di frammentazione⁹, *Ruiz Carulla et al., 2017* hanno presentato uno schema generale che definisce i possibili scenari durante un evento di caduta massi. Il distacco da una parete può avvenire sotto forma di un singolo blocco o, più frequentemente, di una massa rocciosa costituita da blocchi di diverse dimensioni e forme determinati dall'intersezione delle discontinuità presenti e descritti dall'IBSD.

Nel momento in cui avviene un impatto, sul pendio o in punti intermedi della parete, il singolo blocco, a seconda delle caratteristiche cinematiche del moto, del materiale costituente il masso e del pendio sul quale avviene l'impatto, può rompersi generando frammenti di dimensioni minori. Il comportamento invece della massa rocciosa in movimento è più complesso. Infatti se, al momento

⁹ Per un'analisi dettagliata degli studi presenti in letteratura sul processo di frammentazione si rimanda a *Ruiz Carulla et al., 2017* e ai riferimenti contenuti in esso

dell'impatto, l'energia non risulta essere particolarmente elevata, la massa rocciosa si disaggrega, cioè la suddivisione in blocchi più piccoli avviene lungo le discontinuità già presenti e dunque l'RBSD finale è sostanzialmente uguale all'IBSD iniziale. Al contrario, se l'energia è elevata, è possibile che avvenga la rottura dei blocchi con la creazione di nuove discontinuità e dunque la generazione di nuovi elementi. In questo caso, la distribuzione RBSD finale risulta sostanzialmente differente dall'IBSD iniziale. Lo schema riportato in figura 6.1 riassume tutti i casi presentati.

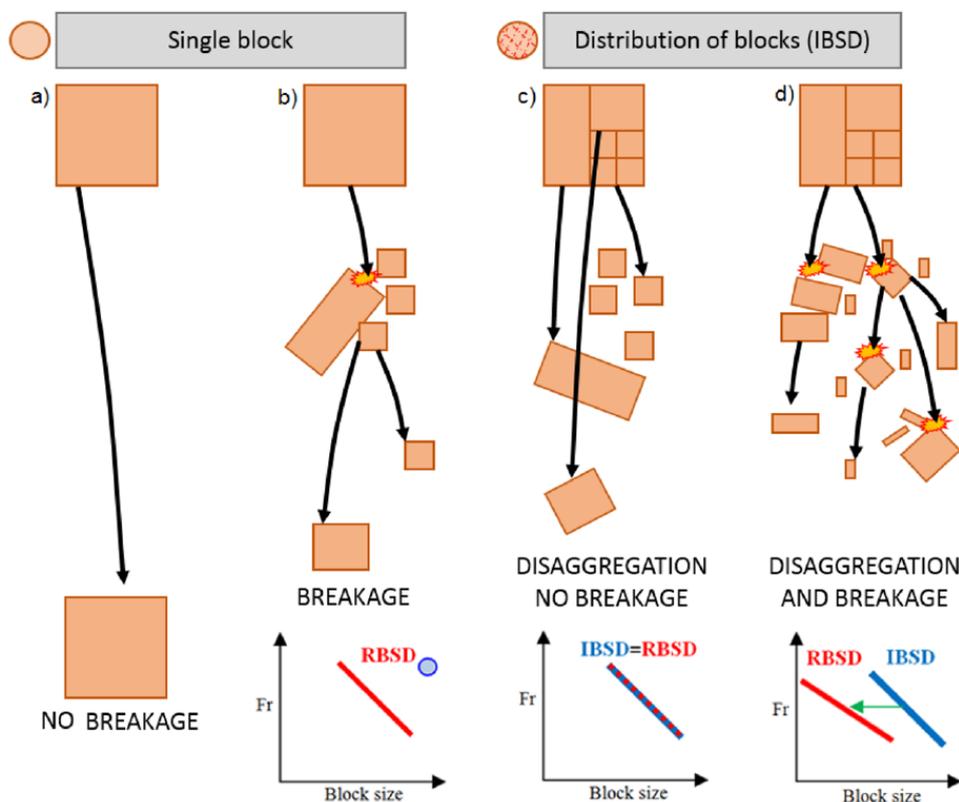


figura 6.1 – Rappresentazione schematica dei casi possibili durante il processo di frammentazione (fonte Ruiz Carulla et al., 2017)

Il confronto tra le curve IBSD e RBSD costruite consente di determinare il meccanismo prevalente (disaggregazione, rottura, ...) che si instaura durante il fenomeno di caduta massi. Tuttavia in letteratura, come evidenziato in Ruiz Carulla et al., 2017, sono presenti pochi esempi di modellazione del processo di frammentazione, che a partire dalla distribuzione IBSD dei blocchi in parete sia in grado di ricostruire in maniera efficace l'RBSD rilevato al piede.

La misura e la caratterizzazione dei blocchi risultanti da processi di frammentazione hanno evidenziato, fin dagli studi di *Turcotte, 1997*, come le dimensioni dei frammenti seguano una legge di potenza e di conseguenza essere riconducibili a un processo di tipo frattale, come evidenziato nel paragrafo 4.5 e dai risultati in situ del capitolo 5.

L'introduzione della geometria frattale permette di considerare il processo di frammentazione e gli elementi risultanti da esso come indipendenti dalla scala (*scale invariant process*). Questa è infatti una delle proprietà fondamentali di un processo frattale e come sottolineato da *Crosta et al., 2007* «[...] Il numero relativo di elementi di dimensione grande o piccola è costante alle diverse scale». Il valore della dimensione frattale, calcolato a partire dall'esponente della legge di potenza come descritto nel paragrafo 4.5, influenza notevolmente il processo di frammentazione e il risultato finale. Infatti come descritto nuovamente da *Crosta et al., 2007* «Più elevato è il valore di D , più sarà classificata la distribuzione delle dimensioni delle particelle e maggiore il numero delle particelle fini e viceversa». Le proprietà della geometria frattale sono dunque alla base del modello di frammentazione illustrato nel paragrafo 6.2 e applicato al sito in esame nel paragrafo 6.3.

