

## 2.3 Le frane da crollo

### 2.3.1 Introduzione

I fenomeni di crollo da pareti rocciose sono comunemente diffusi in tutte le regioni di montagna e lungo le falesie costiere, costituendo una costante fonte di pericolo per le vite, i beni e le attività umane in zone generalmente molto attive dal punto di vista del turismo e delle grandi vie di comunicazione. Dei circa 34'000 fenomeni franosi censiti in Piemonte nel corso del progetto IFFI (Arpa Piemonte, 2004), il 20.9% risulta essere costituito da crolli singoli o da aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi. Nonostante una così ampia diffusione del fenomeno, in letteratura si trovano pochi esempi di modelli di analisi relativi a crolli e cadute massi a scala di bacino.

Il processo infatti, pur essendo in apparenza riconducibile ad una schematizzazione piuttosto semplice dei meccanismi che lo governano, in realtà è complicato dal fatto che la definizione dei parametri che controllano i fenomeni di rottura ed evoluzione risente di un grado elevato di incertezza; l'ampia estensione delle aree coinvolte inoltre, (si pensi al tracciato di grandi vie di comunicazione come autostrade e ferrovie) rende difficile raccogliere informazioni sufficienti per condurre analisi dettagliate. Per questo motivo la stabilità di un versante può essere valutata solo in modo probabilistico e le misure di protezione e di mitigazione del fenomeno devono essere legate alla determinazione della pericolosità, funzione dell'estensione delle aree coinvolte, dell'intensità del fenomeno e della probabilità di occorrenza.

Di conseguenza, la determinazione della pericolosità per fenomeni di crollo da pareti rocciose in aree vaste necessariamente deve avvenire tramite l'utilizzo di metodi semplificati. Alcuni paesi come gli Stati Uniti e il Canada hanno adottato a tale proposito sistemi di classificazione dei versanti instabili basati unicamente su ispezioni visive delle pareti e calcoli molto semplici; si veda per esempio la classificazione RHRS (Pierson *et al.*, 1990). Tali sistemi, sviluppati essenzialmente per l'analisi di tracciati stradali e ferroviari, hanno lo scopo di identificare i versanti particolarmente soggetti a fenomeni di caduta massi (Hoek, 2000), ma non sono in grado di valutare l'estensione delle zone di invasione e non possono perciò essere utilizzati per determinare la pericolosità in aree montane nelle quali siano presenti nuclei abitati, strutture turistiche ed attività economiche in genere.

Uno dei primi esempi di metodologie dedicate alla definizione della pericolosità di aree vaste, necessarie per una pianificazione regionale del territorio, è il programma di calcolo STONE (Guzzetti *et al.*, 2002), il quale è in grado, partendo da informazioni topografiche e geomorfologiche disponibili a scala di bacino e utilizzando un modello di simulazione tridimensionale delle traiettorie di caduta massi, di valutare le aree di invasione e

produrre carte tematiche utili alla definizione della pericolosità e del rischio alla stessa scala.

Una limitazione di tale approccio è data dall'assenza di un modello meccanico che consenta di valutare la possibilità di distacco di volumi rocciosi dalle pareti. Essendo basato su dati derivabili dalla base topografica, STONE infatti non è in grado di tenere conto delle condizioni strutturali del versante e riserva le valutazioni probabilistiche alla fase di evoluzione del fenomeno di caduta, per la quale è sufficiente conoscere la morfologia del pendio, le sue condizioni litologiche e d'uso del suolo, quest'ultima indispensabile per valutare i coefficienti di smorzamento degli impatti.

Il Progetto CROLLI, realizzato da Arpa Piemonte - Centro Regionale per gli Studi e le Ricerche Geologiche, in collaborazione col Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino, si pone l'obiettivo di sviluppare una metodologia che consenta di valutare le condizioni di pericolosità per caduta massi a partire da un metodo meccanico probabilistico per la definizione della probabilità di distacco dei massi in parete. In considerazione della notevole estensione delle aree di indagine, la metodologia è basata sull'impiego di metodi di calcolo che necessitano della conoscenza di parametri fisico-meccanici e geometrici di agevole determinazione su vasta scala, in molti casi disponibili in ambiente GIS.

Scopo di questo paragrafo è illustrare le potenzialità della metodologia che permette di ottenere la suddivisione del territorio in fasce a diverso grado di pericolosità (intesa come pericolosità spaziale relativa e non nell'accezione classica di probabilità di occorrenza), rivelandosi uno strumento molto utile ai fini della pianificazione del territorio a scala regionale. Essa infatti consente di individuare le aree soggette a più elevato pericolo, sulle quali effettuare indagini di maggiore dettaglio ed utilizzare metodi di analisi più sofisticati al fine di progettare eventuali interventi di mitigazione a protezione di strade e centri abitati o preparare i piani di protezione civile per le gestione delle emergenze.

Dopo una breve descrizione delle fasi che com-

pongono la metodologia e della loro integrazione entro la base dati del Sistema Informativo Geologico regionale, sviluppato in ambiente GIS, viene presentata un'applicazione al sito di Exilles (Media Valle di Susa).

### 2.3.2

#### Descrizione del fenomeno

I crolli in roccia sono fenomeni franosi che comportano il distacco di blocchi e/o frammenti rocciosi di dimensioni variabili da alcuni decimetri a diverse centinaia di metri cubi da pendii, falesie o fronti di scavo ed il loro successivo movimento lungo il versante fino all'arresto (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). Il crollo può avere luogo anche per mobilitazione di blocchi contenuti in terreni sciolti.

Il distacco dei blocchi da un versante è fortemente influenzato dalle condizioni strutturali dell'ammasso (famiglie di discontinuità, persistenza, spaziatura), dalla geometria (giacitura e orientazione delle discontinuità rispetto al versante), dalle caratteristiche meccaniche (resistenza a taglio delle discontinuità, resistenza a trazione di eventuali ponti di roccia) e da eventuali sollecitazioni esterne (presenza di acqua in pressione nelle discontinuità, sismi, ecc.).

Una volta avvenuto il distacco, la traiettoria seguita da un blocco è la combinazione di quattro processi principali: scivolamento e/o ribaltamento, caduta libera, rimbalzo e rotolamento. Questi processi sono governati da leggi fisico-meccaniche ben conosciute e possono essere descritti con semplici equazioni.

Lo scivolamento è generalmente limitato alle fasi iniziali di un crollo, ha luogo su corte distanze (da pochi centimetri ad alcuni metri) ed è caratterizzato da basse velocità e da una considerevole dissipazione di energia per attrito. Per massi di grosse dimensioni lo scivolamento può anche verificarsi al momento dell'impatto, con significativa perdita di energia.

La caduta libera rappresenta lo stato di moto predominante di un crollo in roccia. Guidato dalla gravità, il processo è descritto da traiettorie di tipo parabolico ed è caratterizzato da velocità elevate. Durante la caduta libera, l'energia potenziale del masso viene trasformata in energia cinetica.

Raramente il movimento principale di un masso avviene per puro rotolamento: di solito infatti questo tende a realizzarsi tramite una sequenza ravvicinata di rimbalzi che generano delle traiettorie paraboliche di altezza modesta (Broili, 1973; Azzoni *et al.*, 1991). Il rotolamento si osserva solo in blocchi di forma sferica, ovale o cilindrica, quando la velocità del masso è modesta ed il versante presenta superfici pseudo-piane, a bassa inclinazione e scarsa rugosità delle superfici.

L'impatto al suolo è il fattore più complesso, difficile da modellare e meno conosciuto di un crollo. Al momento dell'impatto, considerato istanta-

neo per motivi di semplicità, si ha una perdita di energia e la direzione di movimento del masso può cambiare.

I crolli in roccia rappresentano un esempio di un sistema meccanico relativamente semplice, che rispetta leggi note, ma il cui comportamento non può però essere previsto in termini di spazio e tempo sebbene le condizioni iniziali e le forze coinvolte siano conosciute. La traiettoria di un masso in caduta dipende infatti da una serie di fattori la cui incertezza risulta predominante, quali la localizzazione dell'area di distacco, le condizioni strutturali dell'ammasso in tale area, la geometria del masso, le proprietà meccaniche della roccia e del versante e la topografia (Ritchie, 1963), fattori, questi, difficili da verificare sul terreno e che non possono essere determinati con esattezza. La geometria della superficie topografica e le proprietà dei materiali variano notevolmente lungo un versante e non possono essere determinate con precisione. Inoltre, l'ammontare dell'energia dissipata a ogni impatto o durante il rotolamento dipende a sua volta da una varietà di fattori che comprendono la geometria del blocco, il tipo di materiale, la geometria della superficie topografica, la velocità del blocco e l'angolo di impatto (Azzoni & de Freitas, 1995; Jones *et al.*, 2000), anch'essi parametri difficili da determinare con precisione.

