



Dimensionamento di interventi di consolidamento e difesa in pendii in roccia

Gessica Umili

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

SOMMARIO:

- **Introduzione: fenomeni di crollo, ribaltamento e scivolamento**
- **Interventi di consolidamento e mitigazione del rischio da caduta massi**
- **Normativa di riferimento**
- **Calcolo del blocco di progetto**
- **Progettazione su base energetica**
- **Effetto della forma del blocco di progetto**
- **Reliability State Design applicato a opere di protezione da caduta massi**
- **Esempio di automatizzazione dei Test di Markland**



DEFINIZIONI UTILIZZATE NELL'INVENTARIO FENOMENI FRANOSI IN ITALIA (IFFI)

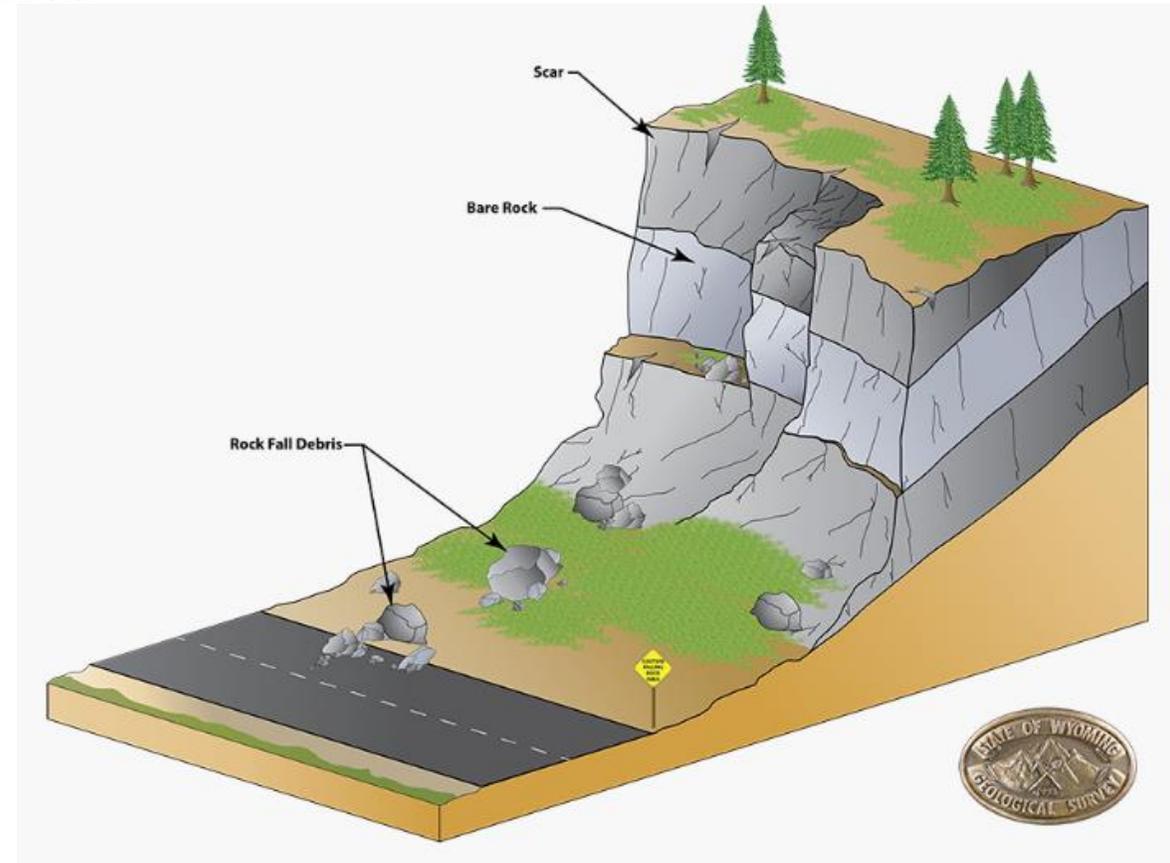
CROLLO

Il fenomeno di crollo inizia con il distacco di roccia da un pendio. La massa si muove inizialmente in aria per caduta libera e, successivamente all'impatto con il terreno, per salti, rimbalzi e per rotolamento, frantumandosi in elementi di dimensioni variabili.

E' un movimento improvviso ed estremamente rapido.

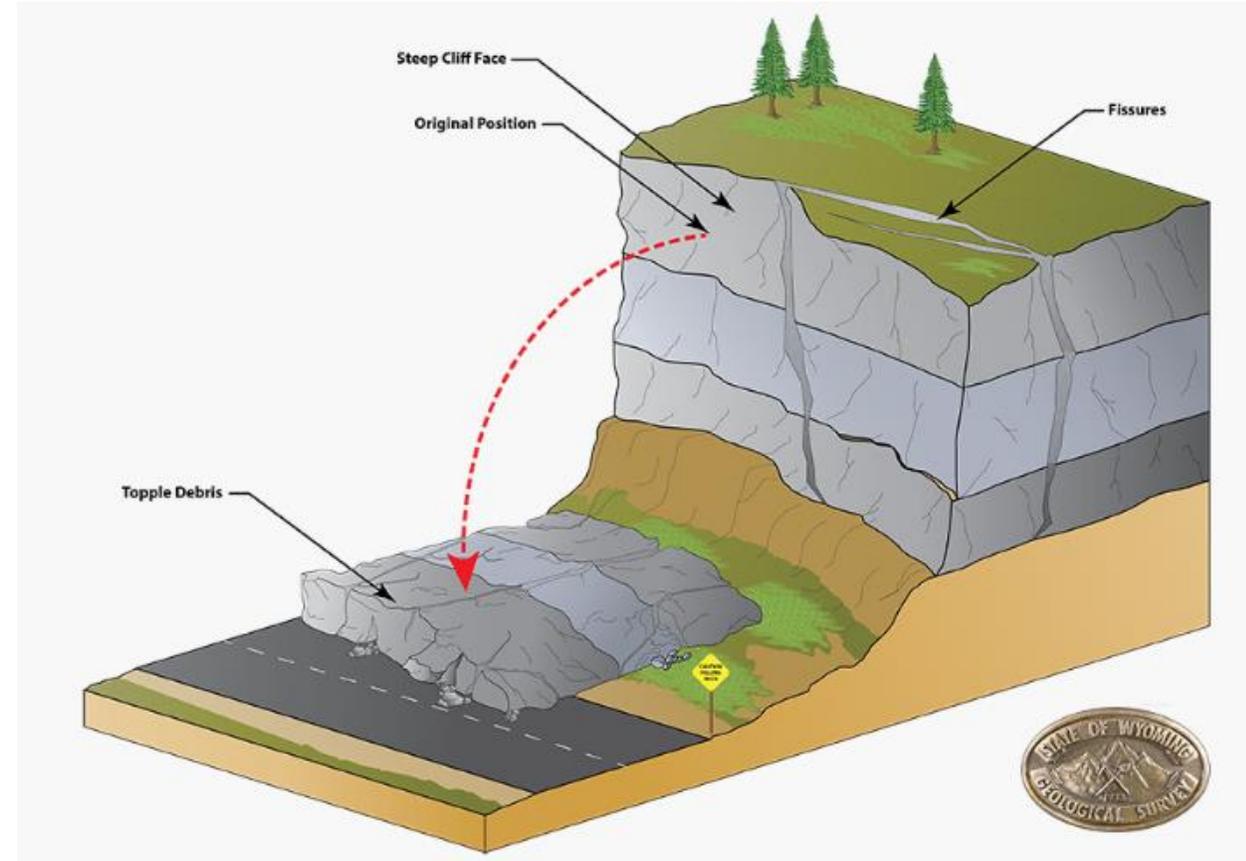
La spaziatura tra i sistemi di discontinuità determina la dimensione dei blocchi.

La distanza percorsa dai blocchi dalla nicchia di distacco alla zona di accumulo dipende da diversi parametri, quali l'acclività, la morfologia, l'uso del suolo, ecc..



RIBALTAMENTO

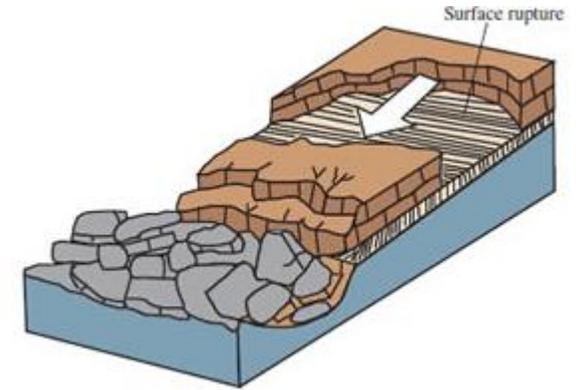
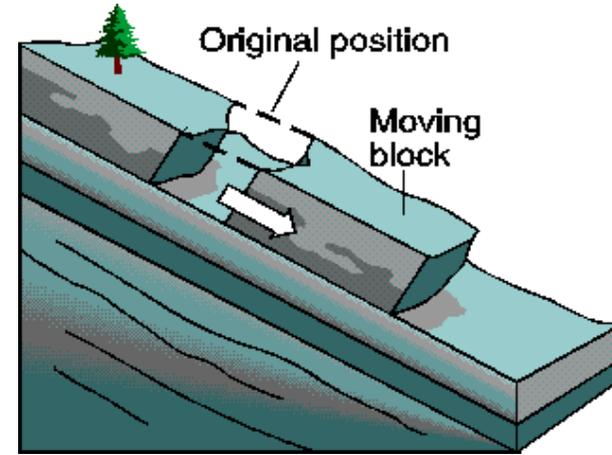
I ribaltamenti sono rotazioni in avanti, verso l'esterno del versante, di una massa di roccia, attorno ad un punto situato al di sotto del baricentro della massa in movimento.



SCIVOLAMENTO TRASLATIVO

Spostamento di massa lungo una o più superfici di scivolamento lungo le quali viene superata la resistenza al taglio.

Interessano generalmente alternanze litologiche; le superfici di scivolamento si impostano su discontinuità o piani di strato a franapoggio con inclinazione minore del pendio.



INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE DI VERSANTI ROCCIOSI SOGGETTI A FENOMENI DI RIBALTAMENTO, SCIVOLAMENTO E CROLLO

a) INTERVENTI ATTIVI: migliorano le caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi e impediscono il distacco di blocchi

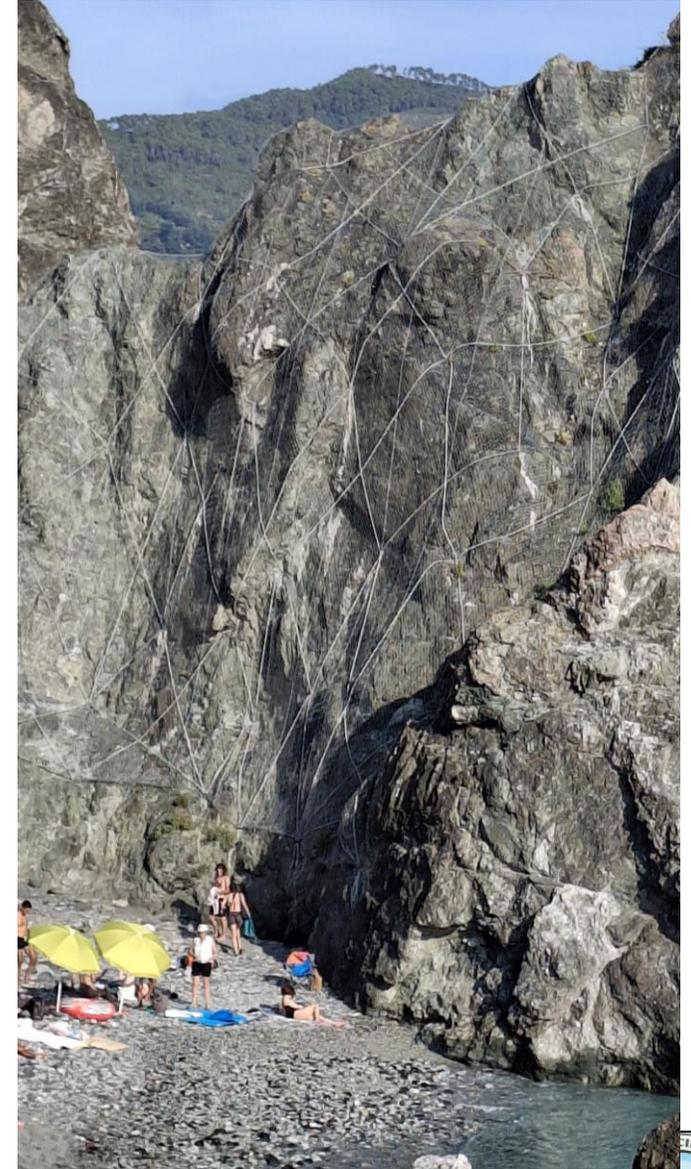
TIRANTI: elementi strutturali capaci di trasmettere forze di trazione al materiale

CHIODI E BULLONI: stabilizzano blocchi di roccia isolati da discontinuità vincolandoli a porzioni di roccia intatta. Non agiscono singolarmente, ma come insiemi disposti secondo una griglia.

RETE AD ALTA RESISTENZA CON FUNI DI ORDITURA, CHIODATURA E PIASTRE DI RIPARTIZIONE: stabilizzazione di aggetti e porzioni instabili di alcuni metri di spessore.

SPRITZ BETON: rivestimento della superficie affiorante dell'ammasso roccioso con uno strato di calcestruzzo, spruzzato in pressione sulla superficie rocciosa. E' possibile incorporare anche rete metallica per migliorare ulteriormente la resistenza a taglio dell'ammasso roccioso.

INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE DI VERSANTI ROCCIOSI SOGGETTI A FENOMENI DI RIBALTAMENTO, SCIVOLAMENTO E CROLLO



INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE DI VERSANTI ROCCIOSI SOGGETTI A FENOMENI DI RIBALTAMENTO, SCIVOLAMENTO E CROLLO

b) INTERVENTI PASSIVI: si limitano a proteggere passivamente le infrastrutture adiacenti ai versanti instabili, intercettando o deviando i blocchi mobilizzati, senza agire sulle cause responsabili dei fenomeni di crollo/ribaltamento.