6.2 Struttura del modello utilizzato

Il modello RFFM (Rokfall Fractal Fragmentation Model) utilizzato per generare l'RBSD a partire dall'IBSD ricostruito è basato sul lavoro di *Perfect, 1997* e modificato da quello di *Ruiz Carulla et al., 2017*. Si tratta di un modello frattale a tre parametri con cui è possibile modellare tutti gli scenari descritti nello schema di figura 6.1 utilizzando un numero voluto di livelli, all'interno dei quali il processo di frammentazione non varia con la scala. Dunque, in presenza di scenari complessi con diversi impatti dei blocchi è possibile usare i risultati di una prima frammentazione come input per la successiva, variando i parametri che la controllano.

Il modello iniziale di *Perfect, 1997* illustra la frammentazione di un blocco cubico in elementi di dimensioni minori seguendo una legge di potenza. Il numero totale dei frammenti presenti all' i -esimo livello è dato da

$$N(1/b^i) = k \cdot [1/b^i]^{-D} \quad i = 0, 1, 2, \dots \infty \quad (6.1)$$

dove k è il numero di elementi di partenza (iniziatori), b un fattore > 1 che definisce le proporzioni geometriche tra l'elemento originale e quello generato, mentre D è la dimensione frattale del problema. Il numero di elementi che si generano all' i -esimo livello è controllato dalla probabilità di rottura $P(1/b^i)$ definita come

$$P(1/b^i) = n_i \cdot \frac{[N(1/b^j)/N(1/b^{i+1})]}{[N(1/b^j)/N(1/b^i)]} \quad j = i + 1 \quad (6.2)$$

dove n_i è il numero di elementi generati all' i -esimo livello.

Considerando un elemento di forma cubica come nel nostro caso l'espressione (6.2) si semplifica in

$$P(1/b^i) = n_i/b^3 \quad (6.3)$$

Il parametro $P(1/b^i)$ definisce dunque la proporzione, tra tutti i blocchi possibili, di quelli che effettivamente si formano. Se, come nel caso in esame, la probabilità di rottura non dipende dalla scala, cioè $P(1/b^i) = P(1/b^{i+1})$, allora questa può essere espressa come

$$P(1/b^i) = b^{Df-3} \quad (6.4)$$

che può essere riscritta anche nella forma

$$Df = 3 + \frac{\log(P(1/b^i))}{\log(b)} \quad (6.5)$$

dove Df è la dimensione frattale del problema.

L'intervallo di variazione della probabilità di rottura è definito dalla disequazione

$$b^{-3} < P(1/b^i) < 1 \quad (6.6)$$

Infatti, nel momento in cui $P(1/b^i)$ tende a b^{-3} , si producono sempre meno frammenti e il blocco tende a rimanere integro; al contrario se $P(1/b^i) = 1$ il blocco risulta essere completamente frammentato, generando il massimo numero di blocchi possibili definiti dal parametro b .

Lo schema riportato in figura 6.2 illustra un esempio di frammentazione con due livelli, nel quale l'iniziatore è costituito da un singolo blocco e vi sono quattro possibili probabilità di rottura. Se il fattore geometrico b è ad esempio pari a 2, significa che dal blocco iniziale possono formarsi 8 potenziali blocchi per ogni livello. Il valore della probabilità di rottura controlla il numero di elementi che effettivamente si generano. Ad esempio, considerando una probabilità di $3/8$, si

generano nell' i -esimo livello 3 blocchi, i quali andranno nuovamente a suddividersi allo stesso modo nel livello successivo, poiché la probabilità di rottura non dipende dalla scala $P(1/b^i) = P(1/b^{i+1})$. Il numero di blocchi generati deve naturalmente essere un numero naturale e il valore viene arrotondato all'intero inferiore più vicino. Dunque se $P(1/b^i)$ risulta minore di $1/8$ non vi è la generazione di nuovi blocchi, mentre per $P(1/b^i) = 1$ l'intero blocco iniziatore viene suddiviso in tutti gli 8 blocchi possibili.

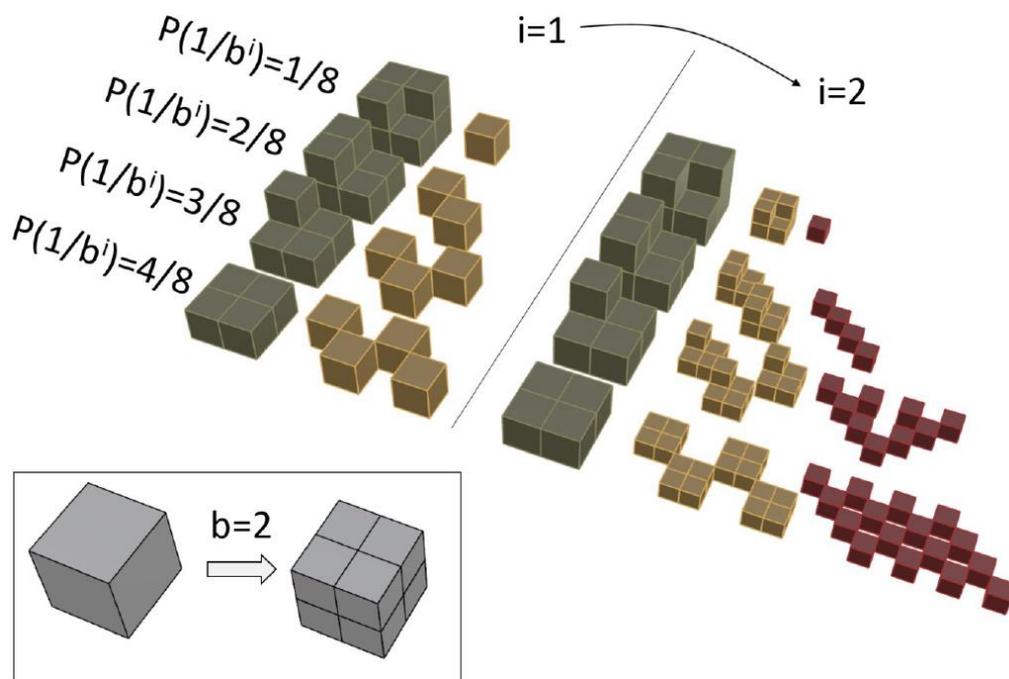


figura 6.2 – Esempio di struttura del modello frattale utilizzato con 2 livelli, $b=2$ e P variabile (fonte Ruiz Carulla et al., 2017)