Per tali ragioni lo studio del fenomeno non può che avvenire in termini probabilistici, a partire da distribuzioni di frequenza dei parametri d'ingresso che tengano conto anche in modo semplificato della loro variabilità.

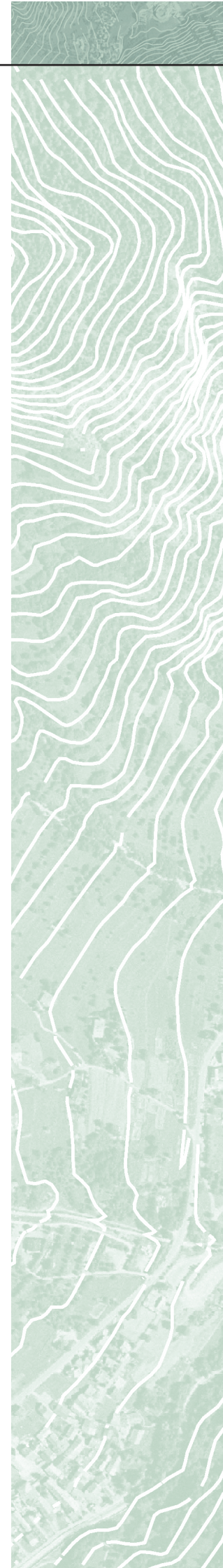
### 2.3.3

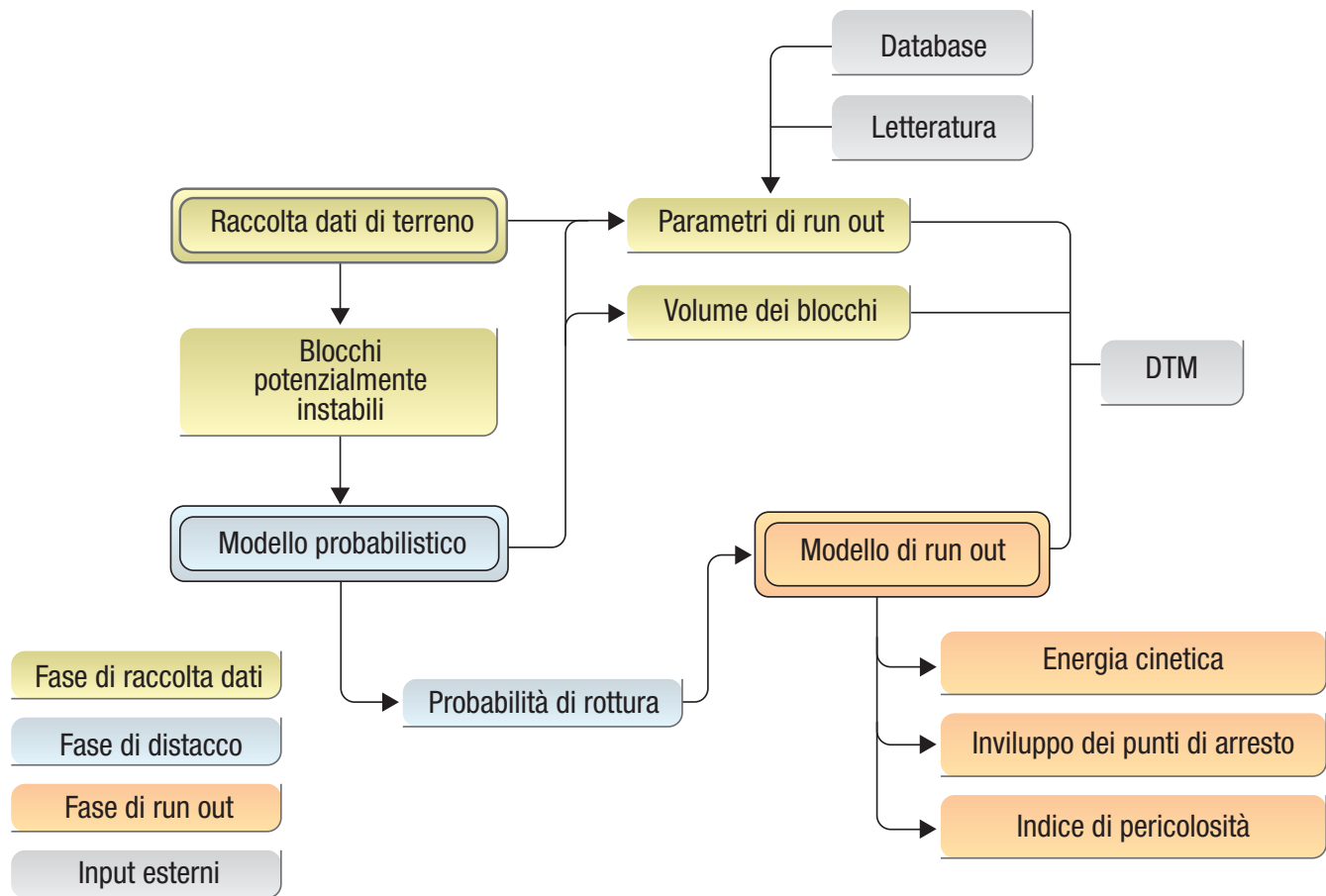
#### Descrizione della metodologia

Avendo come fine quello di indagare aree di notevole estensione in tempi relativamente brevi, la metodologia è basata sull'impiego di modelli di calcolo che necessitano della conoscenza di parametri fisico-meccanici e geometrici su vasta scala.

Tale metodologia si basa sull'utilizzo di parametri ricavati sia da analisi speditive di terreno, strutturati successivamente in un apposito database, sia dall'analisi degli strati informativi disponibili nella base dati del Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte.

La procedura prevede la suddivisione del versante oggetto di indagine in aree omogenee, ovvero contraddistinte da condizioni strutturali, morfologiche e litologiche che possono essere considerate costanti. All'interno di ciascun'area omogenea le condizioni strutturali possono portare alla definizione di uno o più cinatismi (planari o a cuneo). Per ciascuna area omogenea e per ciascun cinatismo individuato, un rilievo speditivo di terreno fornisce i dati geometrici e strutturali necessari a condurre analisi di stabilità tramite il metodo dell'equilibrio limite; tali dati vengono tradotti in termini statistici, con distribuzioni anche molto semplificate. Tramite il metodo di Monte Carlo





**Figura 2.3.1**  
Descrizione schematica  
della metodologia

è quindi possibile stimare una probabilità relativa di distacco per ogni cinematismo evidenziato. Nella prima fase del lavoro è stato utilizzato a questo scopo il codice di calcolo WINTAM (Major *et al.*, 1974), il quale è in grado di analizzare la stabilità di volumi rocciosi costituenti un cuneo formato dall'intersezione di due discontinuità piane. In questa fase ci si è quindi limitati alla considerazione della probabilità di rottura di tali cinematismi, preferendo concentrare l'attenzione sulla definizione di una metodologia e sull'integrazione delle sue principali componenti, lasciando agli sviluppi futuri della ricerca il calcolo della probabilità di rottura per cinematismi diversi da quelli a cuneo.

Sulla base dei risultati dell'analisi probabilistica è infine possibile condurre le analisi di caduta massi (*run out*) tramite il codice di calcolo tridimensionale ROTOMAP<sup>3D</sup> (Geo & Soft International, 2003). Simulando le traiettorie di caduta massi ed associando a ciascun masso in caduta un volume e la relativa probabilità di distacco, viene quindi stimata la pericolosità in ogni punto del fondovalle come sommatoria del prodotto tra la probabilità di distacco e l'energia di impatto per ogni masso in transito per quel punto. La simulazione delle traiettorie di caduta massi necessita della scelta di alcuni parametri - coefficienti di restituzione e rotolamento - variabili in funzione dell'uso del suolo; le indicazioni per una loro corretta definizione sono state ricavate sia dai dati presenti in lette-

ratura sia dai risultati dell'analisi a posteriori di eventi già verificatisi.