RETI PARAMASSI IN ADERENZA: costituite da fili di acciaio zincato intrecciati in maglie poligonali, rinforzate mediante funi costituite da trefoli. Aderiscono ai versanti e ne sono ancorate.

RILEVATI E VALLI PARAMASSI: i rilevati sono terrapieni a sezione trapezia, costituiti di materiale grossolano, posti alla base dei versanti soggetti a caduta massi. Possono avere uno sviluppo lineare notevole (centinaia di metri). Il sistema è completato da uno scavo sagomato (vallo) posto immediatamente a monte del terrapieno.

BARRIERE PARAMASSI: strutture elastiche ad elevato assorbimento di energia, dotate di freni, dimensionate e posizionate in modo da intercettare le traiettorie dei massi in caduta ed arrestarne il moto.

GALLERIE PARAMASSI: strutture in calcestruzzo armato atte a proteggere tratti stradali; deviano le traiettorie dei blocchi.

INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE DI VERSANTI ROCCIOSI SOGGETTI A FENOMENI DI RIBALTAMENTO, SCIVOLAMENTO E CROLLO



NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- **NORMA UNI 11211 « Opere di difesa contro la caduta massi »**
 - Parte 1: Termini e definizioni
 - Parte 2: Programma preliminare di intervento
 - Parte 3: Progetto preliminare
 - Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo
 - Parte 5: Ispezione, monitoraggio, manutenzione e ruolo dei gestori

analisi di caduta massi: Raccolta di dati storici e dei parametri che influenzano la caduta massi su un versante (condizioni geologiche, litologiche, geomeccaniche, geomorfologiche, vegetazionali) e successive elaborazioni che consentono di perimetrare le aree di distacco, analizzare la propagazione delle traiettorie di caduta e delimitare le aree con differente pericolosità.

analisi delle traiettorie di caduta: Analisi del moto di caduta dei massi che consente di determinare parametri progettuali quali l'altezza, la velocità, l'energia e i punti di arresto delle traiettorie di caduta. Può essere eseguita utilizzando parametri di descrizione del moto su base bibliografica, oppure modulando gli stessi fino ad ottenere le traiettorie di caduta di scoscendimenti già avvenuti (analisi a ritroso o analisi a posteriori). Le analisi eseguite con approccio probabilistico assumono un percentile di riferimento non minore del 95%.

Qualunque sia la tipologia dell'opera di difesa in progetto, le azioni si riferiscono al caso di crollo di un masso isolato o di uno sciame di massi che agiscono sull'opera di protezione in condizioni temporali tali da poter essere considerati come un unico evento.

L'energia cinetica sollecitante di progetto E_{Sd} è pertanto determinata

$$E_{Sd} = 1/2 m_d V_d^2$$

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 dei blocchi (v_d) è definita come la velocità in corrispondenza del punto di impatto con l'opera corrispondente al frattile del 95% delle velocità calcolate (v_t) nelle analisi delle traiettorie moltiplicata per il coefficiente di amplificazione (γ_f) definito come:

$$v_d = v_t \times \gamma_f \quad (1)$$

dove:

v_d è la velocità di progetto dei blocchi;

v_t sono le velocità calcolate nelle analisi delle traiettorie;

γ_f è espresso come $\gamma_f = \gamma_{Tr} \times \gamma_{Dp}$

dove:

γ_{Tr} è il coefficiente di affidabilità di calcolo delle traiettorie che vale:

- = 1,02 per simulazioni di caduta basate su coefficiente di restituzione ottenuti da analisi a ritroso,
- = 1,10 per simulazioni di caduta basate su coefficiente di restituzione derivati da sole informazioni bibliografiche;

γ_{Dp} è il coefficiente che tiene conto della qualità della discretizzazione topografica del pendio:

- = 1,02 per pendii discretizzati con rilievo topografico di buona precisione in rapporto alle caratteristiche del sito,
- = 1,10 per pendii discretizzati con precisione media-bassa.

La massa del blocco di progetto (m_d) è definita come il prodotto del volume del blocco di progetto (Vol_b) per la massa per unità di volume della roccia (γ) moltiplicato per un coefficiente di amplificazione:

$$m_d = (Vol_b \times \gamma) \gamma_m \quad (2)$$

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 coefficiente di amplificazione espresso come

$$\gamma_m = \gamma_{VolF1} \times \gamma_\psi \quad (3)$$

dove:

γ_ψ è il coefficiente legato alla valutazione della massa per unità di volume della roccia, che può essere generalmente assunto pari a 1,00;

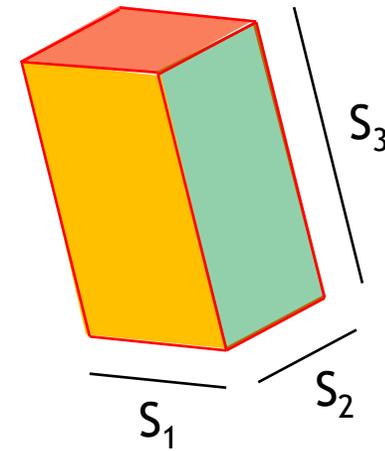
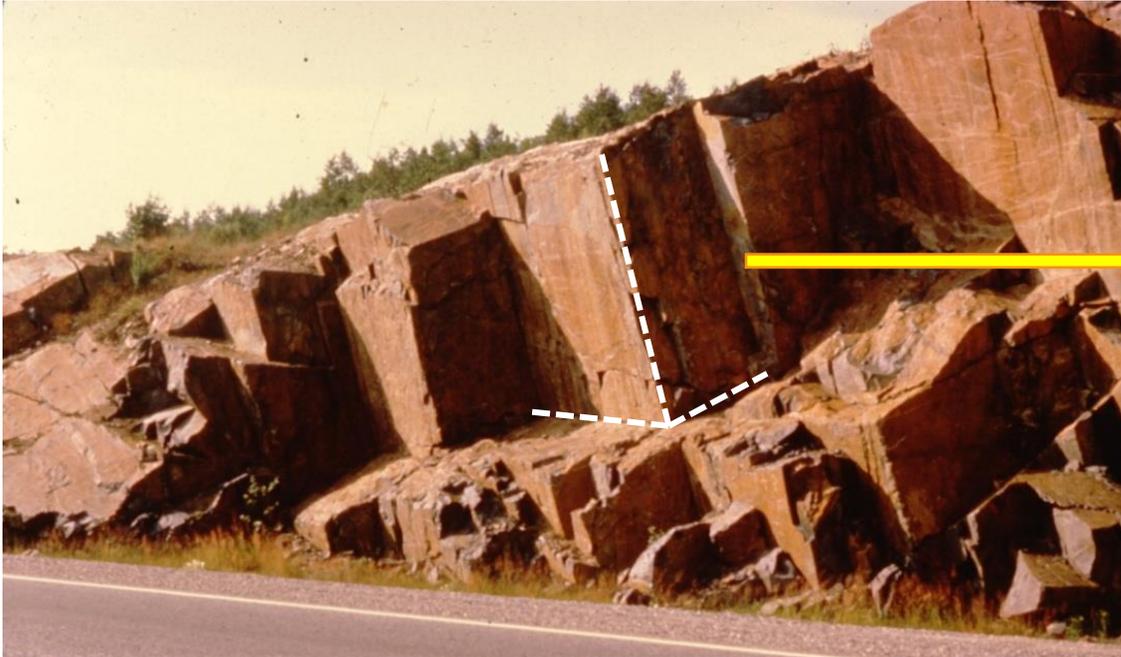
γ_{VolF1} è il coefficiente legato alla precisione del rilievo del volume del blocco di progetto, che vale:

- = 1,02 per rilievi accurati della parete (per esempio mediante tecniche fotogrammetriche, topografiche di precisione, rilievi geomeccanici sistematici in parete, misurazione dei blocchi presenti sul detrito alla base delle pareti),
- = 1,1 in assenza di rilievi finalizzati al progetto.

Ora occupiamoci del blocco di progetto....

CALCOLO DEL BLOCCO DI PROGETTO

Nell'ammasso roccioso, la giacitura dei piani di discontinuità può favorire la formazione di blocchi...



l'intersezione di almeno 3 piani di discontinuità può generare un blocco ...

... la loro orientazione ne determina la forma, la loro spaziatura ne determina le dimensioni.

MA orientazione e spaziatura dei piani appartenenti alle diverse famiglie di discontinuità variano all'interno dello stesso ammasso roccioso



Volume e forma del blocco presentano una variabilità più o meno significativa all'interno dello stesso ammasso roccioso!

CALCOLO DEL BLOCCO DI PROGETTO

Metodo analitico

$$V_B = \frac{S_1 S_2 S_3}{\sin \gamma_{12} \sin \gamma_{23} \sin \gamma_{31}}$$

**Palmström
(1996)**

Valida limitatamente ad
alcune configurazioni
geometriche!

$$V_B = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{q}$$

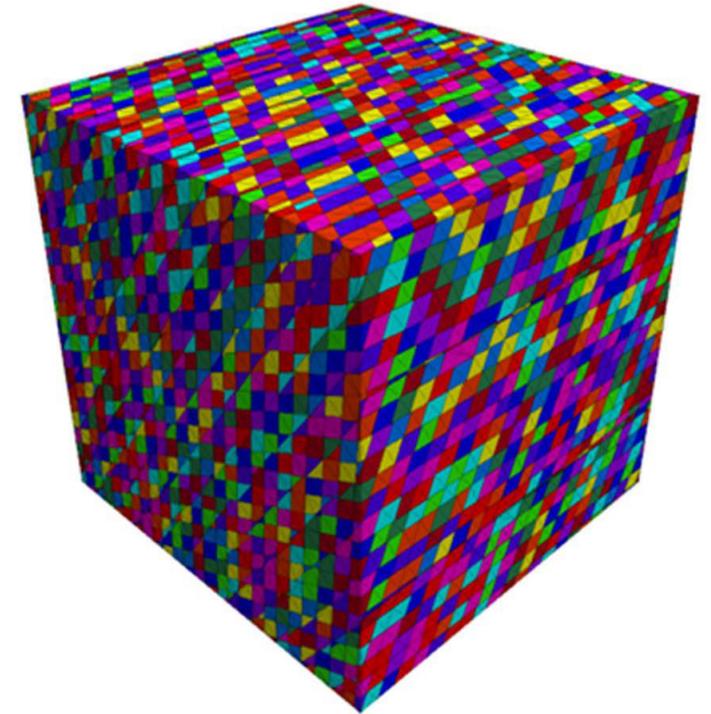
**Umili et al.
(2024)**

$$q = \sin \gamma_{12} \cos \delta_{3-12} = \sin \gamma_{23} \cos \delta_{1-23} = \sin \gamma_{31} \cos \delta_{2-31}$$

dove:

- S_1, S_2, S_3 sono le spaziatore delle 3 famiglie di discontinuità
- $\gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}$ sono gli angoli tra coppie di famiglie di discontinuità
- δ_{3-12} è l'angolo tra la famiglia 3 e la normale alle famiglie 1 e 2

Discrete Fracture Network (DFN)



Palmström A. (1996). *Characterizing rock masses by the RMI for Use in Practical Rock Engineering*. Tunnelling and Underground Space Technology 11(2): 175–188.

Umili G., Carriero M.T., Taboni B., Migliazza M.R., Ferrero A.M. (2024). A New Analytical Solution for Calculating Rock Block Volume. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 57, 3109–3120.

CALCOLO DEL BLOCCO DI PROGETTO

$$q = \sin\gamma_{12}\cos\delta_{3-12} = \sin\gamma_{23}\cos\delta_{1-23} = \sin\gamma_{31}\cos\delta_{2-31}$$

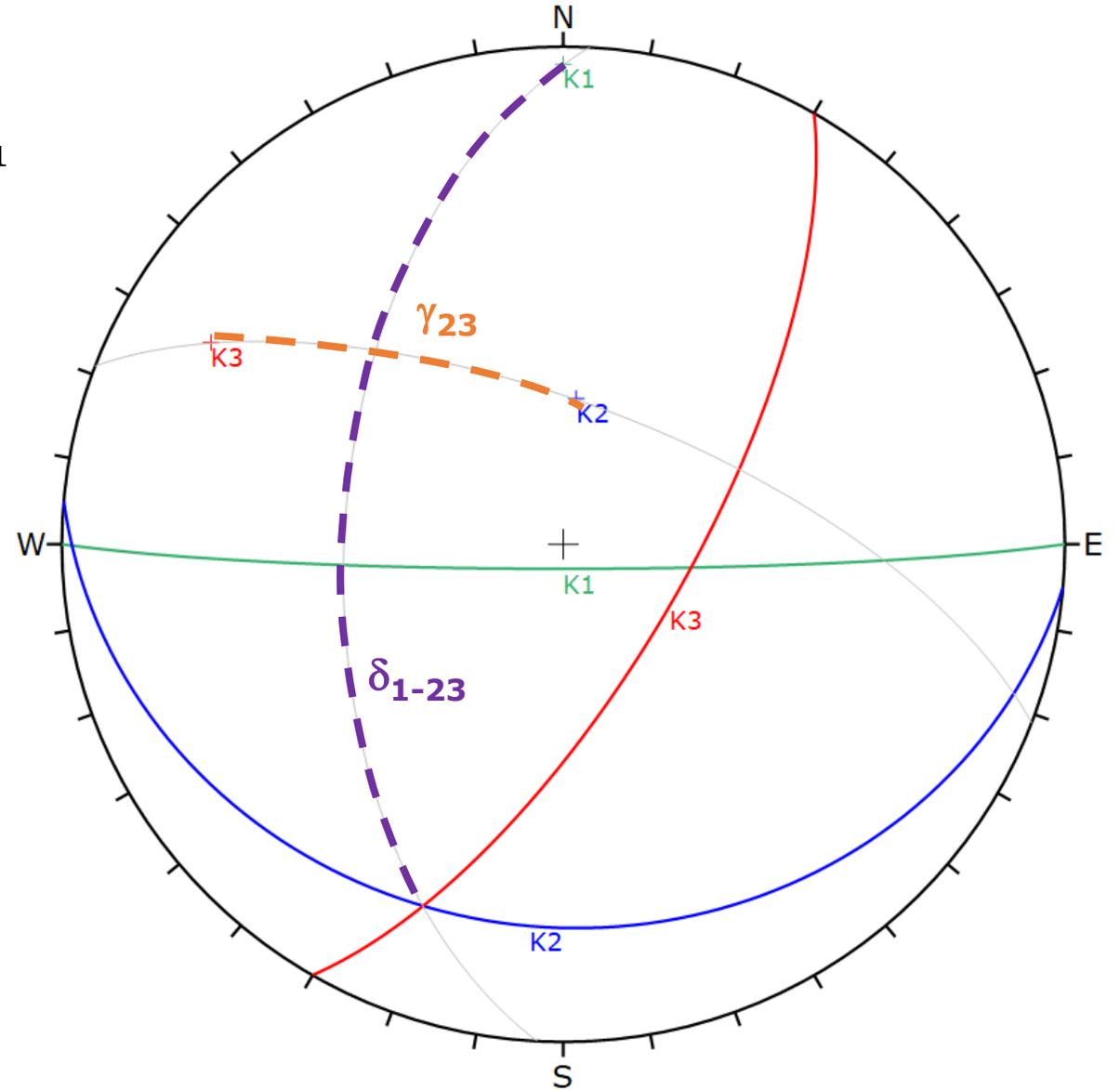
Metodo grafico per calcolare q :