Il lavoro di Ruiz Carulla et al., 2017 modifica la struttura presentata, adattando il modello alla caduta massi e, sulla base dello schema presentato in figura 6.1, prevedendo come iniziatori k non solo singoli blocchi, ma anche distribuzioni di volume. Questo avviene suddividendo l'IBSD in classi di volume e applicando il modello di frammentazione ad ognuna di esse, nelle quali tutti i blocchi presentano un volume pari al limite superiore della classe. Naturalmente bisogna tenere conto del fatto che al termine del processo è necessario riclassificare tutti i volumi generati. Inoltre viene introdotto un ulteriore parametro chiamato tasso di sopravvivenza S_r , compreso tra 0 e 1, che definisce la percentuale di blocchi che durante la caduta massi non subiscono il processo di frammentazione. Nel caso in cui $S_r = 0$ tutti i blocchi presenti nella classe di volume in esame subiscono

frammentazione, mentre all'opposto per $S_r = 1$ nessun blocco si frantuma e perciò l'RBSD risulta identico all'IBSD iniziale. Lo schema generale di funzionamento del modello finale è esposto in figura 6.3, utilizzando come esempio 3 blocchi. Ipotizzando S_r pari a 0,33, uno dei tre blocchi rimane intero e passa direttamente nell'RBSD, mentre gli altri due subiscono frammentazione. Se questa viene controllata ad esempio da $b=2$ e $P(1/b^i) = 0,5$, allora per ogni livello si formano 4 degli 8 blocchi possibili.

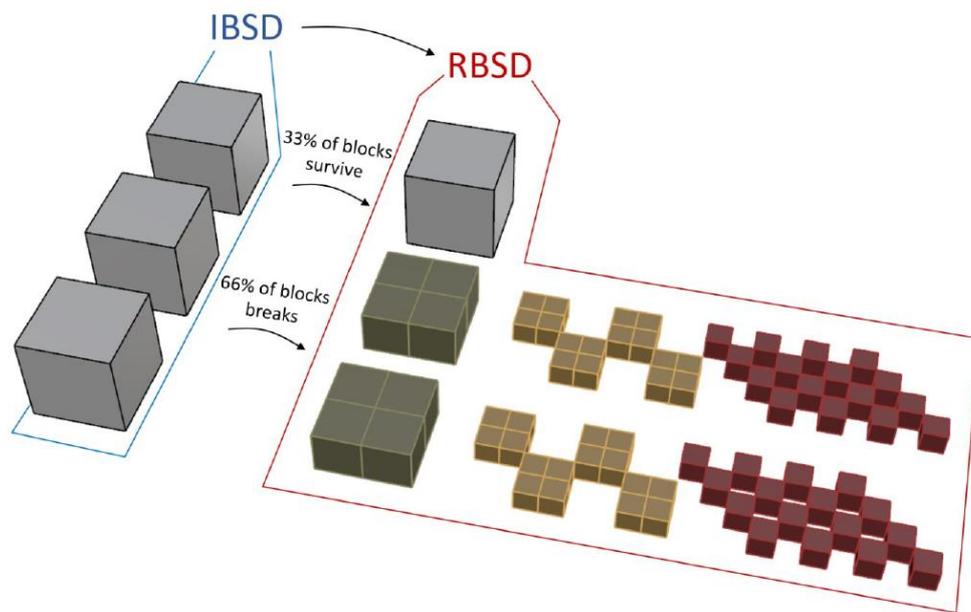


figura 6.3 – Struttura di funzionamento del modello a due livelli per una generica classe di IBSD con $S_r=0,33$, $b=2$ e $P(1/b^i)=0,5$ (fonte Ruiz Carulla et al., 2017)

6.3 Applicazione del modello al sito in esame

L'utilizzo del modello descritto nel paragrafo 6.2 al sito presentato nel capitolo 5 permette di ricostruire l'RBSD a partire dall'IBSD rilevato in parete. I tre parametri (S_r , b e P) che governano la struttura frattale devono essere calibrati attraverso una procedura di minimizzazione della differenza tra i risultati ottenuti e l'RBSD effettivamente rilevato descritto nel paragrafo 5.6. Nel caso in esame, questo avviene con l'impiego del tool *optimization* e nello specifico della funzione *fmincon* del software Matlab, che, attraverso un processo numerico, ricerca il minimo di una funzione obiettivo appositamente costruita facendo variare i valori dei parametri incogniti entro un determinato intervallo o sulla base di specifiche condizioni di vincolo tra le grandezze definite dall'utente.

La funzione obiettivo, costruita all'interno di un apposito script di Matlab denominato ricerca riportato integralmente nell'Allegato A.1, definisce le tre incognite S_r , b e P come appartenenti a un unico vettore x e acquisisce in un'apposita matrice denominata parete i valori di volume e numero di blocchi per ogni classe. I valori di IBSD scelti per la modellazione sono quelli ottenuti dall'impiego del modello presentato nel paragrafo 3.5 poiché, come emerso dal confronto effettuato nel paragrafo 5.7, risulta maggiormente in grado di simulare la presenza dei volumi più piccoli, contenendo invece quelli a volumetria maggiore.