In sintesi, la metodologia sviluppata si articola nelle seguenti fasi (**figura 2.3.1**):

- *fase di raccolta dati*: raccolta ed organizzazione dei dati di campagna impiegando tecniche speditive; creazione di una scheda di rilevamento dati da utilizzarsi all'interno di aree omogenee;
- *fase di distacco*: determinazione della probabilità di distacco dei massi in parete, mediante il metodo dell'Equilibrio Limite e la tecnica probabilistica di Monte Carlo;
- *fase di run out*: determinazione delle traiettorie di caduta dei massi mediante un metodo cinematico tridimensionale e determinazione della pericolosità da crollo.

Il risultato finale fornisce la zonizzazione del territorio in fasce a diverso grado di pericolosità, qui illustrata tramite un esempio di applicazione sul sito di Exilles, situato in Media Val di Susa.

#### 2.3.4 Fase di raccolta dati

La prima fase di progetto riguarda il reperimento di tutte le informazioni di terreno. Tale fase riguarda essenzialmente il rilievo delle pareti rocciose, il rilievo degli eventuali cinematismi e la descrizione del pendio.

Il rilievo delle pareti rocciose viene effettuato eseguendo in successione le seguenti operazioni:

- individuazione e perimetrazione dei settori omogenei;
- stima dell'orientazione media del fronte;
- determinazione delle famiglie di giunti principali e delle caratteristiche geometriche.

Il rilievo dei cinematismi consiste nella raccolta delle seguenti informazioni:

- tipologia del cinematismo (cuneo, scivolamento planare e ribaltamento);
- discontinuità che delimitano il cinematismo (piani di scivolamento, giunto di trazione) e il fronte locale;
- stima dell'altezza e della volumetria dei blocchi.

Il pendio viene infine descritto in seguito ad osservazioni di terreno e fotointerpretazione che devono fornire indicazioni riguardo a:

- tipo di pendio (tipo ed uso del suolo, presenza di sistemazioni antropiche);
- involucro medio delle massime distanze di arresto dei principali massi/blocchi individuati al piede;
- stima dei volumi dei massi presenti al piede;
- individuazione dei sistemi di discontinuità sub-paralleli alla direzione del pendio per la definizione del giunto di trazione.

Trattandosi di una metodologia da utilizzare a media-grande scala, i rilevamenti di terreno devono essere di tipo speditivo. Negli ultimi anni sono state sviluppate metodologie di rilevamento strutturale a distanza delle falesie da affiancare ai classici metodi di rilevamento in parete (Pahl, 1981; Jaboyedoff *et al.*, 1996; Rouiller *et al.*, 1998). Tali metodi da un lato risultano più speditivi e adatti ad un'analisi a scala di un intero settore vallivo e dall'altro hanno il vantaggio di individuare i sistemi di discontinuità più importanti, caratterizzanti maggiormente l'ammasso roccioso e di fornire per questi una misura media significativa non sempre correttamente stimabile a scala dell'affioramento. Viste le finalità di questo lavoro, sono state quindi preferite metodologie di rilevamento a distanza limitando il lavoro a scala dell'affioramento a locali controlli a campione o ad indagini di maggior dettaglio sui siti considerati particolarmente significativi. Non vengono quindi condotte analisi approfondite delle condizioni geologiche e strutturali del versante, ma i dati vengono raccolti tramite l'osservazione del pendio da alcuni punti di vista situati al piede o sul versante opposto. Al fine di facilitare l'acquisizione dei parametri di terreno e creare uno strumento oggettivo di analisi, sono state preparate alcune schede di acquisizione standard. Tali schede vengono compilate dall'operatore per ogni area omogenea individuata. Tutti i dati raccolti vengono poi inseriti in un apposito database strutturato in modo da consentire un facile accesso e una completa gestione

degli stessi dati nelle successive fasi di progetto. Per ogni area omogenea vengono quindi identificati sia i parametri necessari per il modello probabilistico (stima delle giaciture delle principali famiglie di discontinuità, della giacitura dei principali cinematismi osservati e delle altezze dei cunei evidenziati), sia i parametri necessari per il modello cinematico (stima dei volumi di materiale coinvolto, eventuali modificazioni d'uso del suolo rispetto ai dati esistenti, opere di sistemazione antropiche, ecc.).

### 2.3.5

#### Fase probabilistica

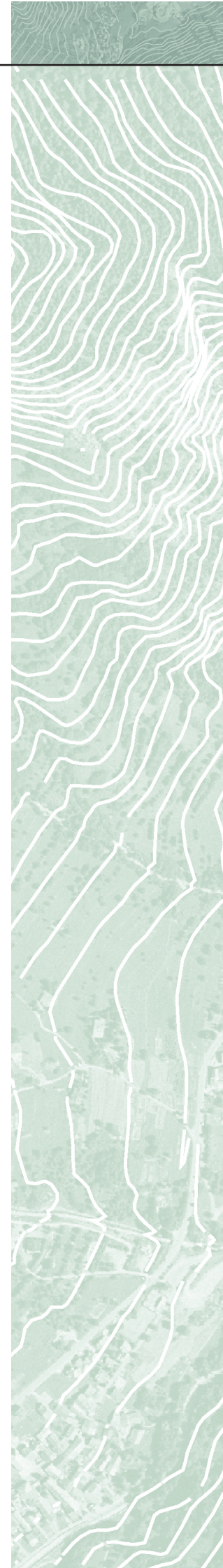
La previsione quantitativa di occorrenza dei fenomeni di crollo in roccia è difficile in relazione al fatto che l'innesco può avvenire per una combinazione complessa di piccole variazioni dei parametri geomeccanici (pressioni idrauliche, giaciture delle discontinuità, resistenza al taglio o a trazione, ecc.). Tali variazioni sono molte volte di difficile valutazione, in relazione al grado di incertezza con il quale è possibile conoscere le caratteristiche dell'ammasso roccioso costituente il versante. Un modo per tenerne conto consiste nell'introdurre metodologie di tipo meccanico all'interno di uno schema probabilistico, al fine di valutare come le incertezze sui parametri si riflettano sulle incertezze nei risultati (fattore di sicurezza) attraverso la probabilità di rottura o di distacco ( $P_f$ ). L'analisi della stabilità di un pendio in roccia da un punto di vista meccanico richiede la conoscenza di una serie di parametri riguardanti essenzialmente la geometria delle discontinuità (orientamento, posizione nel pendio, dimensioni e forma), la forma delle superfici ed eventualmente del materiale di riempimento in esse contenuto ed i parametri meccanici su scala reale e la loro degradazione nel tempo, da introdurre nella legge costitutiva del materiale e delle discontinuità al momento dell'analisi. È inoltre necessario conoscere le azioni presenti nel momento dell'analisi e la loro variazione nel tempo.

A partire da tali conoscenze viene costruito un modello geomeccanico del pendio, sul quale condurre analisi numeriche. Tale operazione, però, risulta particolarmente complessa nel caso di ammassi di grandi dimensioni, per i quali il valore dei parametri geometrici e meccanici non può essere determinato in ogni punto del pendio.