$$q = \sin\gamma_{23}\cos\delta_{1-23}$$

analogamente potrei misurare

γ_{12} e δ_{3-12}

γ_{31} e δ_{2-31}



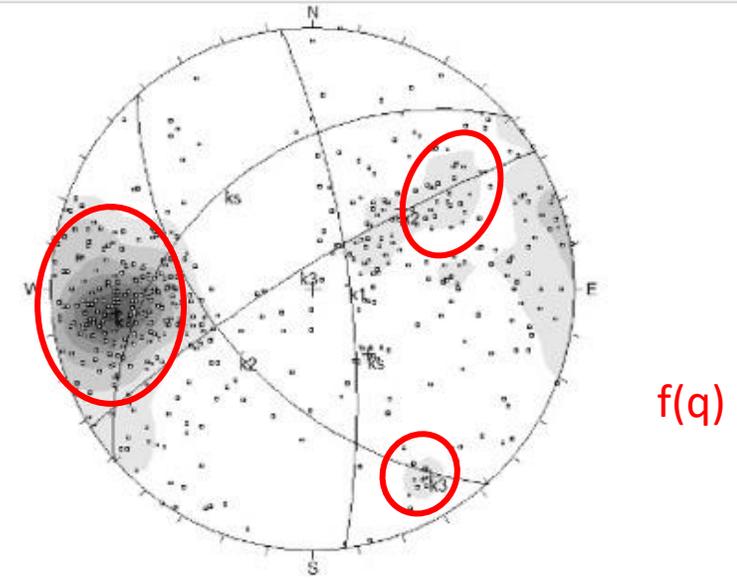
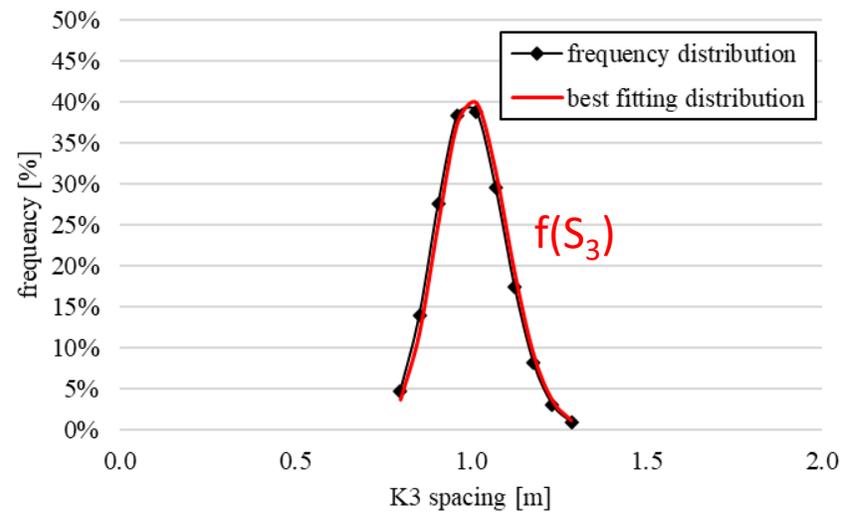
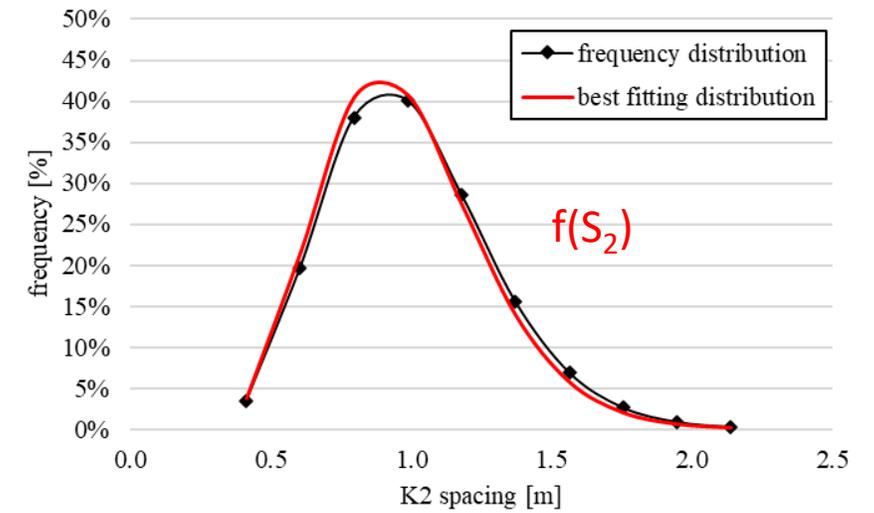
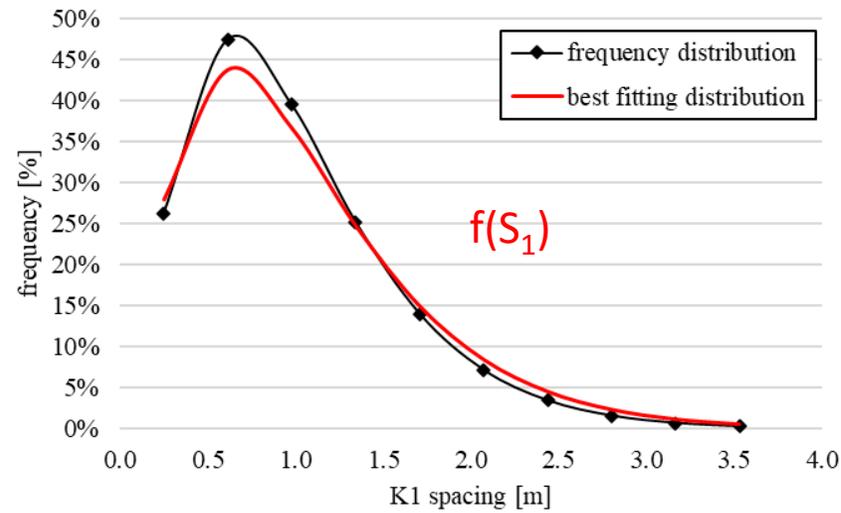
CALCOLO DEL BLOCCO DI PROGETTO

La naturale variabilità di orientazione e spaziatura dei piani di discontinuità appartenenti ad una stessa famiglia deve necessariamente essere tenuta in conto!

Singolo valore di volume



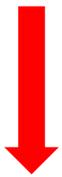
Distribuzione di valori di volume



CALCOLO DEL BLOCCO DI PROGETTO

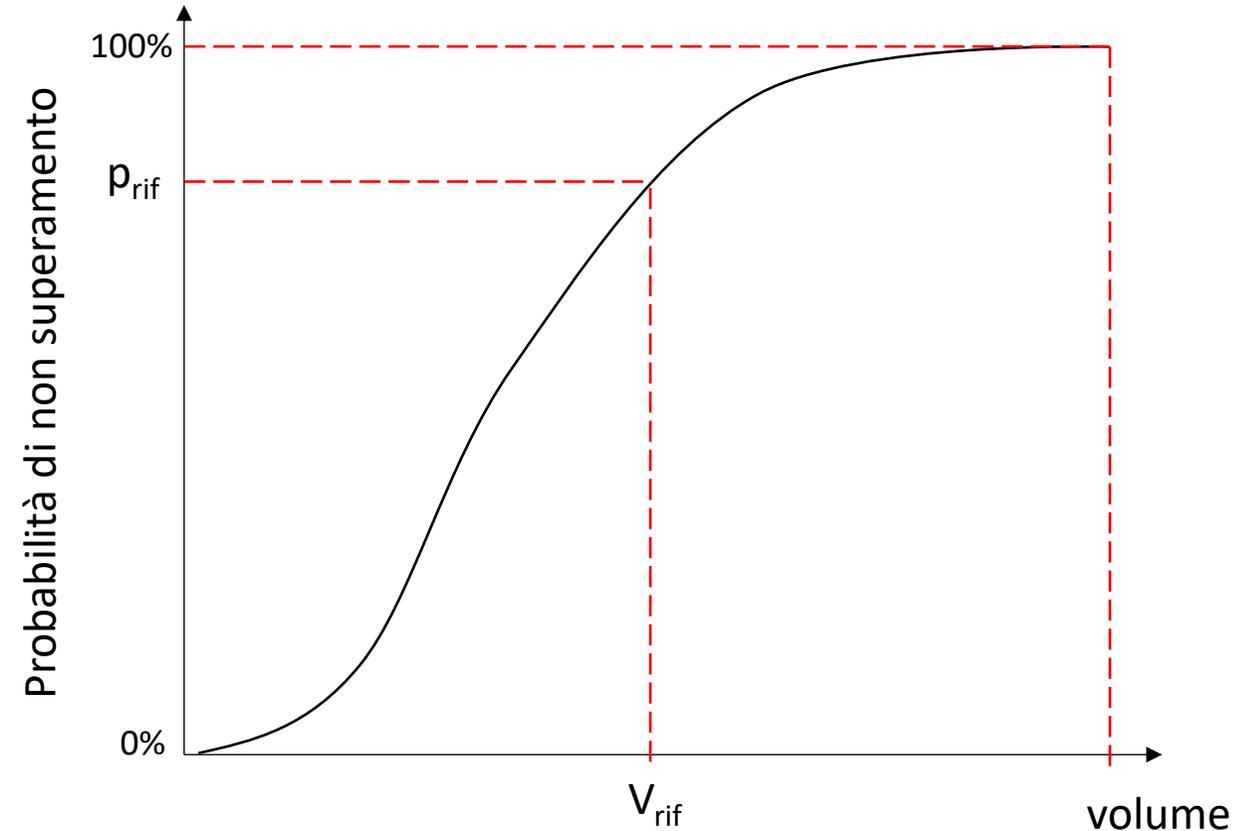
Definizione analitica del volume del singolo blocco

$$V_B = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{q}$$



Definizione analitica della distribuzione dei blocchi in parete (**In-situ Block Size Distribution, IBSD**)

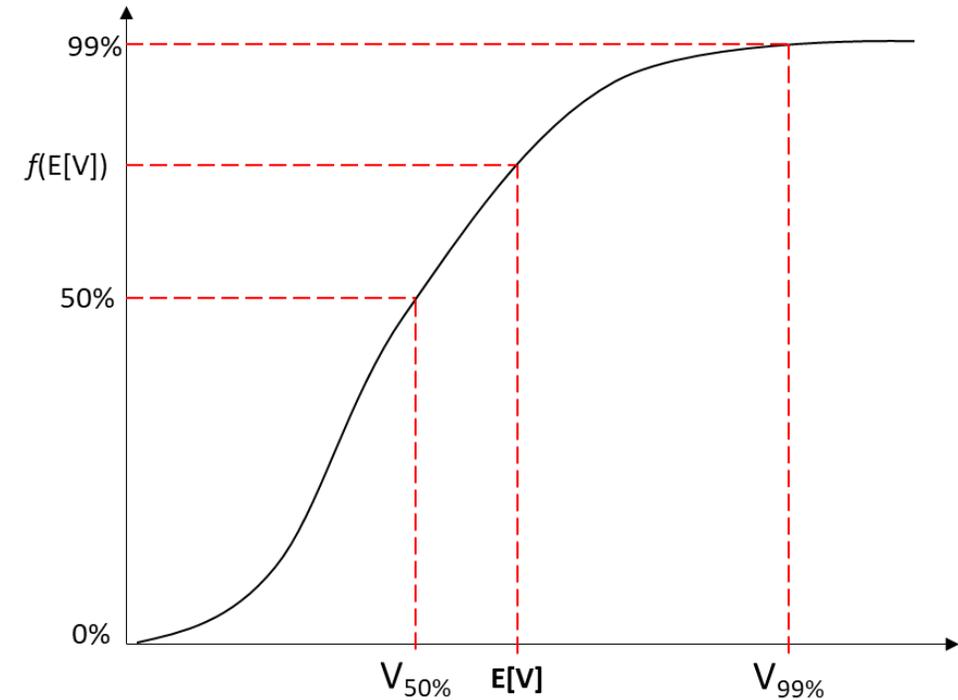
$$CDF(V_B) = \frac{CDF(S_1) \cdot CDF(S_2) \cdot CDF(S_3)}{CDF(q)}$$



CALCOLO DEL BLOCCO DI PROGETTO

La **IBSD** può essere caratterizzata mediante dei descrittori:

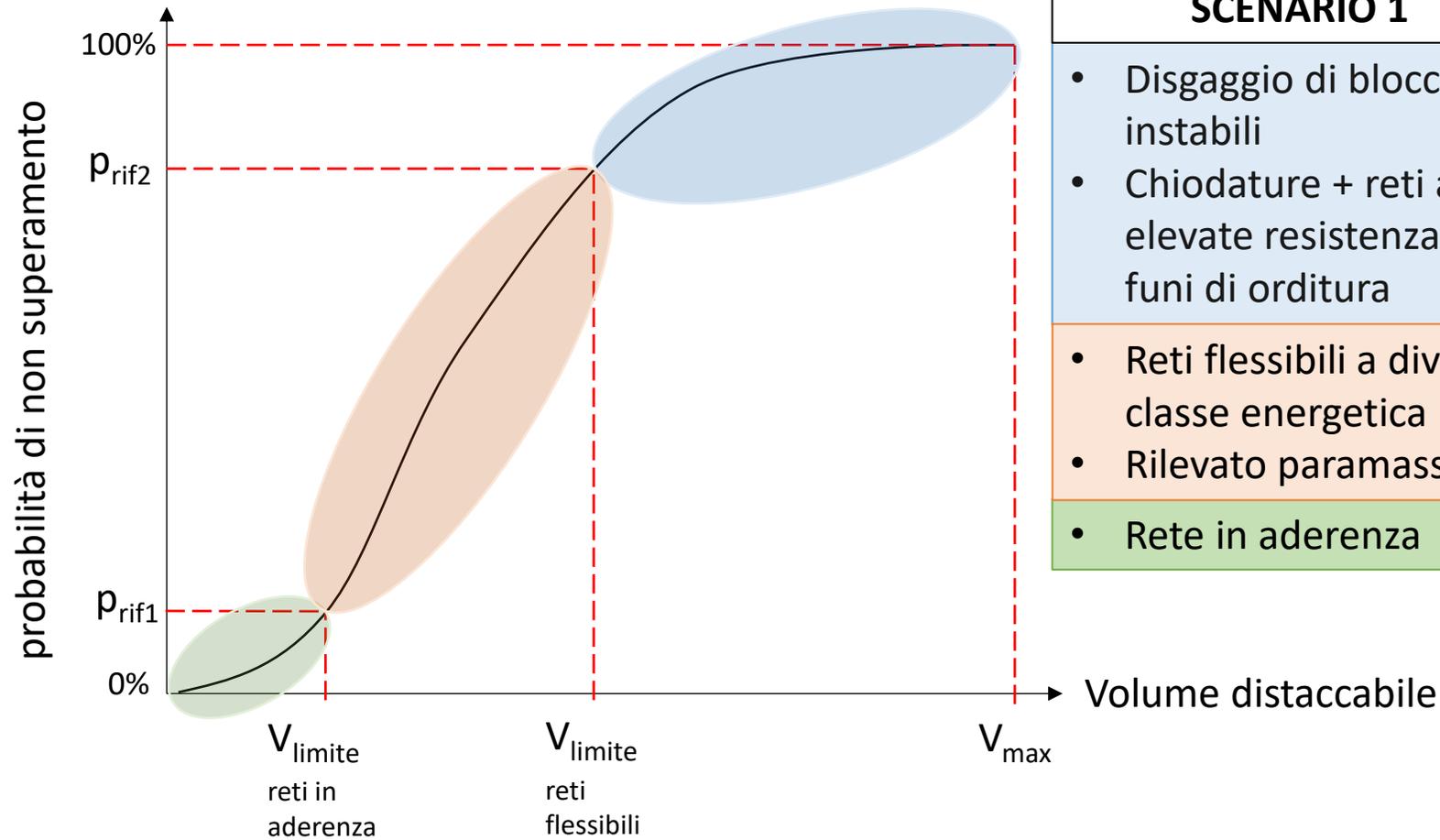
- $E[V] = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{q}$ \Rightarrow **Valore atteso di V**
- $V_{50\%}$ \Rightarrow **Mediana di V**
- $V_{99\%}$ \Rightarrow **Valore massimo "ragionevole" di V**



In generale, $E[V] \neq V_{50\%}$

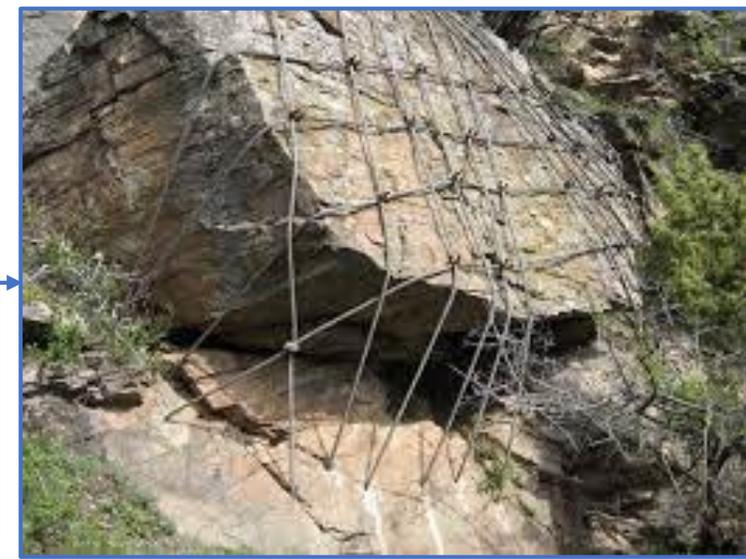
CALCOLO DEL BLOCCO DI PROGETTO

Utilizzo della In-situ Block Size Distribution (IBSD) per la definizione degli scenari di progetto



SCENARIO 1

- Disgaggio di blocchi instabili
- Chiodature + reti ad elevate resistenza + funi di orditura
- Reti flessibili a diversa classe energetica
- Rilevato paramassi
- Rete in aderenza



Qualunque sia la tipologia dell'opera di difesa in progetto, le azioni si riferiscono al caso di crollo di un masso isolato o di uno sciame di massi che agiscono sull'opera di protezione in condizioni temporali tali da poter essere considerati come un unico evento.

L'energia cinetica sollecitante di progetto E_{Sd} è pertanto determinata

$$E_{Sd} = 1/2 m_d V_d^2$$

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 dei blocchi (v_d) è definita come la velocità in corrispondenza del punto di impatto con l'opera corrispondente al frattile del 95% delle velocità calcolate (v_t) nelle analisi delle traiettorie moltiplicata per il coefficiente di amplificazione (γ_f) definito come:

$$v_d = v_t \times \gamma_f \quad (1)$$

dove:

v_d è la velocità di progetto dei blocchi;

v_t sono le velocità calcolate nelle analisi delle traiettorie;

γ_f è espresso come $\gamma_f = \gamma_{Tr} \times \gamma_{Dp}$

dove:

γ_{Tr} è il coefficiente di affidabilità di calcolo delle traiettorie che vale:

- = 1,02 per simulazioni di caduta basate su coefficiente di restituzione ottenuti da analisi a ritroso,
- = 1,10 per simulazioni di caduta basate su coefficiente di restituzione derivati da sole informazioni bibliografiche;

γ_{Dp} è il coefficiente che tiene conto della qualità della discretizzazione topografica del pendio:

- = 1,02 per pendii discretizzati con rilievo topografico di buona precisione in rapporto alle caratteristiche del sito,
- = 1,10 per pendii discretizzati con precisione media-bassa.

La massa del blocco di progetto (m_d) è definita come il prodotto del volume del blocco di progetto (Vol_b) per la massa per unità di volume della roccia (γ) moltiplicato per un coefficiente di amplificazione:

$$m_d = (Vol_b \times \gamma) \gamma_m \quad (2)$$

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 coefficiente di amplificazione espresso come

$$\gamma_m = \gamma_{VolF1} \times \gamma_\psi \quad (3)$$

dove:

γ_ψ è il coefficiente legato alla valutazione della massa per unità di volume della roccia, che può essere generalmente assunto pari a 1,00;

γ_{VolF1} è il coefficiente legato alla precisione del rilievo del volume del blocco di progetto, che vale:

- = 1,02 per rilievi accurati della parete (per esempio mediante tecniche fotogrammetriche, topografiche di precisione, rilievi geomeccanici sistematici in parete, misurazione dei blocchi presenti sul detrito alla base delle pareti),
- = 1,1 in assenza di rilievi finalizzati al progetto.

Ora occupiamoci della velocità e dell'energia del blocco di progetto....

ANALISI DELLE TRAIETTORIE DI CADUTA MASSI

Dati di Input:

- Volume del blocco
- Densità della roccia ($\approx 2700 \text{ kg/m}^3$)
- Forma del blocco
- Modello digitale del pendio
- Identificazione dell'area sorgente



Simulazioni Numeriche delle traiettorie



Parametri utili per la progettazione

- Energia cinetica
- Altezza di rimbalzo
- Distribuzione delle traiettorie

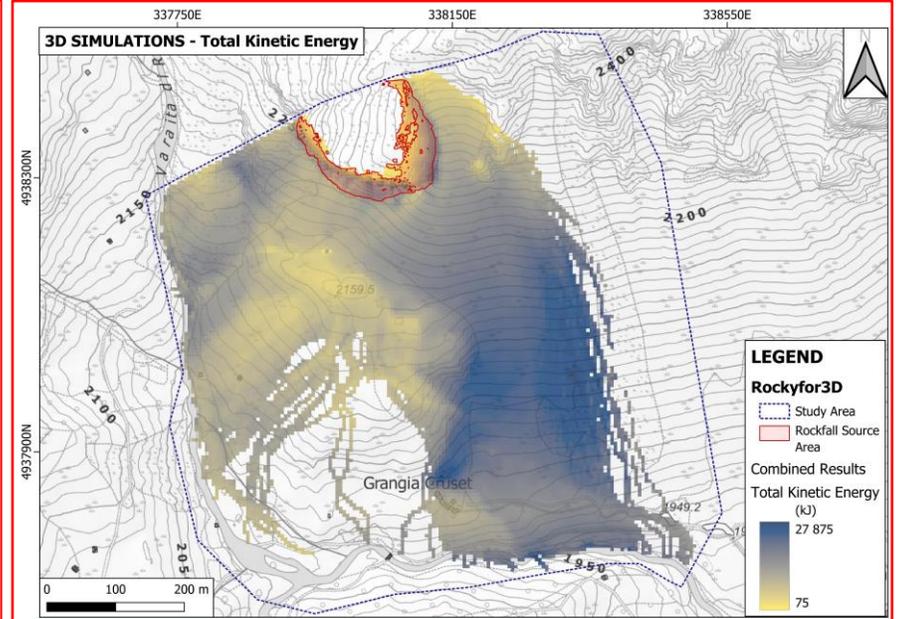
➤ 2D

➤ 3D

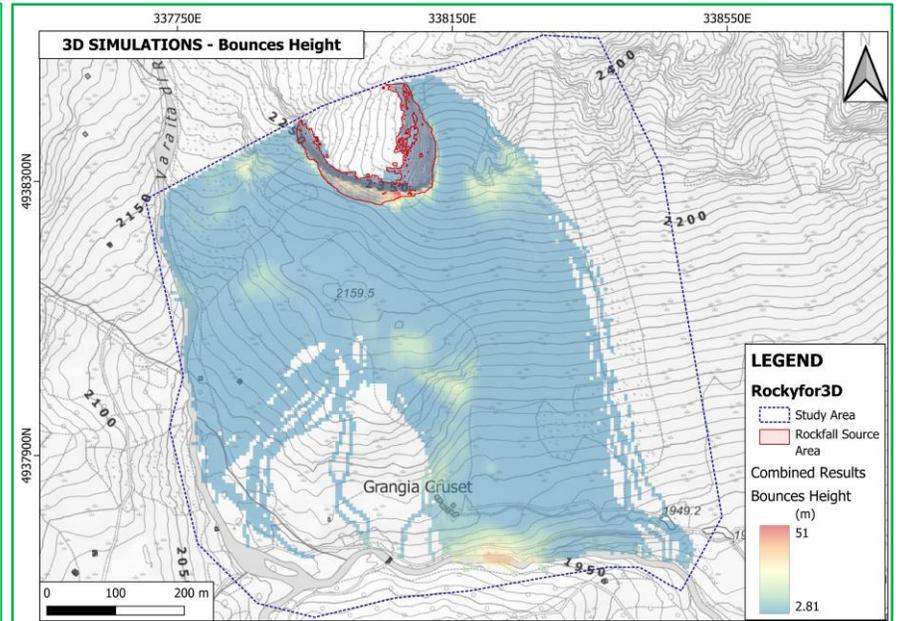
➤ Lumped mass

➤ Rigid body

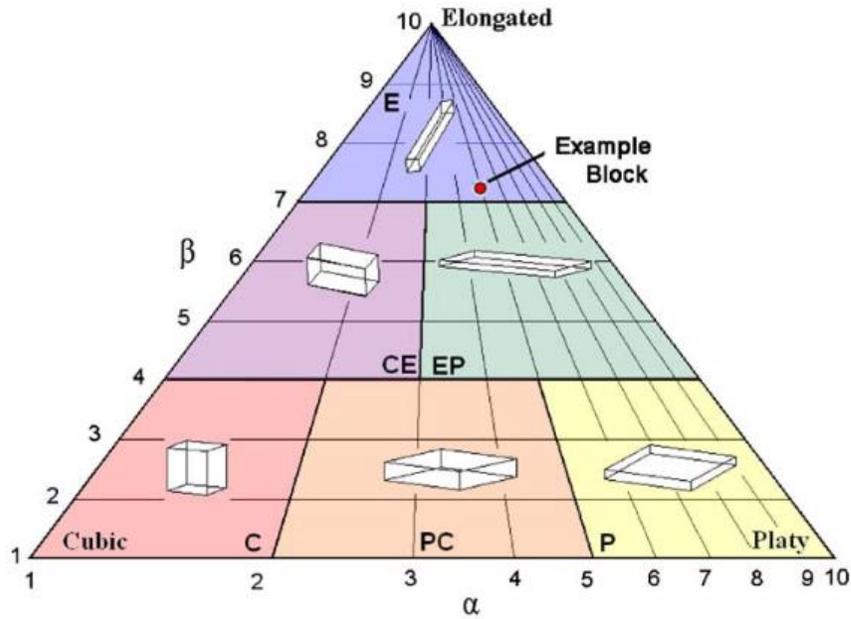
Energia cinetica totale (E_k)