La struttura del modello di frammentazione descritta nel dettaglio nel paragrafo 6.2 viene implementata in un apposito script di Matlab denominato frammentazione e riportato integralmente nell'Allegato A.2. Questa funzione riceve in ingresso da ricerca i valori di S_r , b e p e provvede a calcolare, a seconda del numero di livelli ipotizzati (nel caso specifico sono stati simulati fino a due livelli) il numero di blocchi risultanti e il corrispondente volume, memorizzati all'interno della matrice di output `volumi_framm`. In particolare il numero degli elementi integri, quindi con volume uguale a quelli dei blocchi iniziatori è controllato dal parametro S_r , mentre i restanti $1-S_r$ subiscono potenzialmente il processo di frammentazione. Il numero effettivo dei blocchi generati è controllato dalla probabilità p e determinato sulla base dell'espressione (6.3). Nel caso in cui si ponga $i = 2$ il processo di frammentazione viene nuovamente applicato alla quota parte dei blocchi che già nel primo livello avevano subito la rottura, con la generazione di nuovi blocchi controllata dalla medesima probabilità p del livello precedente.

La matrice risultante dall'applicazione della funzione frammentazione a ogni classe di volume dell'IBSD è dunque composta da due colonne all'interno delle quali sono memorizzati i volumi nella prima e il numero di blocchi generati nella seconda. Questi valori vengono poi ordinati in senso crescente con l'impiego della funzione `sortrows` all'interno della matrice `ordinate`. A questo punto viene costruita, a partire dal numero di blocchi memorizzato nella seconda colonna, la curva di probabilità decrescente CPD con la stessa procedura utilizzata per la curva RBSD sintetizzata in tabella 4.5.

Il risultato ottenuto, riportato in termini logaritmici in funzione del volume, può essere approssimato da una legge di potenza che, passando ai logaritmi, si riduce a una retta il cui coefficiente angolare corrisponde alla dimensione frattale D_f del problema, secondo quanto descritto nel paragrafo 4.5 e verificato in situ nel paragrafo 5.6. In Matlab l'interpolazione avviene utilizzando la funzione `polyfit` che restituisce il valore del coefficiente angolare della retta interpolante.

Tuttavia, l'andamento lineare della relazione che lega volumi e frequenza relativa è valido solamente entro un determinato intervallo di volumi e in particolare al di sopra di un volume minimo di soglia, come evidenziato nel paragrafo 4.5 e nei riferimenti in esso contenuti. Per questo motivo, l'interpolazione della matrice ordinate avviene solamente a partire da un determinato valore di soglia impostato all'inizio del codice di calcolo. Nel caso in esame, dai risultati di alcune prove effettuate imponendo diversi valori ai parametri S_r , b e P , il valore scelto è pari a $0,008 \text{ m}^3$ che corrisponde anche al valore limite della classe 0 in cui sono stati suddivisi sia l'IBSD in parete che l'RBSD rilevato al piede.

In conclusione, l'output fornito dalla funzione obiettivo `ricerca`, che la funzione `fmincon` del tool `optimization` minimizza al fine di ricavare il vettore x dei parametri ottimali, è costituito da una variabile, chiamata `D_star`, definita come la differenza tra il valore della dimensione frattale del problema D , calcolata come descritto in precedenza, e il valore ottimale di D che corrisponde a quello ricavato dalla costruzione della curva RBSD nel paragrafo 5.6 e vale 1,009.

All'interno del processo di ottimizzazione, la ricerca dei valori ottimali di S_r , b e p avviene all'interno di un preciso intervallo di valori diverso per ogni grandezza. In particolare, il valore di S_r viene ricercato all'interno dell'intervallo $[0,1]$, b tra $[1, 3,5]$ e P tra $[b^{-3}, 1]$. Per evitare di inserire vincoli non lineari, il valore di P viene ricercato in $[0,1]$ e poi riportato attraverso un'interpolazione all'intervallo effettivo $[b^{-3}, 1]$ con l'impiego della funzione `interp1`.

Il processo di ottimizzazione è stato eseguito sia ipotizzando la presenza di un solo livello ($i=1$) che di due livelli ($i=2$). In effetti è plausibile che, data l'altezza relativamente modesta della parete e il tipo di cinematismo prevalente, le

traiettorie dei blocchi prevedano un numero limitato di impatti e dunque di possibili frammentazioni. I valori ottimali dei tre parametri che governano il problema ricavati dalla procedura di minimizzazione sono contenuti in tabella 6.1, mentre in figura 6.4 vengono rappresentate le curve ottenute, a confronto con l'IBSD in parete ipotizzato e l'RBSD al piede rilevato in situ.

tabella 6.1– Valori ottimali dei parametri ottenuti ipotizzando diversi livelli di frammentazione

	i=1	i=2
Tasso di sopravvivenza S_r	0,01	0,51
Fattore geometrico b	2	1,57
Probabilità di rottura P	0,89	0,96