Il giudizio sulla stabilità di un pendio viene fornito sulla base del confronto tra il *fattore di sicurezza calcolato* e il *fattore di sicurezza di progetto*, stabilito da precedenti esperienze e fissato dalla Normativa Geotecnica. Convenzionalmente si calcola il fattore di sicurezza  $F$  come rapporto tra i valori rappresentativi delle azioni resistenti e delle azioni instabilizzanti (Hoek & Bray, 1981):

$$F = \frac{C^*}{D^*} \quad (2.3.1)$$

Le risultanti  $C^*$  e  $D^*$  sono funzioni dei parametri di ingresso, generalmente a carattere aleatorio;



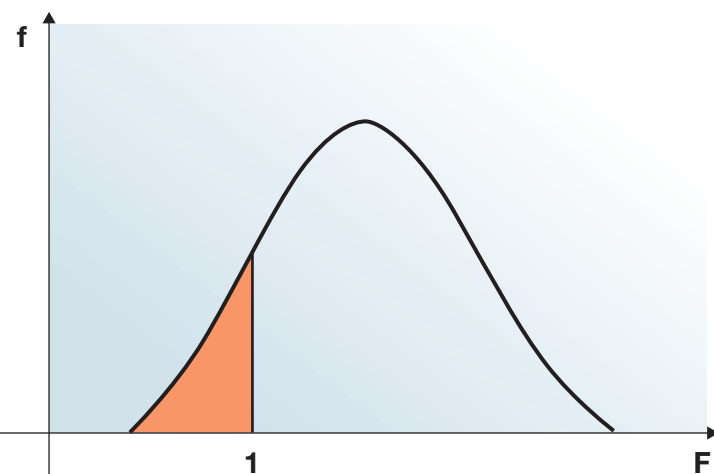
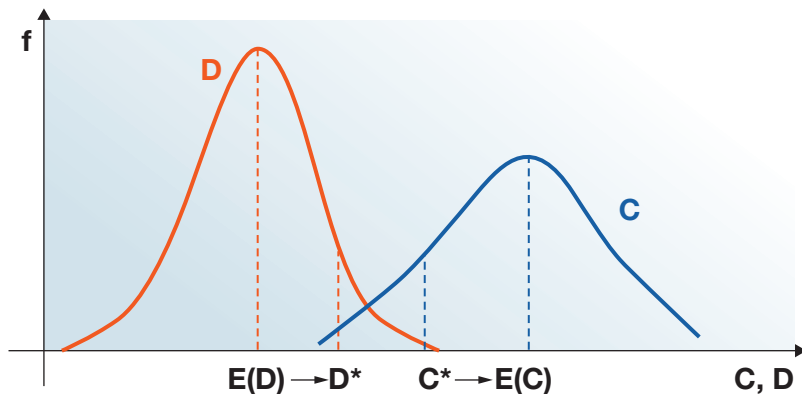
sono quindi rappresentate da distribuzioni di probabilità rispetto alle quali i valori di  $C^*$  e  $D^*$  costituiscono solo due possibili scelte. La loro individuazione può quindi risultare problematica ed assumendoli come rappresentativi delle intere rispettive distribuzioni, si attribuisce loro di fatto una probabilità pari ad 1.

Definiti come  $E(C)$  ed  $E(D)$  i valori medi delle azioni resistenti  $C$  ed instabilizzanti  $D$ , si assume allora un valore nominale  $C^*$  inferiore a  $E(C)$  ed un valore nominale  $D^*$ , superiore ad  $E(D)$ ; il fattore di sicurezza convenzionale  $F$  così ottenuto permette di fornire al pendio una *riserva di sicurezza* addizionale, di cui risulta ignota l'entità (figura 2.3.2).

Al fine di diminuire la soggettività della precedente formulazione, è possibile ricorrere all'approccio di tipo probabilistico, con il quale il fattore di sicurezza viene invece considerato come una vera e propria variabile aleatoria ed il giudizio sulla stabilità viene dato sulla base della probabilità  $P_f$ , detta di *rottura*, che il fattore di sicurezza sia inferiore all'unità (area colorata in figura 2.3.3):

$$P_f = P\left(\frac{C}{D} \leq 1\right) \quad (2.3.2)$$

**Figura 2.3.2**  
Distribuzione statistica  
delle forze instabilizzanti  
 $D$  e delle forze  
resistenti  $C$



**Figura 2.3.3**  
Definizione  
della probabilità  
di rottura

### 2.3.5.1

#### Il metodo di Monte Carlo

Tra i metodi probabilistici disponibili in letteratura si fa riferimento, nel seguito, alla tecnica di simulazione di Monte Carlo, per il cui utilizzo è essenziale il ricorso a codici di calcolo automatico. In sintesi, con tale tecnica, il processo di generazione della densità di probabilità del fattore di sicurezza si articola (Harr, 1987), a partire dalle distribuzioni cumulative di frequenza  $F(x_i)$  delle variabili di base  $z_i$ , in:

- 1) estrazione di un numero casuale  $R(0,1)$ , compreso tra 0 e 1, mediante generatori automatici;
- 2) assunzione di un valore  $F(x_i)$  pari a  $R(0,1)$ ;
- 3) calcolo del valore di  $z_i$  corrispondente a  $F(x_i)$ , in accordo con la particolare distribuzione cumulativa (figura 2.3.4);
- 4) calcolo deterministico del fattore di sicurezza  $F$ ;
- 5) ripetizione  $n$  volte dei punti 1-4 fino alla costruzione per punti della distribuzione statistica di  $F$ ;
- 6) valutazione della probabilità di rottura:
  - assumendo una legge di densità per  $F$  ricavando la probabilità che  $F$  sia minore di 1;
  - calcolando direttamente il rapporto:

$$P_f = \frac{n^*}{n} \quad (2.3.3)$$

dove  $n^*$  è il numero di  $F$  minori di 1 e  $n$  è il numero totale di campionamenti.

La valutazione di  $P_f$ , caratteristica dei metodi probabilistici completi, prevede la conoscenza delle distribuzioni statistiche delle variabili di base o dei loro istogrammi e può comportare un notevole impegno di tipo computazionale. Per tale motivo, il fattore di sicurezza viene calcolato con il metodo dell'equilibrio limite che, implementato con l'analisi probabilistica, rappresenta una soluzione rapida per lo studio della stabilità dei pendii.

### 2.3.5.2

#### Descrizione del metodo tridimensionale meccanico-probabilistico utilizzato

Il metodo di calcolo utilizzato nel corso del progetto, implementato nel codice di calcolo WINTAM, consente un'analisi di stabilità con il metodo dell'equilibrio limite di un pendio in roccia contenente un cuneo formato dall'intersezione di due discontinuità piane. È possibile considerare differenti resistenze al taglio sulle possibili superfici di scivolamento, introdurre un giunto di trazione, un'inclinazione qualsiasi della sommità del pendio, diverse distribuzioni della pressione dell'acqua ed eventuali forze esterne. L'analisi di stabilità è basata su una soluzione analitica scalare per il caso generale mostrato in figura 2.3.5.

Nel caso di analisi probabilistica, tutte le variabili sono assunte indipendenti. Sebbene per il codice di calcolo le variabili statistiche possano assumere distribuzione gaussiana, triangolare, uniforme, normale troncata, esponenziale o istogramma, nell'ambito del progetto la distribuzione di frequenza dei parametri geometrici viene considerata uniforme poiché, nell'ottica di un rilievo di terreno speditivo, la variabilità del dato viene fornita in termini di valore medio ed intervallo di variazione, al quale in prima approssimazione è realistico associare frequenza unitaria (ovvero, tutti i valori dell'intervallo di distribuzione hanno uguale probabilità di occorrenza). Il valore medio viene quindi considerato valore di base della distribuzione ed i valori minimo e massimo la massima distanza degli estremi della distribuzione dal valore medio, verso sinistra e verso destra rispettivamente, come indicato in **figura 2.3.6**.

La probabilità di rottura viene calcolata con il metodo Monte Carlo. Per ciascuna variabile viene cioè estratto un valore in accordo con la distribuzione statistica specificata e per ogni *set* di valori così ottenuto viene calcolato il volume coinvolto ed il relativo fattore di sicurezza. Al termine del campionamento viene svolta l'analisi statistica sul volume del cuneo e sul fattore di sicurezza ed il calcolo della probabilità di rottura come rapporto tra i numeri di casi in cui  $F$  è minore di uno e il numero totale di estrazioni.

### 2.3.6

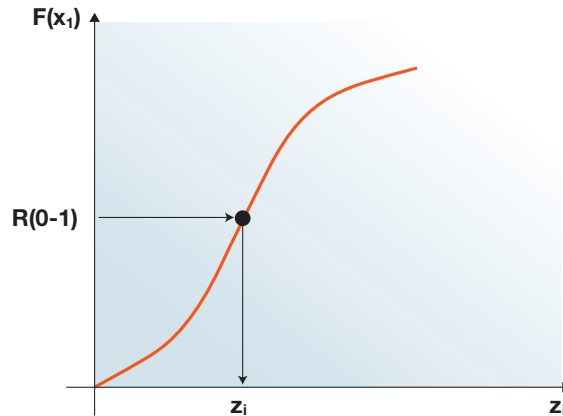
#### Fase di run out

In seguito al rilevamento delle principali famiglie di discontinuità presenti nelle aree campione selezionate, sono stati individuati i cinematismi in grado di dare origine a fenomeni di crollo che si verificano in conseguenza all'instabilità di un cuneo in roccia. Sono poi state svolte le indagini statistiche che hanno permesso, per ogni cinematismo individuato, di stimarne la probabilità di rottura e il volume di roccia coinvolto.