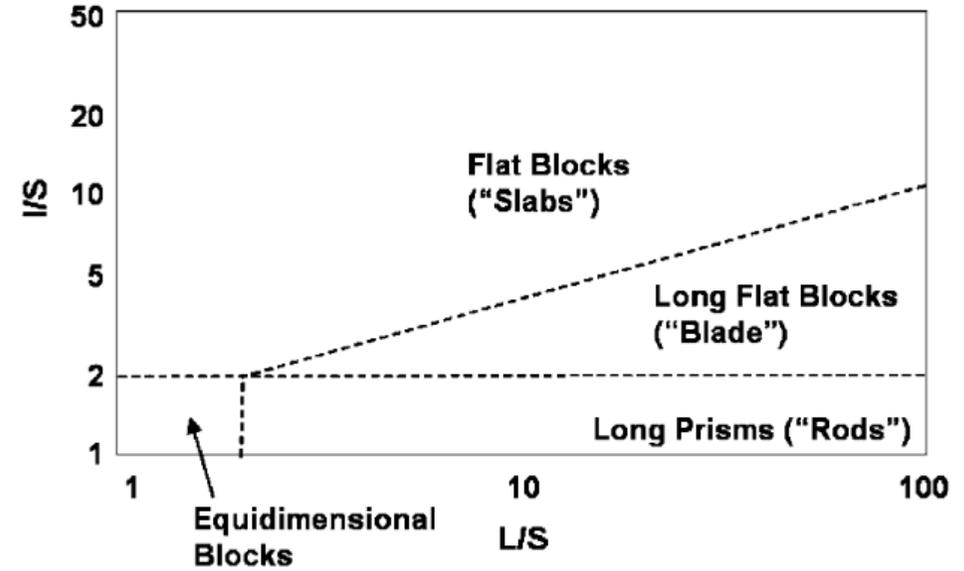
Altezza di rimbalzo (H)



FORMA DEL BLOCCO



Kalenchuk K., Diederichs M., McKinnon S., Characterizing block geometry in jointed rockmasses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (2006), 1212-1225, 43(8).



Palmstrom A.A., Measurement and characterization of rock mass jointing, in: Sharma V.M., Saxena K.R., editors. *In-situ characterization of rocks*. Rotterdam: Balkema; 2001. p. 49-97.

...naturalmente si tratta di una forma approssimata,
che non tiene conto di solidi non-retti

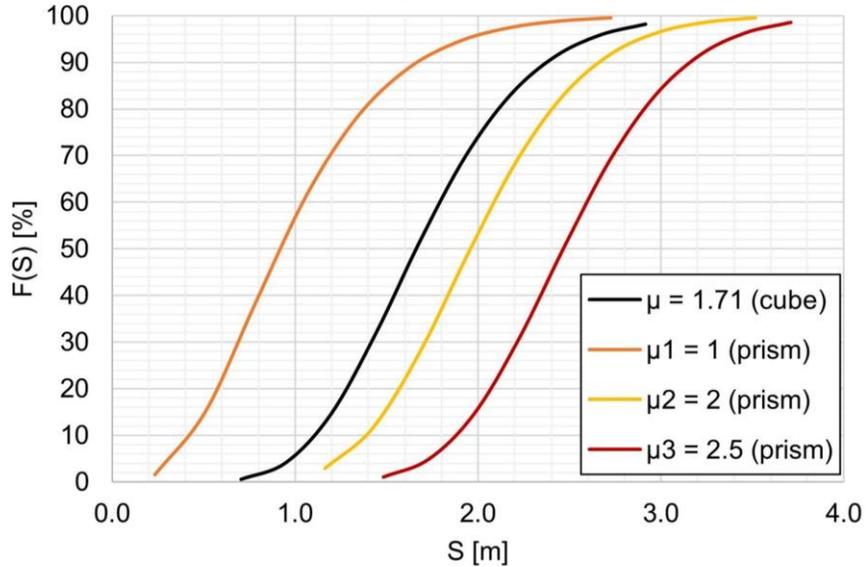
FORMA DEL BLOCCO

Caso sintetico: IBSD di blocchi di uguale volume atteso ma forma diversa

- Cubo $E[V] = \frac{\mu^3}{q} = \frac{1.71^3}{1} = 5 \text{ m}^3$

- Prisma $E[V] = \frac{\mu_1\mu_2\mu_3}{q} = \frac{1*2*2.5}{1} = 5 \text{ m}^3$

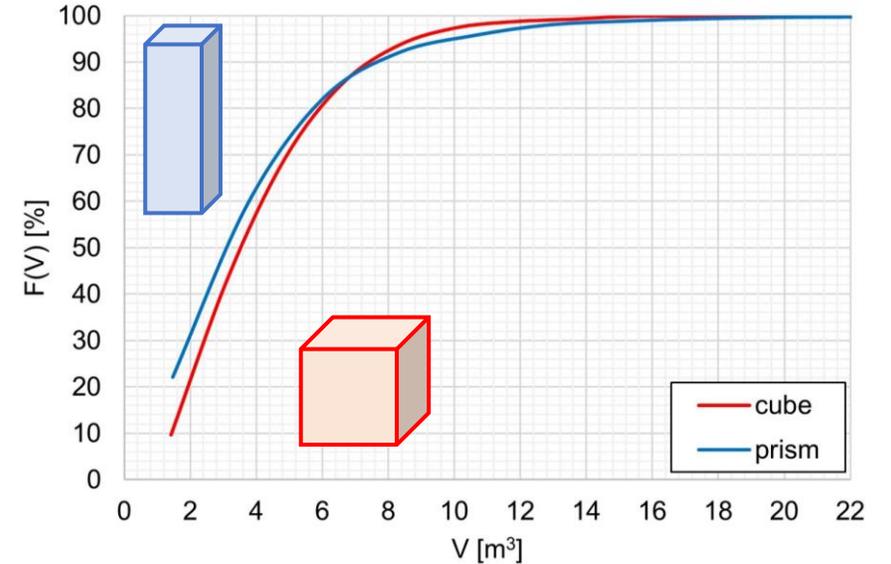
CDF Spaziatura



Simulazione
Montecarlo



In-situ Block Size Distribution
(IBSD)



Identica deviazione standard per
tutte le distribuzioni ($\sigma = 0.5$)

IBSD molto simili, ma...

FORMA DEL BLOCCO

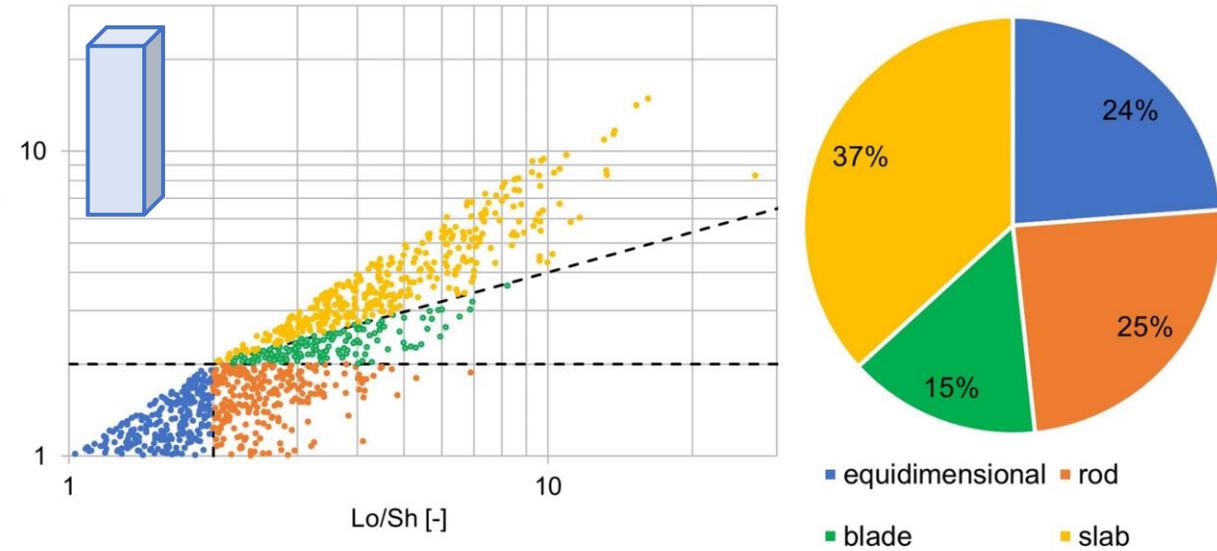
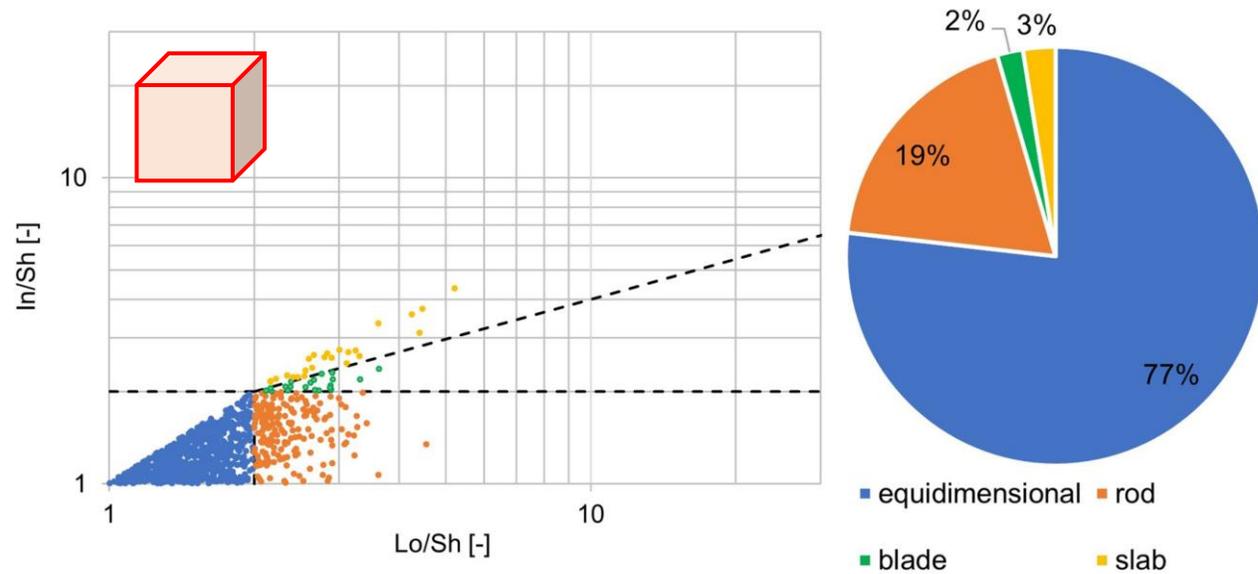
Assumendo che:

S_1 , S_2 and S_3 siano i lati del blocco



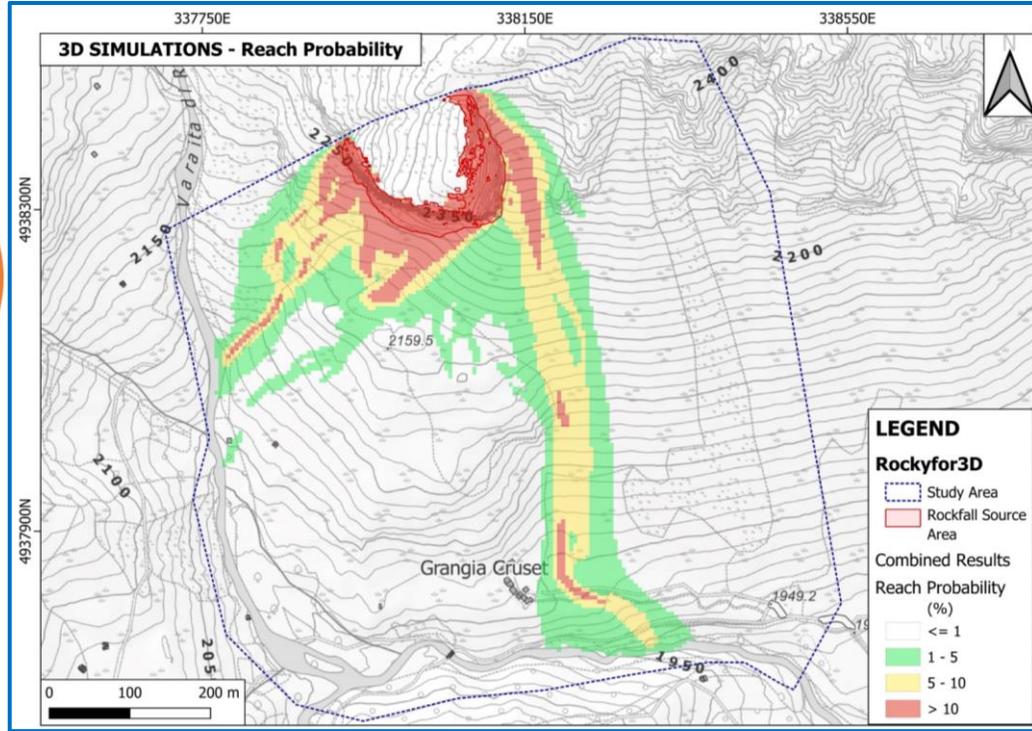
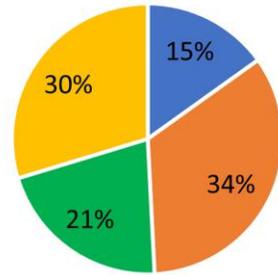
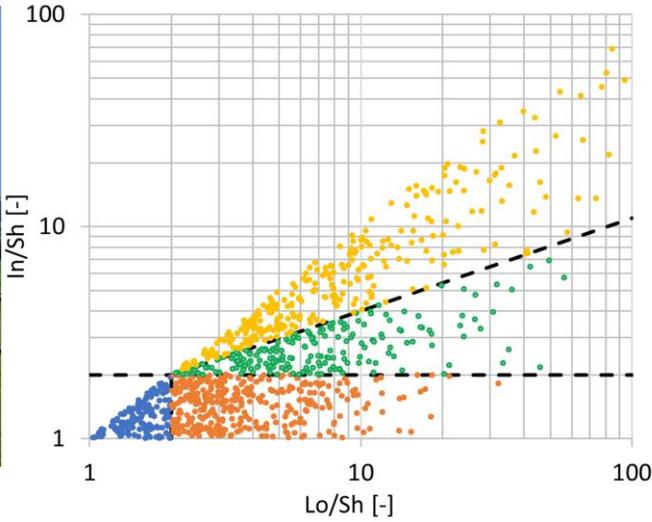
Classificazione della forma di Palmstrom (2001) :