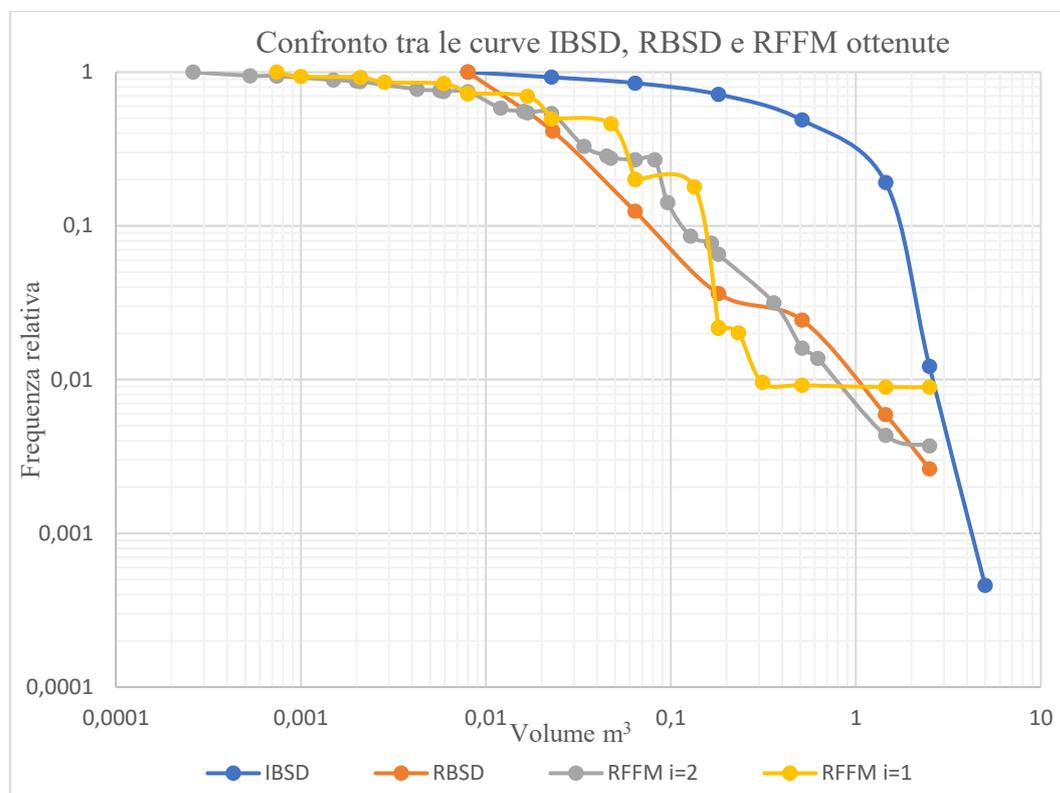


figura 6.4 – Confronto tra le curve RFFM, IBSD e RBSD ottenute

Dalla lettura del grafico di figura 6.4 è evidente come la struttura del modello frattale a due livelli sia maggiormente in grado di riprodurre l'andamento dell'RBSD reale, con minori fluttuazioni rispetto a quella a un solo livello. Quest'ultimo in particolare non riesce a modellare adeguatamente il comportamento dei volumi di dimensioni maggiori, che subiscono più di una frammentazione durante la loro traiettoria. Il passaggio dalla distribuzione IBSD

all'RBSD genera inoltre una quantità non indifferente di detrito o comunque di materiale di dimensioni minori di $0,008 \text{ m}^3$, che non è stato interamente rilevato durante la costruzione dell'RBSD in situ, ma che il modello RFFFM invece riproduce efficacemente.

Tuttavia, il modello RFFM non riesce a raggiungere un valore di volume massimo confrontabile con quello dell'RBSD reale. Data invece l'importanza di determinare questo valore nella maniera più univoca possibile, è condotta una nuova simulazione del modello a due livelli, imponendo all'interno della procedura di ottimizzazione non solo la minimizzazione della variabile D_{star} , ma anche di una seconda chiamata *posizione*. Quest'ultima è definita come la differenza tra il valore di frequenza relativa associata al volume massimo costruito dall'intero modello e quello associato al volume massimo realmente rilevato al piede della parete rocciosa in esame. La presenza di due obiettivi da verificare all'interno della procedura non permette l'utilizzo della funzione *fmincon*, poiché essa prevede l'uso di funzioni obiettivo che restituiscano come output uno scalare e non un vettore. Perciò si è reso necessario l'utilizzo dell'algoritmo *multiobjective optimization using Genetic Algorithm*, che non restituisce però un valore univoco e ottimale dei parametri ricercati. In tabella 6.2 sono riportate ad esempio le triplete di valori restituiti al termine della procedura eseguita con i valori che le due funzioni obiettivo assumono.

tabella 6.2– Possibili valori di x ricavati dalla procedura di ottimizzazione con due obiettivi

Indice	f1	f2	x1	x2	x3
1	0,001	0	0,601	1,676	0,976
2	0	0	0,601	1,673	0,976
3	0,001	0	0,601	1,676	0,976
4	0,001	0	0,601	1,676	0,976
5	0,001	0	0,601	1,676	0,976
6	0	0	0,601	1,675	0,976
7	0,001	0	0,601	1,676	0,976
8	0	0	0,601	1,673	0,976
9	0	0	0,601	1,675	0,976
10	0	0	0,601	1,674	0,976
11	0	0	0,601	1,675	0,976
12	0,001	0	0,601	1,675	0,976
13	0	0	0,601	1,674	0,976
14	0	0	0,601	1,674	0,976
15	0,001	0	0,601	1,676	0,976
16	0,001	0	0,601	1,675	0,976

È evidente dai valori di tabella 6.2 come, nonostante la soluzione non sia unica, vi sia una variazione minima dei valori dei parametri. Questo permette di considerare indifferentemente una delle triplette presenti. I valori dei parametri scelti sono perciò pari a 0,601 per Sr, 1,68 per b e 0,98 per P. I calcoli eseguiti con i valori indicati permettono di costruire una curva RFFM che viene confrontata con quella ottenuta in precedenza con la funzione *fmincon* e con l'IBSD e l'RBSD reale nel grafico riportato in figura 6.5, mentre in tabella 6.3 sono riportati i valori finali dei tre parametri ottenuti.

tabella 6.3 – Confronto finale tra i valori dei parametri ottenuti

	i = 1	i = 2	i = 2 con 2 obiettivi
Tasso di sopravvivenza Sr	0,01	0,51	0,60
Fattore geometrico b	2	1,57	1,68
Probabilità di rottura P	0,89	0,96	0,98