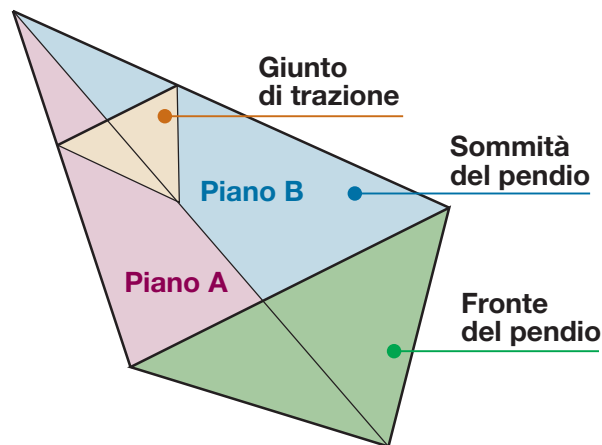
Questi dati, assieme ad altri parametri che verranno elencati in seguito, sono stati utilizzati per le simulazioni delle traiettorie di caduta dei massi.

Il software utilizzato per le elaborazioni è un programma nato per l'analisi dei pendii in cui possono verificarsi problemi di distacco in quota e successivo rotolamento a valle di blocchi di roccia, nonché per la progettazione delle opere di protezione.

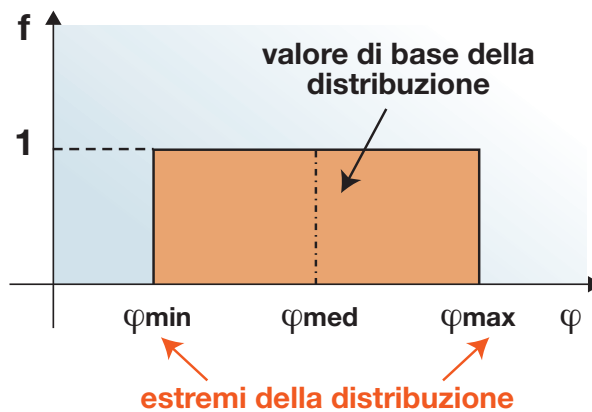
La soluzione adottata dal programma per lo studio di un problema così complesso consiste nell'uso di un approccio di tipo statistico che consente di determinare le *aree di probabilità* di arresto dei blocchi e la distribuzione delle energie cinetiche. L'utilizzo di tale software pertanto, permette di calcolare le curve di isofrequenza dei punti di arrivo, le curve isoenergetiche ricavate dall'elaborazione dei livelli di energia specifica media e massima (riferita all'unità di massa) e le traiettorie dei blocchi; possono inoltre essere calcolate le altezze massime dei rimbalzi.



**Figura 2.3.4**  
Simulazione di Monte Carlo: estrazione del valore della variabile  $z_i$ , avente distribuzione cumulativa  $F(x_i)$  assegnata



**Figura 2.3.5**  
Schema dei piani e delle linee di intersezione del cuneo usate nell'analisi di stabilità



**Figura 2.3.6**  
Distribuzione di frequenza uniforme dei parametri d'ingresso: definizione delle variabili

I parametri geomeccanici utilizzati nel modello sono stati definiti come coefficienti di restituzione energetica normale e tangenziale, coefficiente di attrito di roto-scivolamento ed angolo limite.

La definizione dei coefficienti di restituzione da associare alle diverse categorie di uso del suolo si è rivelata uno dei punti più sensibili dell'intero progetto, in quanto si è notato in fase di sperimentazione che una piccola variazione di tali parametri porta a notevoli modificazioni dei risultati forniti dal programma.

Al termine delle elaborazioni il programma di calcolo genera i seguenti file di *output*:

*Energia cinetica specifica media* – stima delle curve isoenergetiche ricavate dall'elaborazione dei livelli di

energia specifica media. Utilizzando una griglia uguale a quella costruita in fase di modellazione numerica del terreno ROTOMAP<sup>3D</sup> esegue il calcolo dell'energia di ogni tratto dello scendimento attribuendo al nodo più vicino il valore ottenuto. La somma dell'energia accumulata, divisa per il numero di segmenti associati al nodo, fornisce il valore dell'energia specifica media (J/kg) al nodo considerato.

*Energia cinetica specifica massima* – stima delle curve isoenergetiche ricavate dall'elaborazione dei livelli di energia specifica massima. Utilizzando una griglia uguale a quella del terreno, ROTOMAP<sup>3D</sup> esegue il calcolo dell'energia di ogni tratto dello scendimento attribuendo al nodo più vicino il valore massimo ottenuto. La somma dell'energia accumulata, divisa per il numero di segmenti associati al nodo, fornisce il valore dell'energia specifica massima (J/kg) al nodo considerato.

*Altezze massime di volo* – calcolo delle altezze massime raggiunte dai blocchi nelle fasi di volo e rimbalzo, per una verifica delle caratteristiche delle opere di protezione.

*Distribuzione punti di arresto* – grid che fornisce la distribuzione dei punti di arresto dei blocchi per evidenziare eventuali zone di accumulo e massima distanza percorsa dai massi.

*Indice di pericolosità* – l'indice di pericolosità è dato dal prodotto dell'energia cinetica (calcolata) per la probabilità di distacco (*input*). Tale valore viene quindi normalizzato rispetto alla spaziatura tra le maglie di partenza ed al numero di scendimenti simulati per ciascun punto di partenza. Il signifi-

### 2.3.7

#### Integrazione della procedura in ambiente GIS

L'intera procedura per la valutazione della traiettoria di caduta massi è stata integrata in ambiente GIS, mediante la creazione di un'interfaccia grafica che consente all'utente di inserire i parametri di *input* del codice di calcolo, di avviare la procedura di calcolo e di modificare il formato dei dati di *output* in modo da poter analizzare i risultati ottenuti con strumenti GIS.

Questo è un aspetto fondamentale per il processo di valutazione della pericolosità, in quanto consente di incrociare i risultati delle analisi cinematiche con gli strati informativi relativi alla litologia, uso del suolo, aree edificate, viabilità, ecc. e di ottenere in tempo reale una distribuzione delle aree maggiormente vulnerabili.

### 2.3.8

#### Esempio di applicazione

L'intero processo di sperimentazione è poi stato testato su alcune aree campione della provincia di Torino tra le quali la porzione di versante compresa tra gli abitati di Exilles e Cels (versante sinistro della Media Val di Susa), un'area di circa 1.5 km<sup>2</sup> compresa tra 850 m e 1'400 m di quota ed avente una giacitura media del versante stimata in 150°/60°. Le pareti rocciose del versante oggetto di studio sono costituite da micascisti compatti con locali intercalazioni di dimensioni pluridecametriche, localmente ettometriche, di anfiboliti listate appartenenti all'unità pre-triassica del Massiccio d'Ambin e più precisamente alla serie di Clarea. Nelle pareti rocciose esaminate storicamente si sono verificati numerosi crolli che hanno interessato la frazione Cels (località Morliere) ed alcuni tratti della S.S. n. 24.

Dai rilievi speditivi di campagna effettuati sono state individuate 16 aree omogenee nel settore Cels-Exilles (evidenziate in rosso e numerate da 1 a 16 in **figura 2.3.8**).