- Lo = Longest side
- In = Intermediate side
- Sh = Shortest side

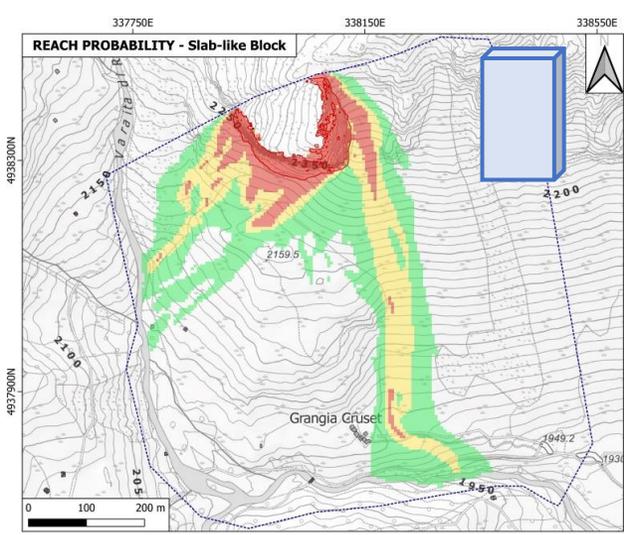
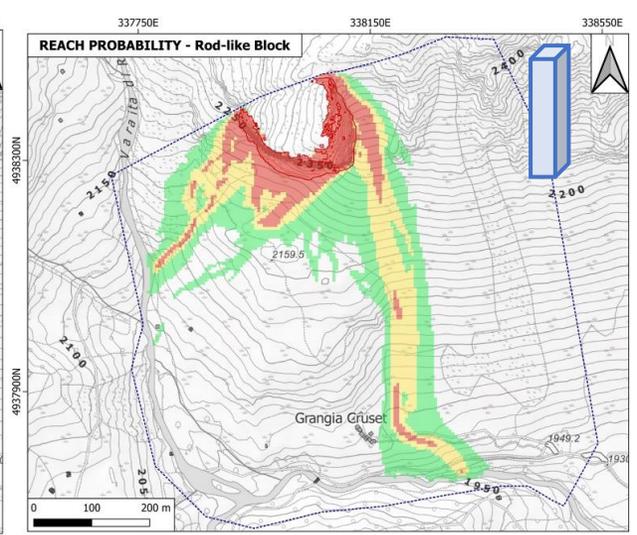
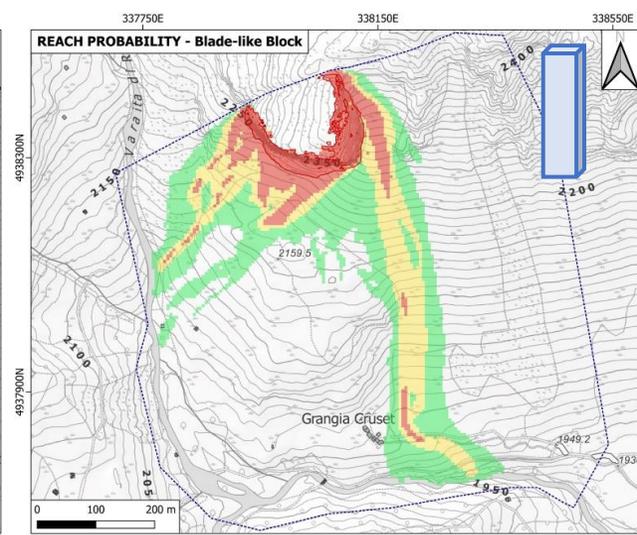
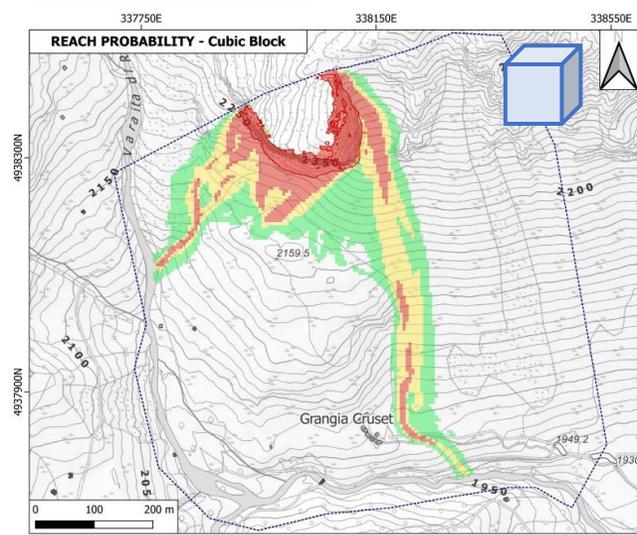


Esiste una distribuzione delle forme (Shape Distribution, SD) e se ne dovrebbe tenere conto (solo il metodo RIGID BODY lo consente)

FORMA DEL BLOCCO



$V = 6,5 \text{ m}^3$



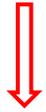
Taboni B., Umili G., Ferrero A.M., 2023, *A Design Scenario Approach for Choosing Protection Works against Rockfall Phenomena*, Remote Sensing, 15, 4453.



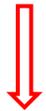
CALCOLO DELL'ENERGIA CINETICA

Ipotesi semplificative:

- Parete perfettamente verticale
- Ogni punto sorgente equiprobabile
- Nessuna dissipazione dell'energia prima dell'urto con la barriera

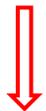


$$E_{k \max} = E_{\text{potenziale}} = \rho \cdot V \cdot g \cdot H$$



Approccio Probabilistico

$$CDF(E_k)_i = \rho \cdot CDF(V) \cdot g \cdot H_i \qquad CDF(V) = \frac{CDF(S_1) \cdot CDF(S_2) \cdot CDF(S_3)}{CDF(q)}$$



Test statistici per individuare la distribuzione best fitting

$PDF(E_k)$



Distribuzione delle azioni per la progettazione RBD

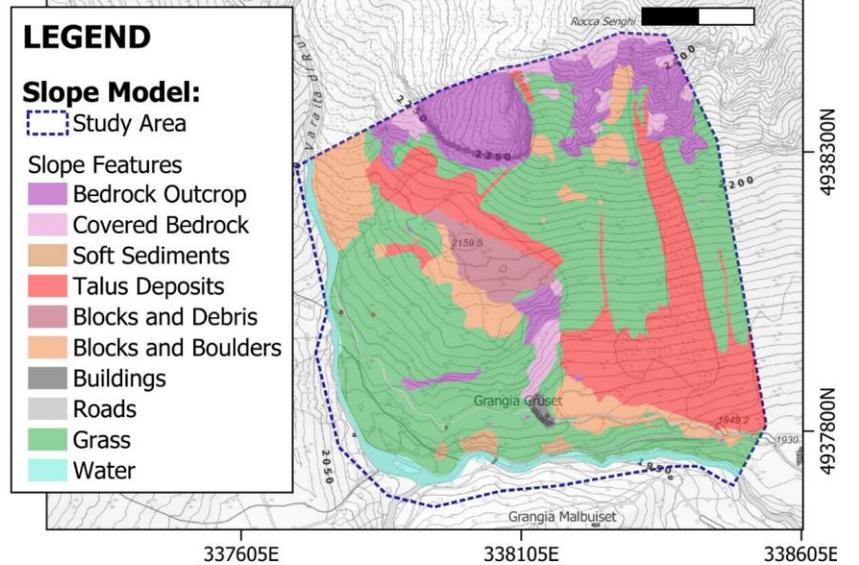
CASO STUDIO: Grangia Cruset (Bellino, CN)

Sistema Informativo
fenomeni Franosi in
Piemonte (SIFraP)



Evento di caduta massi
più recente
(22 Luglio 2017)

- Volume globale coinvolto: **100 m³**
- Volume medio blocchi: **0.5 – 1.0 m³**
- Volume blocco che ha impattato con una casa: **6.5 m³**

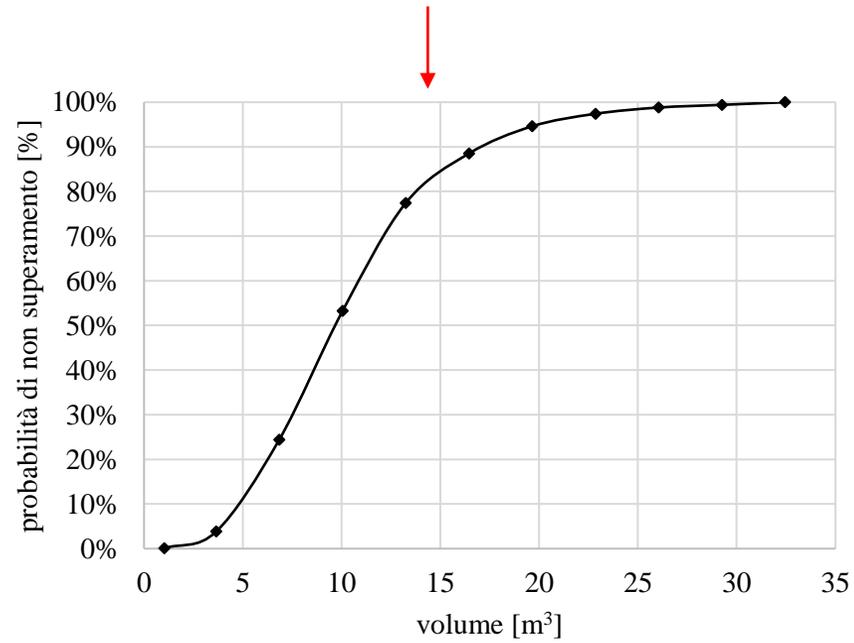


CASO STUDIO: Grangia Cruset (Bellino, CN)

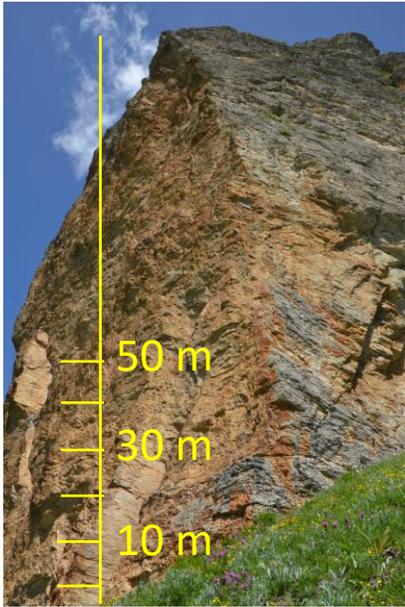


- ✓ Rilievo non-a-contatto su DSM
- ✓ Analisi statistica del dataset di discontinuità

K1 (78/182)			K2 (84/095)			K3 (39/343)		
PDF(S_1)	μ_1	σ_1	PDF(S_2)	μ_2	σ_2	PDF(S_3)	μ_3	σ_3
	[m]	[m]		[m]	[m]		[m]	[m]
Gamma	2.06	0.59	Gamma	2.10	0.48	Gamma	2.55	0.53



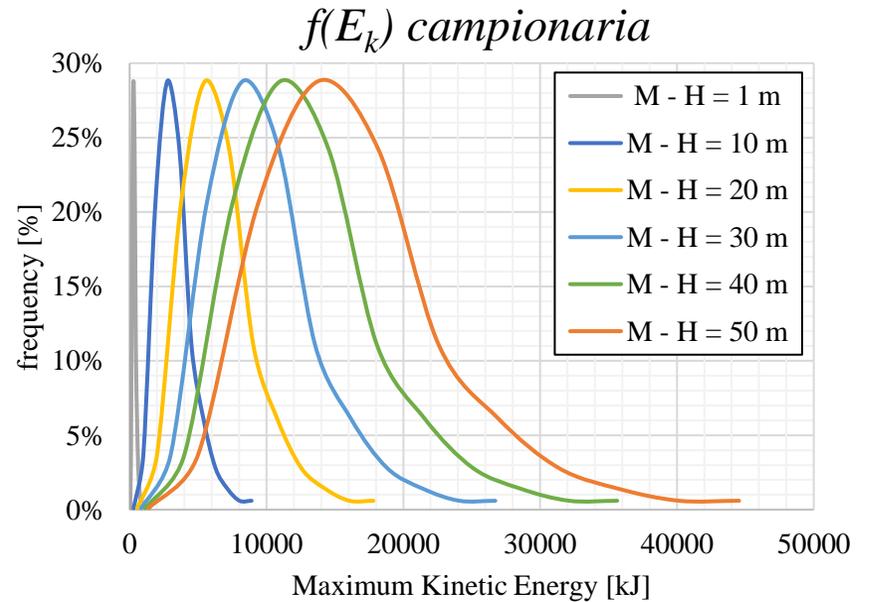
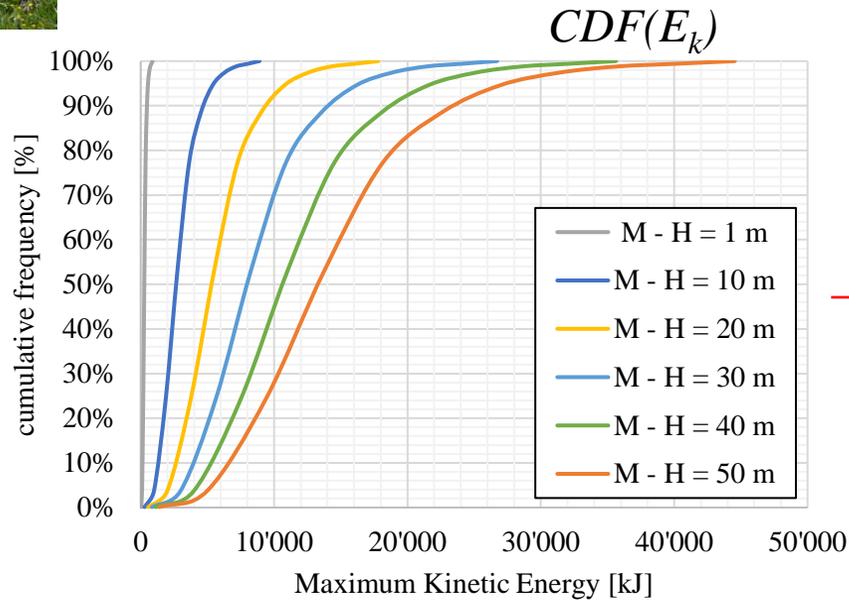
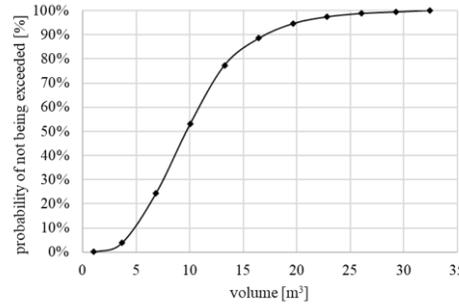
CASO STUDIO: Grangia Cruset (Bellino, CN)



$$CDF(E_k)_i = \rho \cdot CDF(V) \cdot g \cdot H_i$$

$\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$ $g = 9.806 \text{ m/s}^2$