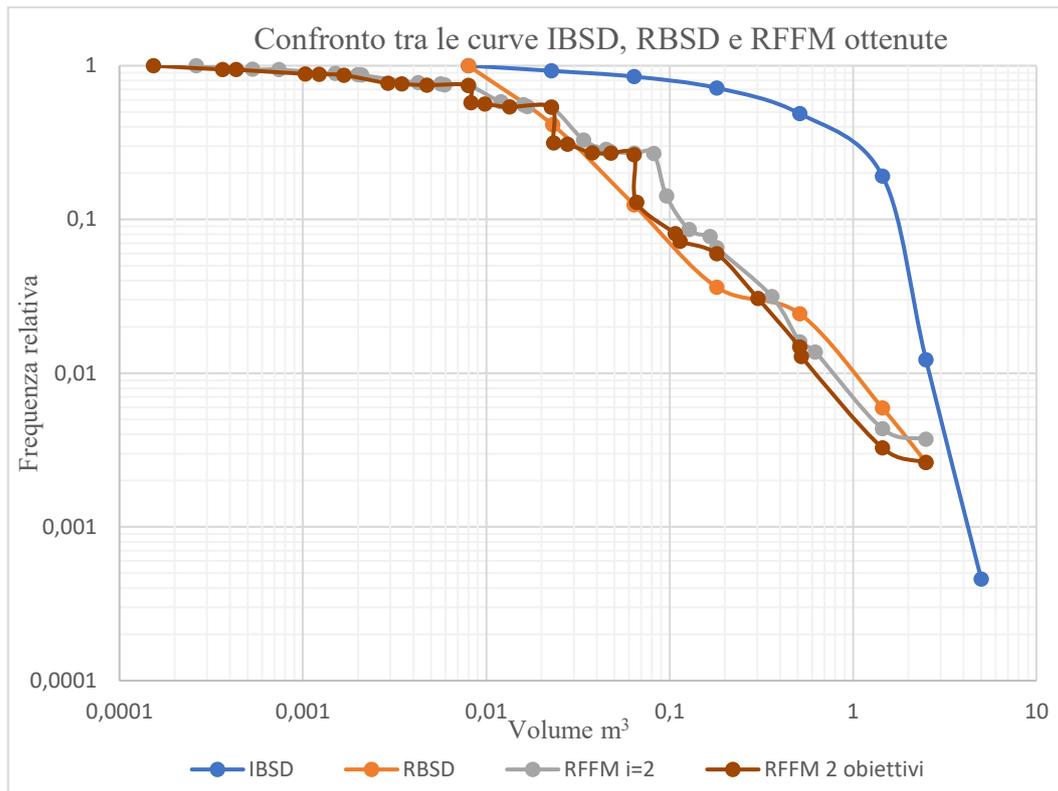


figura 6.5– Confronto finale tra le curve IBSD, RBSD e RFFM ottenuta con il metodo dei 2 obiettivi

L'analisi delle curve contenute in figura 6.5 e dei dati in tabella 6.3 permette di affermare che il modello frattale presentato è in grado di fornire una prima modellazione del fenomeno di frammentazione. Questo risultato si ottiene ipotizzando due livelli differenti all'interno dei quali il numero di blocchi generati è controllato dalla probabilità di rottura P , che assume in tutti e tre i casi della tabella 6.3 dei valori piuttosto elevati. Dunque il numero dei blocchi generati risulta essere molto elevato rispetto a quelli potenzialmente generabili, definiti dal fattore b . Anche il tasso di sopravvivenza S_r assume nei casi di modello a due livelli un valore simile, dal quale risulta che poco meno della metà dei blocchi presenti in ogni classe di volume non subisce il processo di frammentazione. Infine, minimizzando anche la differenza tra i valori di frequenza relativa del volume massimo, è possibile ricostruire una curva in grado di ricostruire adeguatamente il volume massimo al piede, evitando problemi di sovrastima o peggio di sottostima di questo importante valore.

Capitolo 7

Conclusione

Il lavoro svolto in questa tesi di laurea permette di costruire e di confrontare tra di loro la distribuzione dei volumi individuabili all'interno di una parete rocciosa con quella relativa agli elementi presenti nel deposito sottostante, nell'ottica del problema di determinazione del volume del blocco di progetto, elemento "critico" nella progettazione di opere di mitigazione del rischio derivante dalla caduta massi.

Per quanto riguarda la curva in parete IBSD, è evidente come l'approccio basato sulle tecniche di rilievo tradizionale dell'ammasso roccioso, anche se utilizzate attraverso un processo di determinazione delle variabili di tipo statistico per limitare le incertezze e gli errori nella stima delle grandezze, non è in grado di simulare efficacemente la formazione dei volumi più piccoli. La causa è essenzialmente da ricercare nella mancata modellazione della persistenza, proprietà che evidentemente influenza notevolmente l'IBSD. Al contrario, gli sviluppi più recenti dei modelli numerici applicati alla caduta massi e in particolare l'algoritmo scelto, frutto di una precedente tesi di laurea presso il Politecnico di Torino, consente di modellare secondo una distribuzione esponenziale, ricorrente in letteratura, sia la spaziatura che la persistenza che caratterizzano ogni famiglia di discontinuità presente all'interno dell'ammasso roccioso. Rimane invece ancora da sviluppare l'applicazione di questo modello ai risultati di rilievo ottenuti attraverso tecniche di rilevamento in remoto, non affrontato all'interno di questo lavoro.

La ricostruzione della curva di distribuzione dei volumi al piede RBSD è stata invece analizzata individuando i diversi aspetti che la condizionano, come le

caratteristiche dell'area di accumulo o l'influenza della forma sul calcolo del volume del blocco. Sulla base di quanto ampiamente dimostrato in letteratura, è stato sottolineato come i frammenti presenti al piede di una parete rocciosa siano riconducibili a un processo di tipo frattale, da cui discendono importanti proprietà come l'invarianza di scala. Quest'ultima permette di introdurre il concetto di area di campionamento e di arrivare alla formulazione di un metodo di costruzione in situ dell'RBSD che tenga conto di tutte le problematiche esposte.