#### 2.3.8.1

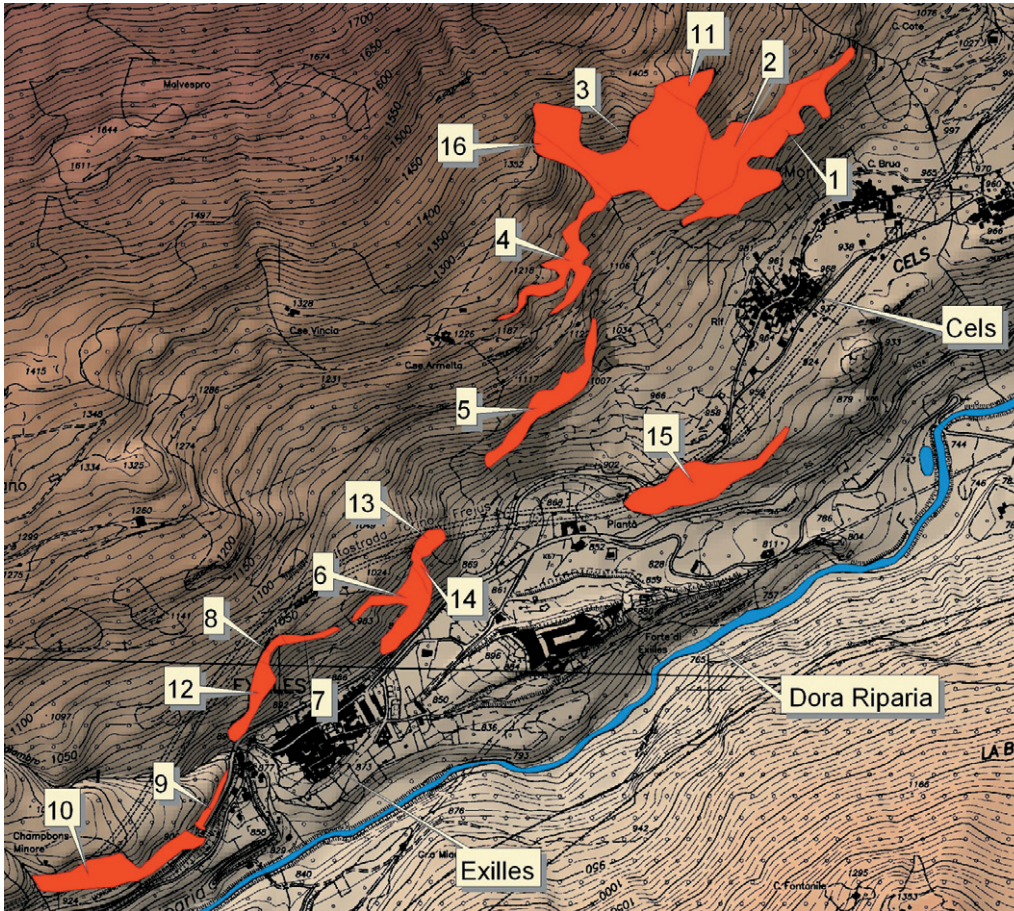
##### Analisi probabilistiche

Una successiva e più approfondita analisi dei cinematici rilevati sul terreno ha evidenziato che solo alcune delle aree omogenee presentano al loro interno cinematici con giaciture in grado di dare origine a cunei di roccia potenzialmente instabili. Più precisamente, perciò, solo le aree omogenee 1, 2, 4, 9, 15 e 16 presentano le caratteristiche idonee per la sperimentazione del modello previsionale allo stato attuale della ricerca. Per l'analisi degli altri settori omogenei, nei quali è stata rilevata la presenza di possibili cinematici per scioglimento planare (e, più raramente, di ribaltamenti), è necessario utilizzare un metodo mec-

**Figura 2.3.7**  
Interfaccia grafica mediante cui è possibile gestire l'applicativo ROTOMAP<sup>3D</sup> in ambiente ESRI<sup>®</sup> ArcView

Configurazione	
Nome File Topografia	c:\programmi\rotomap_csi_piemonte\datidiprova\dtm
Nome File Probabilità Distacco	c:\programmi\rotomap_csi_piemonte\datidiprova\pkv
Nome File Numerazione Aree	c:\programmi\rotomap_csi_piemonte\datidiprova\aree_omo
Nome File Coefficienti Normali	c:\programmi\rotomap_csi_piemonte\datidiprova\kn
Nome File Coefficienti Tangenziali	c:\programmi\rotomap_csi_piemonte\datidiprova\kt
Nome File Coefficienti Attrito	c:\programmi\rotomap_csi_piemonte\datidiprova\phi
Angolo Limite Decollo	6
Angolo Limite Uito	6
Angolo Limite Rimbalzo	6
Numero Punti di Partenza per Maglia	1
Passo in Maglie Punti di Partenza	1
Numero Velocità Iniziali	1
Velocità Iniziale Minima	0.1
Velocità Iniziale Massima	0.1
Numero Deviazioni Angolari	1
Deviazione Angolare Massima	0

cato pratico, a meno del termine di probabilità, è riassumibile come l'energia totale che dovrebbe essere assorbita da un metro lineare di rete paramassi. Introducendo il termine di probabilità, il risultato assume un significato di probabilità spaziale relativa. Il termine pericolosità in questo lavoro è usato nell'accezione di probabilità di accadimento spaziale relativa e non nel significato classico di probabilità di occorrenza temporale.



**Figura 2.3.8**  
Ubicazione  
dell'area campione  
di Cels-Exilles.  
In rosso sono evidenziate  
le aree omogenee  
identificate durante  
le osservazioni  
di campagna

canico adeguato, la cui implementazione in un codice probabilistico sarà oggetto degli sviluppi futuri dell'attività.

A causa dell'alta variabilità nell'orientazione del versante nell'area di studio, in alcuni casi si è ripetuta l'analisi di un cinematicismo considerando sia l'orientazione media del settore omogeneo di interesse, sia una orientazione "locale", indicata nel corso del rilievo di terreno. Tale soluzione è stata adottata nei casi in cui in un settore si è rilevata la presenza di condizioni strutturali omogenee con variazioni locali del fronte.

A titolo di esempio, in **tabella 2.3.1** sono indicati i parametri geometrici di *input* del cuneo 15\_4\_fl (sette 15, cinematicismo 4, fronte locale), rappresentato in **figura 2.3.9**. I parametri indicati in tabella sono: orientazione dei piani di discontinuità su cui avviene lo scivolamento (piano A e piano B), orientazione del giunto di trazione (GT) e del fronte locale (FL), spaziatura del giunto di trazione ed altezza del cuneo (H). Salvo l'altezza del cuneo, fornita in termini deterministici, per ciascun parametro viene indicato il valore medio e l'intervallo di variazione della distribuzione a sinistra ed a destra di tale valore, che definiscono rispettivamente il valore minimo e massimo. Si ricorda che la distribuzione di frequenza è considerata, in modo molto semplificato, uniforme; ciò significa che tutti i valori dell'intervallo compreso tra il minimo ed il massimo hanno la stessa probabilità di essere estratti durante la simulazione di Monte Carlo.

Per quanto riguarda i parametri di resistenza della discontinuità costituenti il cuneo, il rilievo di terreno speditivo non fornisce alcuna indicazione. A favore di sicurezza è stata perciò considerata sempre nulla la coesione (si prendono in considerazione cioè discontinuità completamente persistenti non interessate dalla presenza di ponti di roccia), mentre per l'angolo di attrito si è adottato un valore residuo pari a 25° su tutti i piani.

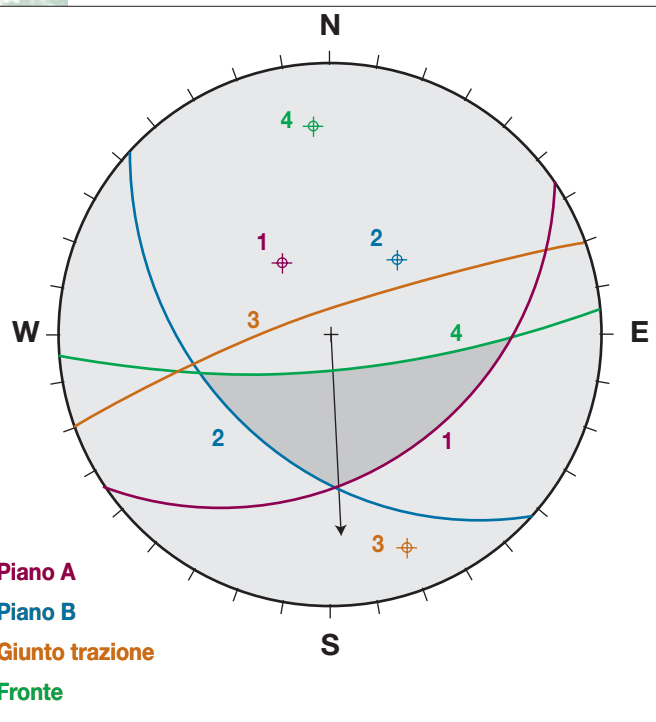
In **tabella 2.3.1** sono riportati anche i risultati dell'analisi meccanico-probabilistica, in termini di probabilità di rottura e di valore medio del fattore di sicurezza. A tale proposito è necessario osservare che, a causa della variabilità dei parametri geometrici di ingresso, non sempre i set di valori campionati tramite la tecnica di Monte Carlo risultano dare origine ad un cuneo potenzialmente instabile. Tali casi vengono classificati come *impossibili* ed equiparati, per il calcolo della probabilità di rottura, ai casi di cunei *possibili*, ma il cui fattore di sicurezza risulta  $> 1$  (cioè stabili). Infine, in **figura 2.3.10** i risultati dell'analisi sono forniti in termini di distribuzione di frequenza del fattore di sicurezza, calcolato sui casi possibili (78.8% del totale) campionati tramite la tecnica di Monte Carlo e dei volumi risultanti. Da quest'ultima distribuzione risulta in particolare che il 68% circa dei cunei analizzati presenta un volume inferiore a 1 m<sup>3</sup> e solo il 6% un volume superiore a 4 m<sup>3</sup> (tale percentuale scende ulteriormente al 2% se si considerano volumi superiori a 10 m<sup>3</sup>).