H_i values: 1 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m

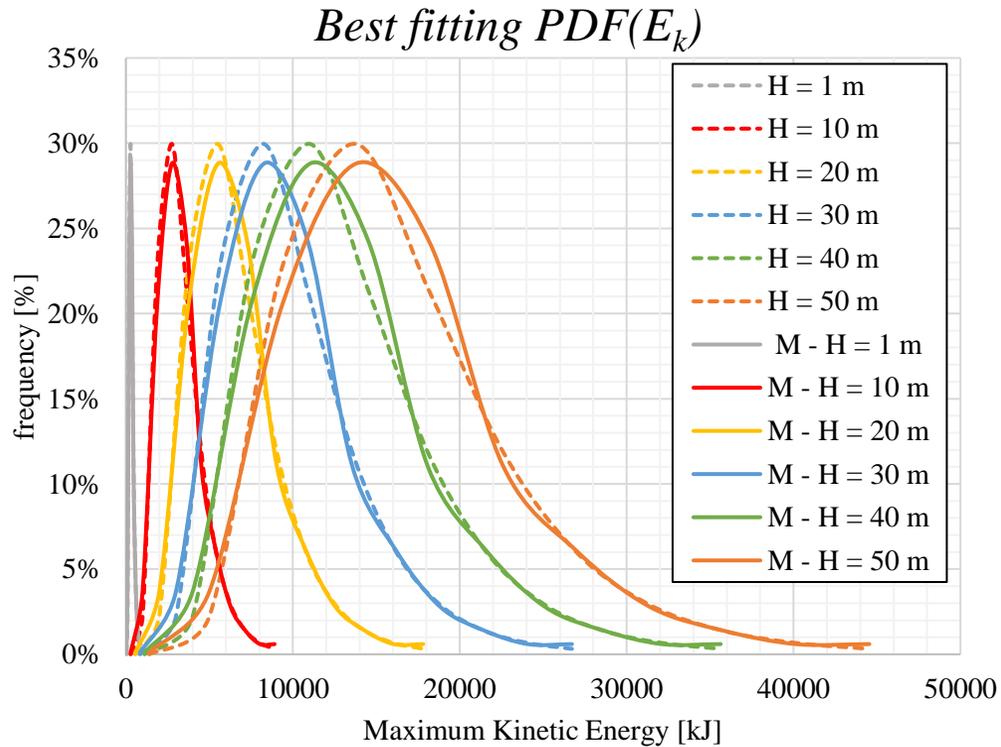


CASO STUDIO: Grangia Cruset (Bellino, CN)

La distribuzione *best fitting* è una Log-Normale

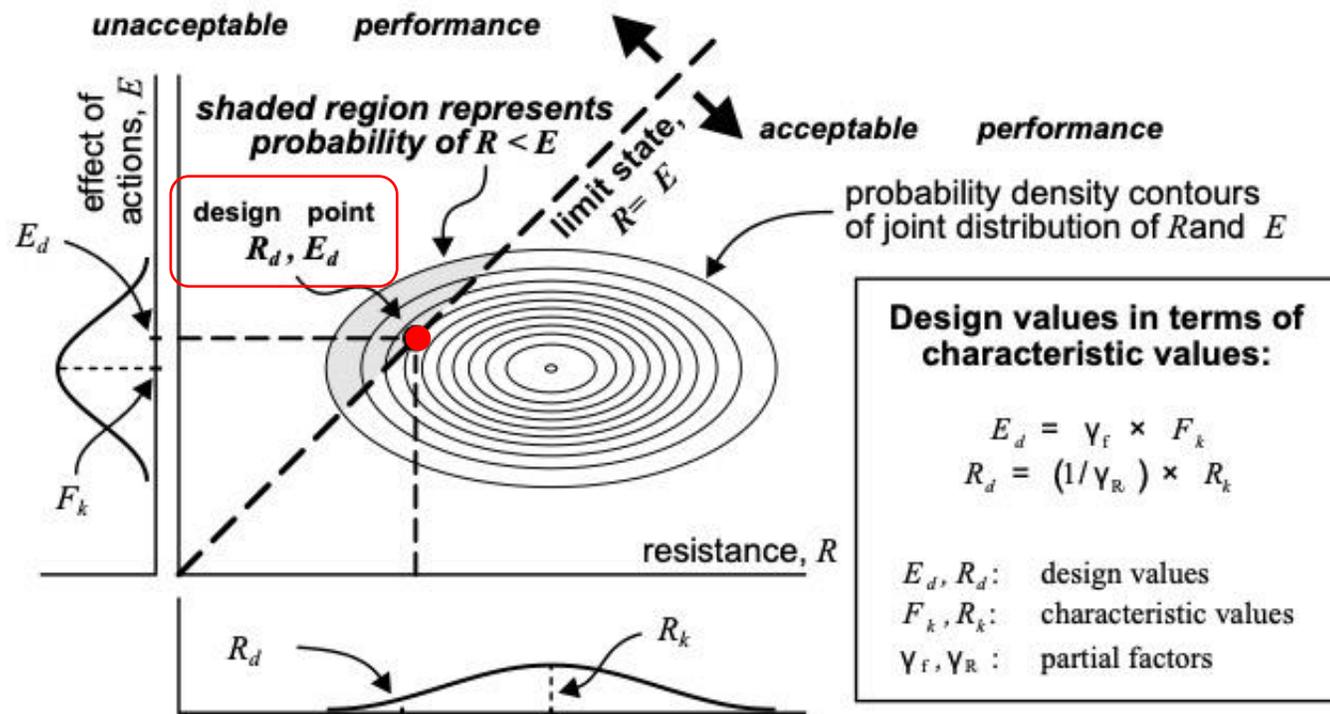
$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{x\sqrt{2\pi}\sigma} \longrightarrow$$

H [m]	1	10	20	30	40	50
$\mu_{\text{lognormal}}$ [kJ]	5.72	8.02	8.71	9.12	9.41	9.63
$\sigma_{\text{lognormal}}$ [kJ]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4



TENTATIVO DI APPLICAZIONE DEL RELIABILITY BASED DESIGN

Il **Reliability Based Design (RBD)** può esser applicato quando i fattori parziali non sono previsti o disponibili nell'Eurocodice 7 (EC7) per tenere conto delle incertezze associate ai parametri progettuali. Consiste in un approccio in grado di associare alle opere geotecniche una **probabilità di rottura**.



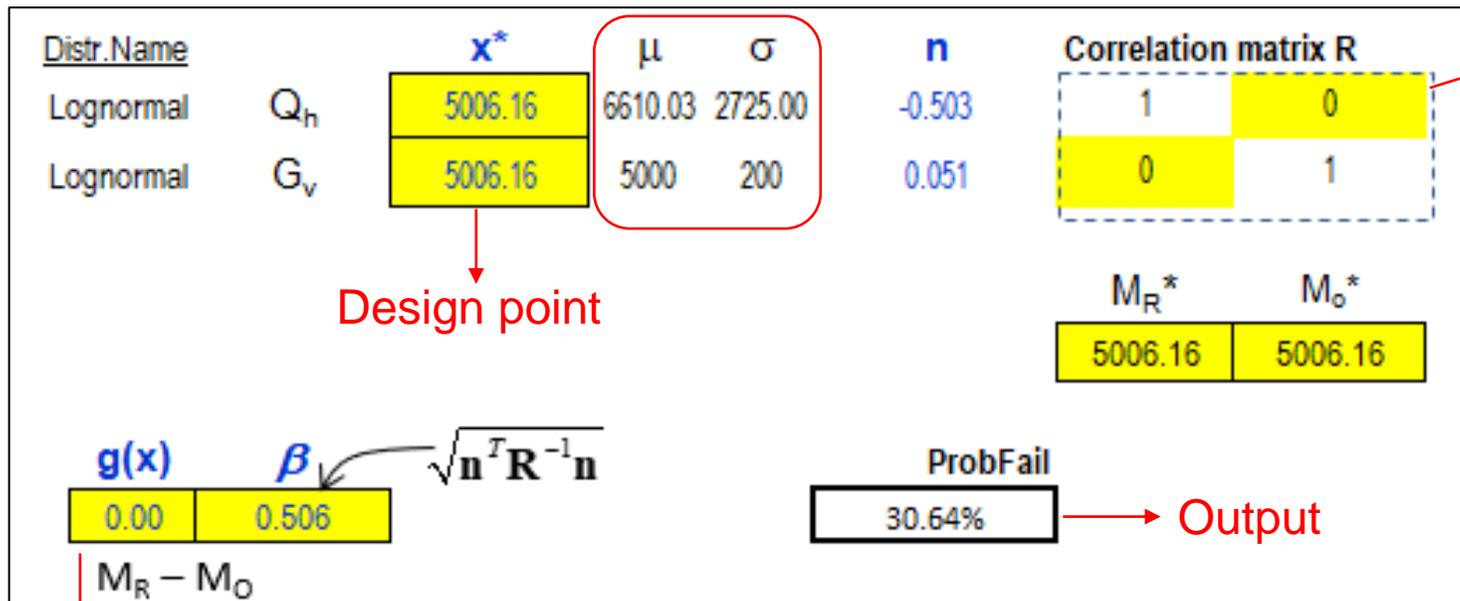
x^* o Design Point è il punto dove l'ellissoide è tangente alla superficie di stato limite.

Le sue coordinate corrispondono alla combinazione con maggior probabilità di rottura, per i parametri considerati.

TENTATIVO DI APPLICAZIONE DEL RELIABILITY BASED DESIGN

- ❑ Effetto delle azioni Q_h : calcoli precedenti
- ❑ Resistenza G_v dell'ipotetica opera: pdf Lognormale ($\mu = 5000$ kJ, $\sigma = 200$ kJ)
- ❑ Foglio Excel pubblicato dal Prof. Bak Kong Low

Valore Input (H = 20 m)



Si impone l'assenza di correlazioni fra Q_h e G_v

Design point

Output

Impongo $g(x) = M_R - M_O = 0$

H [m]	1	10	20	30	40	50
p_f [-]	1.005E-12	0.108	0.306	0.936	0.988	0.998

TEST DI POSSIBILITA' CINEMATICA DEI VARI FENOMENI

ANALISI DI STABILITÀ
DI PARETI IN ROCCIA



1° Passaggio

Identificare le tipologie di **movimento** possibili



Cercare la risposta a
due domande:

1) Ci sono blocchi che possono svincolarsi e muoversi?



Valutare la *libertà di movimento* delle
porzioni di Ammasso Roccioso



Problema Geometrico tra le
discontinuità dell'ammasso e la parete

2) Secondo quali modalità?



- Scivolamento 2D
- Scivolamento 3D
- Ribaltamento Diretto
- Ribaltamento Flessionale

Analisi Cinematica

INPUT:

- ORIENTAZIONE (α_d e ψ_d) delle discontinuità
- ANGOLO D'ATTRITO (ϕ) delle discontinuità
- ORIENTAZIONE (α_p e ψ_p) della parete

Proiezioni stereografiche



TEST di MARKLAND

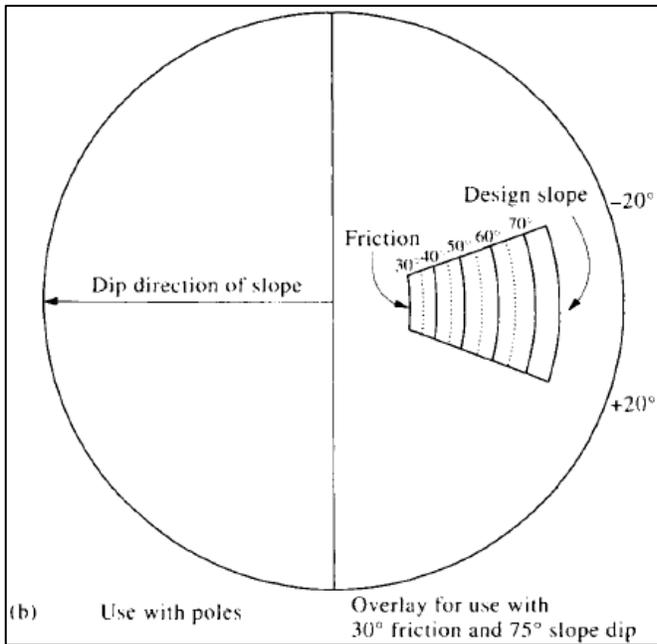


Markland J.T., 1972, *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type is expected*, in: *Interdepartment Rock Mechanics Project*, Imperial College of Sciences and Technology, London.