Infine, le due curve IBSD e RBSD risultanti dall'applicazione in situ delle tecniche presentate sono state confrontate tra di loro utilizzando un modello di tipo frattale che sia in grado di simulare il processo di frammentazione a partire dall'IBSD ottenendo come risultato l'RBSD. Il risultato della simulazione è stato confrontato con l'RBSD realmente rilevato al piede della parete rocciosa, consentendo la stima dei tre parametri che governano il problema. Ulteriori lavori sono però necessari per testare il modello in altri siti al fine di costruire un intervallo di variazione dei parametri direttamente correlato alle caratteristiche geologiche e geomeccaniche della parete rocciosa in esame e alla traiettoria della massa rocciosa in movimento, in particolare in termini di altezza di caduta e di numero di impatti subiti. Al termine di ciò, sarà possibile l'impiego del modello, abbinato a opportuni algoritmi di calcolo delle traiettorie, in un'ottica preventiva di simulazione di eventi futuri e soprattutto di supporto concreto all'attività di analisi di rischio e di progettazione delle opere di mitigazione dei fenomeni di caduta massi.

Allegato A

Codici Matlab del modello di frammentazione

A.1 Funzione obiettivo ricerca

```
function [output]=ricerca(x)

Sr=x(1); %parametri da minimizzare
b=x(2);
p=interp1([0 1],[b^(-3) 1],x(3));

soglia=0.008;
%volume di soglia impostato per l'interpolazione
v_max=2.5;
%volume massimo rilevato al piede
cpd_max=0.0026;
%frequenza relativa del volume max rilevato al piede
i=2;
% numero di livelli previsti
D_target=-1.008;
%dimensione frattale reale al piede
Parete=[
    0.008      74
    0.022627417 77
    0.064      133
    0.181019336 229
    0.512      297
    1.448154688 179
    2.5        12
    5          0
    10         0
];
%vettore delle classi IBSD nella forma v_Classi... num_classi

nuova=[];

%applicazione della funzione frammentazione
for j=1:size(Parete,1)
    nuova=[nuova
        frammentazione(Parete(j,1),Parete(j,2),...
            Sr,b,p,i)];
end

ordinate=sortrows(nuova,1);
ordinate=ordinate(find(ordinate(:,2)~=0),:);

%Costruzione della cumulata decrescente
ordinate(1,3)=sum(ordinate(:,2));
```

```

for j=2:size(ordinate,1)
    ordinate(j,3)=ordinate(j-1,3)-ordinate(j,2);
end

ordinate(:,3)=ordinate(:,3)/ordinate(1,3);
%Interpolazione dei valori superiori al volume di soglia
A=polyfit(log(ordinate(find(ordinate(:,1)>=soglia),1)),...
    log(ordinate(find(ordinate(:,1)>=soglia),3)),1);
D_star=abs(A(1,1)-D_target);
posizione=abs(ordinate(find(ordinate(:,1)==v_max),3)-cpd_max);

output(1)=D_star;
output(2)=posizione;
%output valido solo per la funzione a due obiettivi
end

```

A.2 Funzione frammentazione

```

function [volumi_framm] =
frammentazione(V_classe,blocchi_classe,Sr,b,p,i)
num_sep=p*b^3; %numero di blocchi generati

%modello a 1 livello
if i==1
volumi_framm=zeros(3,2);
volumi_framm(1,:)=[V_classe Sr*blocchi_classe];
volumi_framm(2,:)=[(1-p)*V_classe blocchi_classe*(1-Sr)];
volumi_framm(3,:)=[V_classe/b^3 blocchi_classe*(1-Sr)*num_sep];

%modello a due livelli
elseif i==2
    volumi_framm=zeros(4,2);
    volumi_framm(1,:)=[V_classe Sr*blocchi_classe];
volumi_framm(2,:)=[(1-p)*V_classe blocchi_classe*(1-Sr)];
volumi_framm(3,:)=[V_classe/b^3*p blocchi_classe*(1-Sr)*num_sep];
volumi_framm(4,:)=[V_classe/b^6 blocchi_classe*(1-Sr)*p^2*b^6];
end
end
end

```

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro voglio citare le persone che, oltre al relatore prof. Daniele Peila e ai correlatori Valerio De Biagi e Maddalena Marchelli, hanno contribuito attivamente alla realizzazione di questa tesi. In particolare, per quanto riguarda le attività di rilievo in campo della parete rocciosa scelta, devo ringraziare i miei famigliari e amici che, nonostante i mille impegni, la stagione invernale e la non proprio esaltante (dal loro punto di vista!!) attività da svolgere, mi hanno fornito tutto l'aiuto possibile, dimostrandomi una volta ancora di avere accanto persone vere su cui si può sempre contare. Grazie quindi a mio fratello Pierre che a colpi di *éterpa* e di buona volontà è stato fondamentale nella ricerca e nella tracciatura del sito, a mio papà Gian Marco per il “monitoraggio” continuo della parete e a mia mamma Iris per aver sportivamente deciso di accompagnarlo. Grazie a Pietro che, con le sue competenze da geologo, è stato fondamentale nella fase di rilievo in parete e nella successiva di interpretazione delle famiglie di discontinuità presenti, a Luca e a Didier per aver accettato di rinunciare a un giorno di sole e di festa per fare da ottimi assistenti durante il rilievo al piede. Merci bien à tcheut!!!