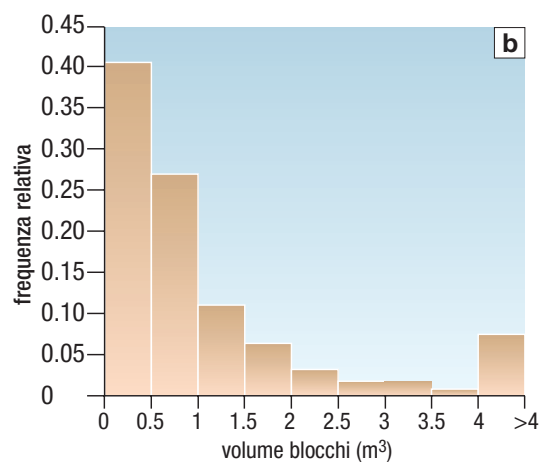
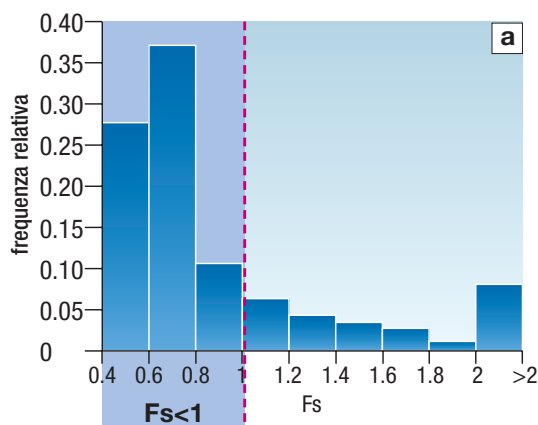
**Figura 2.3.9**  
Stereogramma  
rappresentativo  
del cuneo 15\_4 fl  
(valori medi)

**TABELLA 2.3.1** PARAMETRI GEOMETRICI DI INPUT PER IL CUNEO 15\_4\_FL (SETTORE 15, CUNEO 4, FRONTE LOCALE)  
E RISULTATI DELL'ANALISI MECCANICO-PROBABILISTICA

PIANI	IMMERSIONE [°]			INCLINAZIONE [°]			SPAZIATURA [m]			H [m]	Casi impossibili [%]	Fs medio [-]	P <sub>f</sub> [%]
	min.	med.	max	min.	med.	max	min.	med.	max				
A	140	145	150	30	35	40				3	21.2	0.96	59.1
B	214	222	230	5	40	75							
GT	320	340	360	75	80	85	2	3	2				
FL	155	175	195	40	60	80							



**Figura 2.3.10**  
Risultati dell'analisi  
probabilistica in termini  
di distribuzione  
dei fattori di sicurezza  
(a) e dei volumi  
campionati (b)



### 2.3.8.2 Analisi cinematiche

Il lavoro di sperimentazione cinematica effettuato sull'area campione Cels-Exilles è consistito nell'elaborazione di una serie di scenari per mezzo del modello previsionale e nel successivo confronto dei risultati ottenuti con i dati storici e raccolti in fase di rilevamento (ubicazione dei punti di arresto dei massi in seguito a crolli avvenuti in passato). Questo processo ha portato alla progressiva

modifica dei parametri di *input* del modello, in special modo i coefficienti di restituzione e di attrito e gli angoli limite di urto, rimbalzo, e decollo, al fine di ottenere, tramite iterazioni successive, dei risultati ogni volta più vicini ad un reale comportamento dei massi in caso di crollo nei due settori oggetto di studio.

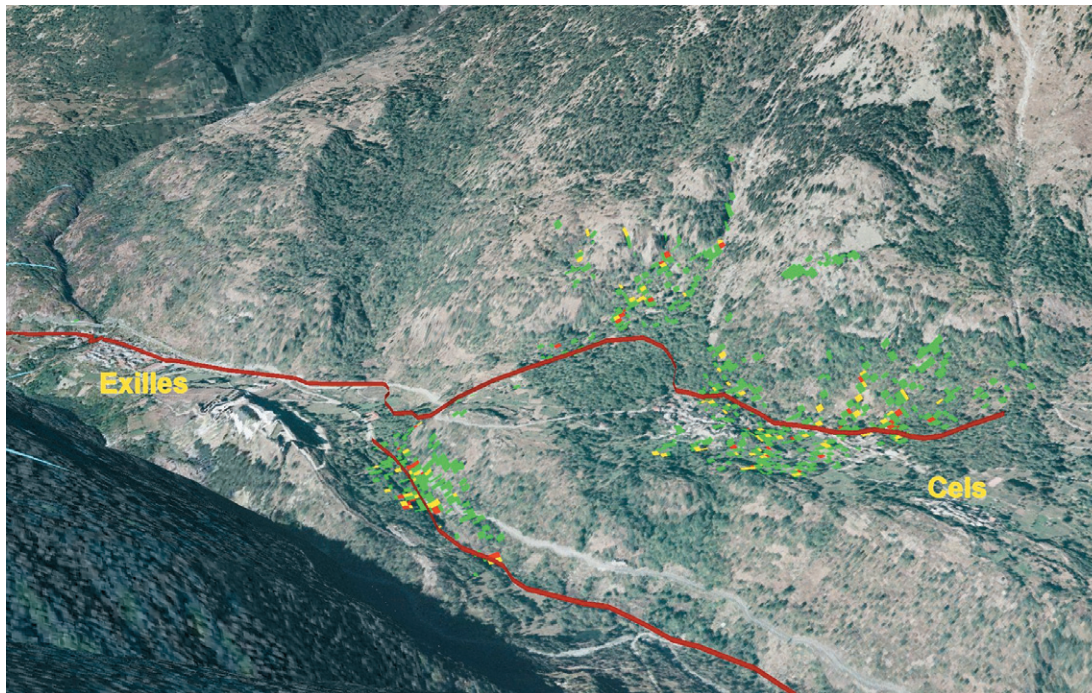
Le figure seguenti mostrano i risultati delle elaborazioni effettuate sull'area campione. In **figura 2.3.11** viene mostrata la distribuzione dei punti di arresto dei massi lungo il versante. In colore giallo e rosso sono evidenziate le celle all'interno delle quali si fermano due (giallo) o più massi (rosso).

In **figura 2.3.12** viene visualizzata la distribuzione spaziale del parametro *Indice di Pericolosità* elaborata dal codice di calcolo. In giallo e rosso sono evidenziate le aree più interessate da un eventuale fenomeno di crollo. Dalle analisi effettuate sui risultati ottenuti dalla sperimentazione è stato riscontrato come le traiettorie di caduta stimate dal modello previsionale seguano un andamento coerente con la morfologia del versante; inoltre va constatato come i punti di arresto dei massi presentino una distribuzione

tendenzialmente in linea con i dati storici: le linee continue rosse delle **figure 2.3.11** e **2.3.12** rappresentano infatti la disposizione spaziale dei punti di arresto dei massi caduti in passato nelle aree oggetto di studio.