Bibliografia

- *Actions de chutes de pierres sur les galeries de protection*, OFROU/CFF, Berne, Publications fédérales, 2008
- Bunte K., Abt S.R., Potyondy J. P., Swingle K.W., “Comparison of Three Pebble Count Protocols (EMAP, PIBO, and SFT) in Two Mountain Gravel-Bed Streams”, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, October 2009, v. 45(5), p.1209-1227, 2009
- Cislighi A., Chiaradia E. A., Bischetti G.B., “A comparison between different methods for determining grain distribution in coarse channel beds”, *International Journal of Sediment Research*, June 2016, v. 31(2), p.97-109, 2016
- Corominas J., Mavrouli O., Ruiz Carulla R., “Magnitude and frequency relations: are there geological constraints to the rockfall size?”, *Landslides*, 4 November 2017, p.1-7, 2017
- Crosta G., Frattini P., Fusi N., “Fragmentation in the Val Pola rock avalanche, Italian Alps”, *Journal Of Geophysical Research-Earth Surface*, v.112, 2007
- D.M. 14 gennaio 2008, “Nuove norme tecniche per le costruzioni”, 2008
- De Biagi V., Chiaia B., Frigo B. “Fractal grain distribution in snow avalanche deposits”, *Journal of Glaciology*, v. 58, p. 340–346, 2012
- De Biagi V., Botto A., Napoli M., Dimasi C., Laio F., Peila D., Barbero M., “Calcolo del tempo di ritorno dei crolli in roccia in funzione della volumetria”, *GEAM Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, v. 56, p. 39-48, 2016
- De Biagi V., Napoli M. L., Barbero M., Peila D., “Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 17, n. 1, p. 103-113, 2017
- De Biagi V., "Brief communication: Accuracy of the fallen blocks volume-frequency law", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 17, n. 9, p. 1487-1492, 2017
- Durville J.L., Guillermin P., Berthet-Rambaud P., Subrin D., “État de l’art sur le dimensionnement des dispositifs de protection contre les chutes de blocs”, *Laboratoire central des ponts et chaussées*, 2010
- Dussauge C., Grasso J.R., Helmstetter A., “Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics”, *Journal of Geophysical Research*, v. 108, p.2286, 2003

- Dussauge-Peisser C., Helmstetter A., Grasso J.R., Hantz D., Desvarreux P., Jeannin M., Giraud, A., “Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 2, p. 15–26, 2002
- Elmoultie M., Poropat G., “A method to estimate In Situ Block Size Distribution”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v.45(3), p.401-407, 2012
- Fityus S.G., Giacomini A., Buzzi O., "The significance of geology for the morphology of potentially unstable rocks", *Engineering Geology*, v. 162, p. 43-52, 2013
- Geist E.L., Parsons T., "Undersampling power-law size distributions: Effect on the assessment of extreme natural hazards", *Natural Hazards*, v. 72, n. 2, p. 565-595, 2014
- Gerber W., “Directive sur l’homologation de filets de protection contre les chutes de pierres”, OFEFP & WSL, 2001
- Guideline for European technical approval of falling rock protection kits, ETAG 027, EOTA, 2008
- Gupta T., Yellishetty M. Singh T., “Measurement of Bulk volume and Density of Irregular Solid Samples by Sand Displacement Method”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, v.50, n. 3, p.639-645, 2017
- Kim B.H., Cai M., Kaiser P.K., Yang H.S., “Estimation of block sizes for rock masses with non-persistent joint”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 40, n. 2, p.169-192, 2007
- Mavrouli O., Corominas J., Jaboyedoff M., “Size Distribution for Potentially Unstable Rock Masses and In Situ Rock Blocks Using LIDAR-Generated Digital Elevation Models”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 48, p. 1589–1604, 2015
- Mouton P.R., Phoulady H.A., Goldgof D., Hall L.O., Gordon M., Morgan D., “Unbiased estimation of cell number using the automatic optical fractionator”, *Journal of Chemical Neuroanatomy*, v.80, p. A1-A8, 2017
- Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 1: Termini e definizioni, UNI 11211-1, Milano, Ente Nazionale di Normazione, 2007
- Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 2: Programma preliminare di intervento, UNI 11211-2, Milano, Ente Nazionale di Normazione, 2007
- Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 3: Progetto preliminare, UNI 11211-3, Milano, Ente Nazionale di Normazione, 2010
- Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo, UNI 11211-4, Milano, Ente Nazionale di Normazione, 2012

- Palmstrøm A, “Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)”, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2005, v.20, n. 4, p.362-377, 2005
- Palmstrøm A., “Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (R_{Mi})”, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, v.11, n. 2, p.175-18, 1996
- Peila D., Ronco, C. “Technical Note: Design of rockfall net fences and the new ETAG 027 European guideline”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 9, p. 1291–1298, 2009
- Perfect E., “Fractals models for the fragmentation of rocks and soils: a review”, *Engineering Geology*, v. 48, p.185-198, 1997
- Perret S., Dolf F., Kienholz Hans, “Rockfalls into forests: Analysis and simulation of rockfall trajectories – considerations with respect to mountainous forests in Switzerland”, *Landslides*, v.1, n.2, p.123-130, 2004
- Philippot F., *Sviluppo di un metodo per la stima dei volumi al distacco nel fenomeno della caduta massi*, Tesi di laurea magistrale Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Ingegneria civile, a.a. 2014/2015
- Riquelme A. J., Tomás R., Abellán A., Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.84, p.165-176, 2016
- Ruiz-Carulla R., Corominas J., Mavrouli O., “A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits”, *Landslides*, v. 12, p. 815–825, 2015
- Ruiz-Carulla R., Corominas J., Mavrouli O., “A fractal fragmentation model for rockfalls”, *Landslides*, v.14, n.3, p.875-889, 2017
- Santana D., Corominas J., Mavrouli O., Garcia-Sellés D., “Magnitude-frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner”, *Engineering Geology*, v.145-146, p.50-64, 2012
- Stavropoulou M., “Discontinuity frequency and block volume distribution in rock masses”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 65, p. 62-74, 2014
- Stelzer G., Bichler A., “ONR 24810: A comprehensive guideline for building better rockfall protection structures”, *64th annual Highway Geology Symposium (HGS) New Hampshire (USA)*, 2013

- *Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock masses*, International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1978
- Takahashi J., Suito H., “Evaluation of the accuracy of the three-dimensional size distribution estimated from schwartz-saltykov method, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 34, n.1, p.171-181, 2003
- Turcotte D. L., *Fractals and chaos in geology and geophysics*, 2 ed., Cambridge University Press, 1997
- Watson R., Yip P., “How many were there when it mattered?”, *Significance*, v.8, n.3, p.104-107, 2011

Dove non diversamente specificato, le fotografie riportate sono state eseguite dall'autore durante i mesi di ottobre 2017 - marzo 2018