### 2.3.9 Considerazioni finali

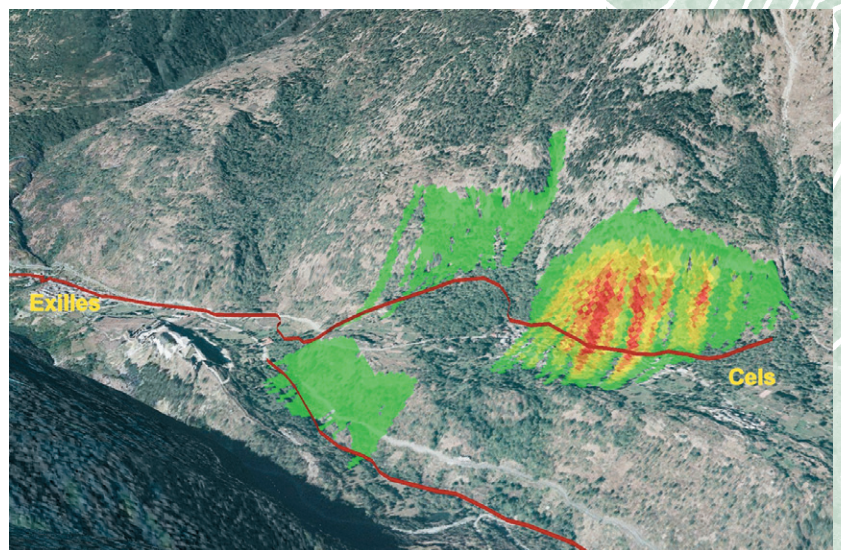
Scopo del presente studio era lo sviluppo di una metodologia per la definizione della pericolosità



**Figura 2.3.11**  
Sito di Exilles: distribuzione dei punti di arresto dei massi. In verde sono indicate le celle nelle quali si è fermato un masso, in giallo quelle in cui si sono avuti due arresti, in rosso, infine, un numero di massi superiore a due. La linea rossa è l'involuppo dei punti storici di massimo arresto dei massi

da fenomeni di crollo utilizzabile a media e grande scala che tenesse conto del parametro probabilità di distacco. Sulla base dei risultati ottenuti nelle fasi di sperimentazione e taratura del modello si può osservare quanto segue:

- i risultati ottenuti alla fine dell'intero processo di sperimentazione rispecchiano abbastanza fedelmente i dati pregressi raccolti durante le osservazioni di campagna, a conferma che il modello previsionale risulta correttamente tarato, soprattutto tenendo conto del fatto che si tratta di una metodologia di previsione della pericolosità di crolli nata per essere utilizzata a scala territorialmente ampia;
- la metodologia sperimentata e gli strumenti utilizzati hanno permesso di lavorare con dati georiferiti durante tutte le fasi di progetto; un aspetto che si è rivelato essenziale per la corretta interpretazione dei risultati durante il processo di taratura dei coefficienti di restituzione e di attrito. La completa integrazione in ambiente GIS della componente cinematica inoltre ha reso possibile l'immediato incrocio dei risultati ottenuti con i *dataset* geografici di Arpa Piemonte, un aspetto fondamentale per l'individuazione delle zone maggiormente vulnerabili a fenomeni quali i crolli in roccia;
- il processo di taratura che ha portato alla definizione dei coefficienti di restituzione e di attrito permetterà di predisporre dei *dataset* geografici a scala regionale di tali parametri. Questi, unitamente alle altre banche dati geografiche disponibili (carta d'uso del suolo, ortofoto a colori, carta tecnica regionale numerica, ecc.) renderanno possibile l'utilizzo del modello previsionale in ambito regionale con un dispendio di tempo e risorse decisamente contenuti;



**Figura 2.3.12**  
Sito di Exilles: distribuzione dell'indice di pericolosità: in giallo e rosso le aree a pericolosità più elevata. Per la legenda si faccia riferimento a quella della figura 2.3.11

- è da notare che tale risultato prende in conto unicamente l'insorgenza di cinematismi a cuneo, sebbene molti cinematismi di tipo planare siano stati evidenziati nel corso dei rilievi speditivi. Lo scopo dello studio era infatti quello di mettere a punto una metodologia automatica di definizione della pericolosità (intesa come previsione spaziale relativa e non nell'accezione classica di probabilità di occorrenza), perciò si è preferito concentrare le risorse sull'integrazione delle tre principali "componenti" (raccolta speditiva dei dati, componente probabilistica e componente cinematica) di tale metodologia e sulla loro applicazione a casi di studio reali, lasciando agli sviluppi futuri della ricerca il calcolo della probabilità di rottura per cinematismi diversi da quelli a cuneo.

## Bibliografia

I lavori contrassegnati da asterisco non sono citati esplicitamente nel testo.

Arpa Piemonte (2004), *Progetto IFFI - Inventario Fenomeni Franosi in Italia, l'esperienza in Piemonte*. Centro Regionale per le Ricerche Geologiche e Territoriali.

Azzoni A., La Barbera G. & Mazzà G. (1991), *Studio con modello matematico e con sperimentazione in sito del problema di caduta massi*. Bollettino Associazione Mineraria Subalpina, Torino 28 (4), pp. 547-573.

Azzoni A. & de Freitas M.H. (1995), *Experimentally gained parameters, decisive for rockfall analysis*. Rock Mechanics and Rock Engineering 28 (2), pp. 111-124.

Broili L. (1973), *In situ tests for the study of rockfall*. Geologia Applicata e Idrogeologia 8 (1), pp. 105-111.

Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996), *Landslide types and processes*. In Landslides investigation and mitigation, Turner A.K. & Schuster R.L. (eds), Transportation research Board, National research Council, Special Report n. 247, National academy Press, Washington D.C., cap. 3, pp. 36-75.

\*Fontan D. (2003), *Valutazione della pericolosità dei fenomeni di caduta massi, proposta per il rilevamento speditivo dei giunti in parete rocciose e delle caratteristiche del pendio sottostante*. Relazione Geologica. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica (rapporto interno).

Geo & Soft International (2003), *ISOMAP & ROTOMAP for Windows (3D surface modelling & rockfall analysis), User's guide*. Torino, Italy.

Guzzetti F, Crosta G. Detti R. & Agliardi F. (2002), *STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls*. Computers & Geosciences, vol. 28, pp. 1079-1093.

Harr M.E. (1987), *Reliability-based design in civil engineering*. New York, McGraw-Hill Book Company.

Hoek E. (2000), *Practical Rock Engineering*. Course notes, ([www.rockscience.com](http://www.rockscience.com)).

Hoek E. & Bray J.W. (1981), *Rock Slope Engineering*. Institute of Mining & Metallurgy. London.

Jaboyedoff M., Philipposian F., Mamin M., Marro Ch. & Rouiller J.D. (1996), *Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise. Approche statistique et probabiliste*. PNR31. Hochschulverlag AG an der ETH Zurich.

Jones C.L., Higgins J.D. & Andrew R.D. (2000), *Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0*. Colorado Department of Transportation, Colorado Geological Survey, March 2000, pp. 127.

Major J., Marder F. & Kim H.S. (1974), *WINTAM (Wedge along line of intersection analysis including Monte Carlo simulation)*. Mining Research Laboratories, CANMET, Department of Energy, Mines and Resources.

Pahl P.J. (1981), *Estimating the mean length of discontinuity traces*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 18, pp. 221-228.

Pierson L.A., Davis S.A. & Van Vickle R. (1990), *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*. Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWAOR-EG-90-01. FHWA, U.S. Department of Transportation.

Ritchie A.M. (1963), *Evaluation of Rockfall and its Control*. Highway Research Board, Highway Research Record, National Academy of Sciences-National Research Council. Washington, DC, Vol. 17, pp. 13-28.

Rouiller J.D., Jaboyedoff M., Marro Ch., Philipposian F. & Mamin M. (1998), *Pentes instables dans le Pennique Valaisian. Matterock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboullements majeurs potentiels*. Rapport final PNR 31. Hochschulverlag AG an der ETH Zurich.

Varnes D.J. (1978), *Slope movement types and processes*. In Schuster R.L., and Krizek R.J. (Eds) *Landslides analysis and control*. Transportation Research Board, Special Report 176, pp. 12-33. Washington D.C.: National Academy of Sciences.