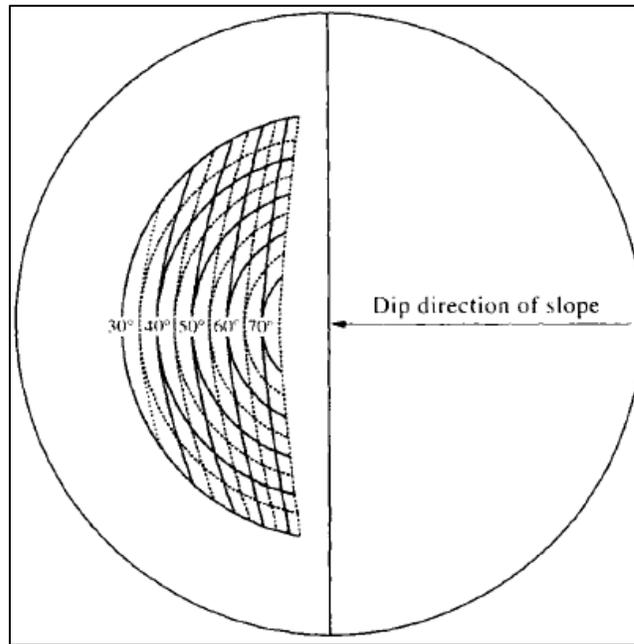


Introduzione

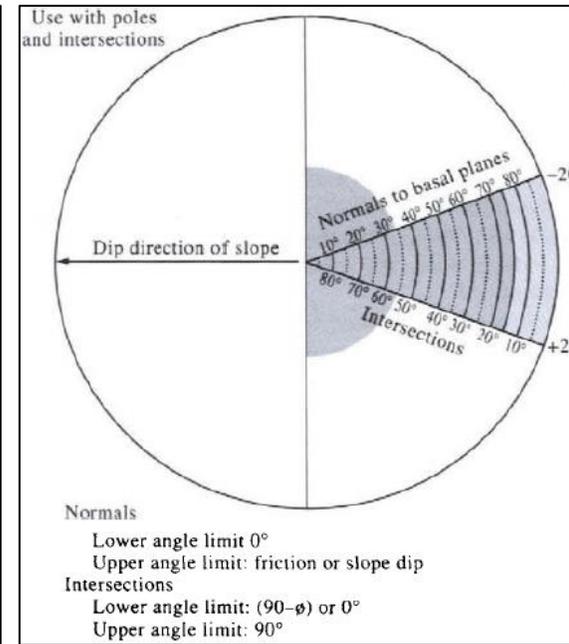
Test per **Scivolamento 2D**



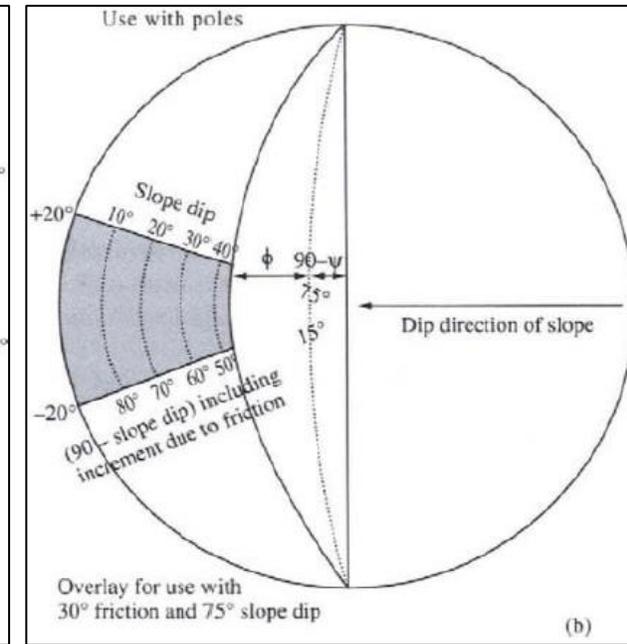
Test per **Scivolamento 3D**



Test per **Ribaltamento Diretto**



Test per **Ribaltamento Flessionale**



Condizioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_d = \psi_p \pm 20^\circ \\ \phi < \alpha_d < \alpha_p \end{array} \right.$$

Necessario ripetere i test per ciascun cinematismo e per ciascuna parete



! = processo ripetitivo e dispendioso in termini di tempo

Automatizzazione

Metodologia - 1

Analisi Cinematica

INPUT:

- ORIENTAZIONE delle discontinuità (α_d e ψ_d)
- ANGOLO D'ATTRITO delle discontinuità (ϕ)
- **ORIENTAZIONE DELLA PARETE**



Descrizione digitale della parete



Digital Elevation Model (**DEM**):

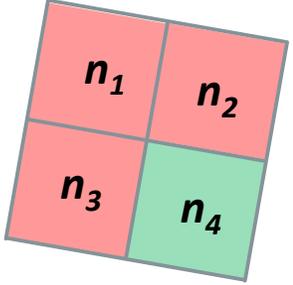
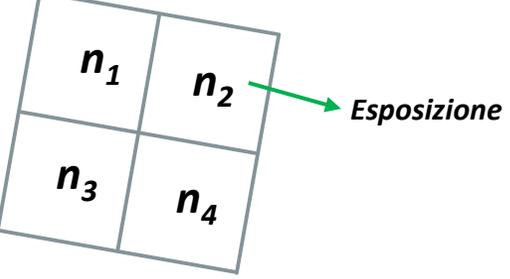
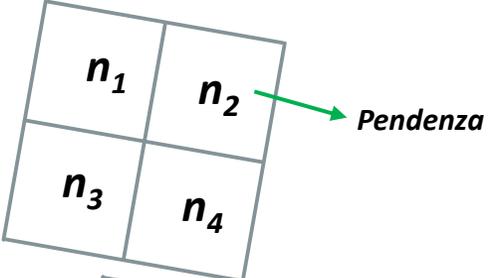
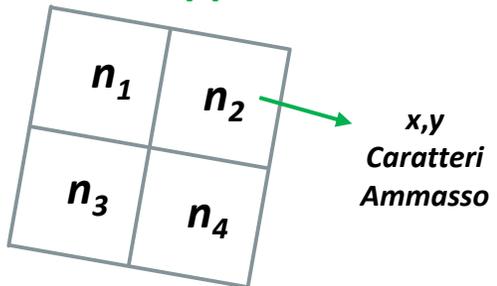
- **Esposizione** (*aspect*) --> Immersione
- **Pendenza** (*slope*) --> Inclinazione



File raster georiferito:

per ogni cella abbiamo Immersione, Inclinazione e Posizione nota

Approccio GRID



SE per ciascuna cella del file raster:

- α_d e ψ_d delle discontinuità
- ϕ delle discontinuità
- **Esposizione** della parete
- **Pendenza** della parete



Descrizione **completa** e **coerente** del problema (**in 2D**) gestibile da un **algoritmo**



ANALISI AUTOMATICA

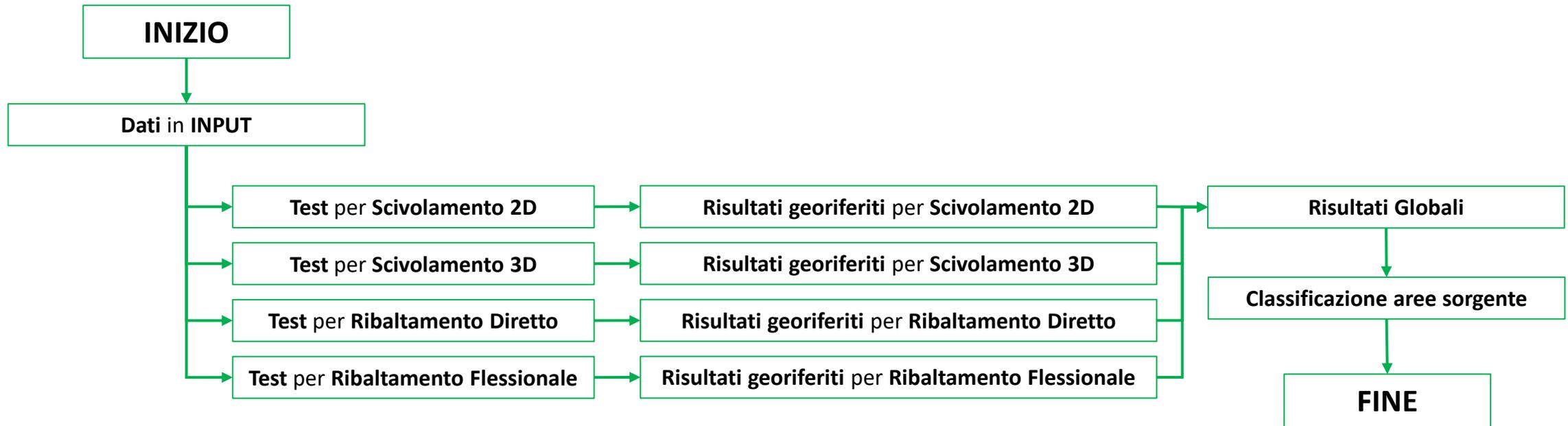
Esecuzione dei **Test di Markland** cella per cella e **mappatura** rapida ed efficiente

!: solo su DOMINI OMOGENEI



Caratteristiche di **AM** costanti



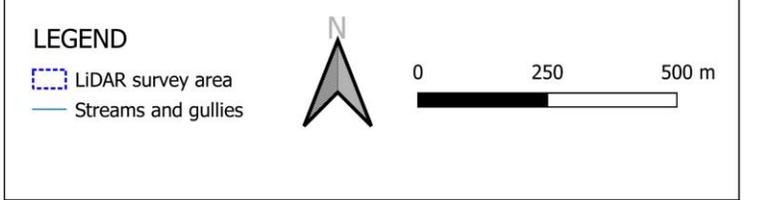
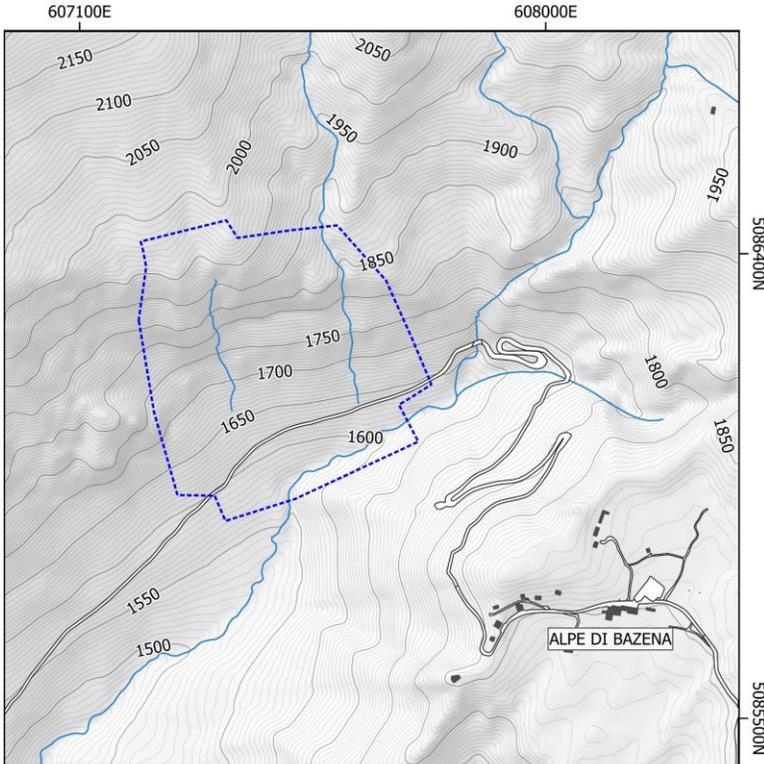
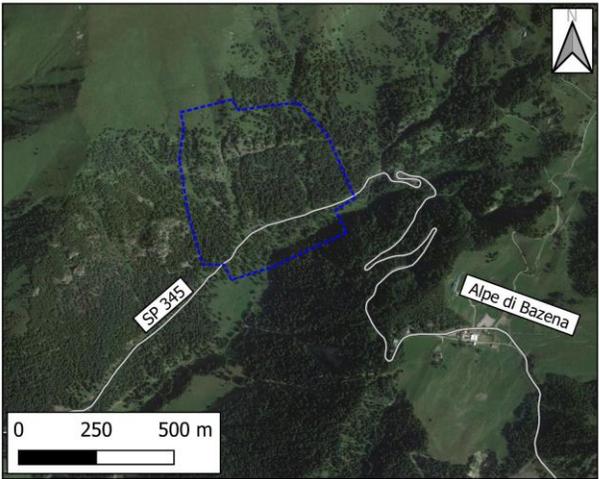
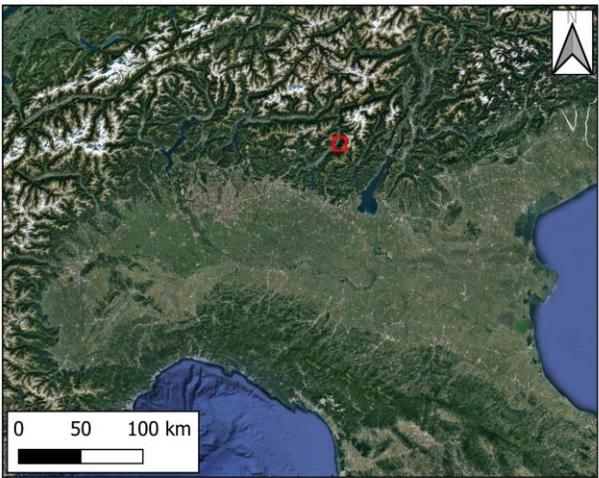
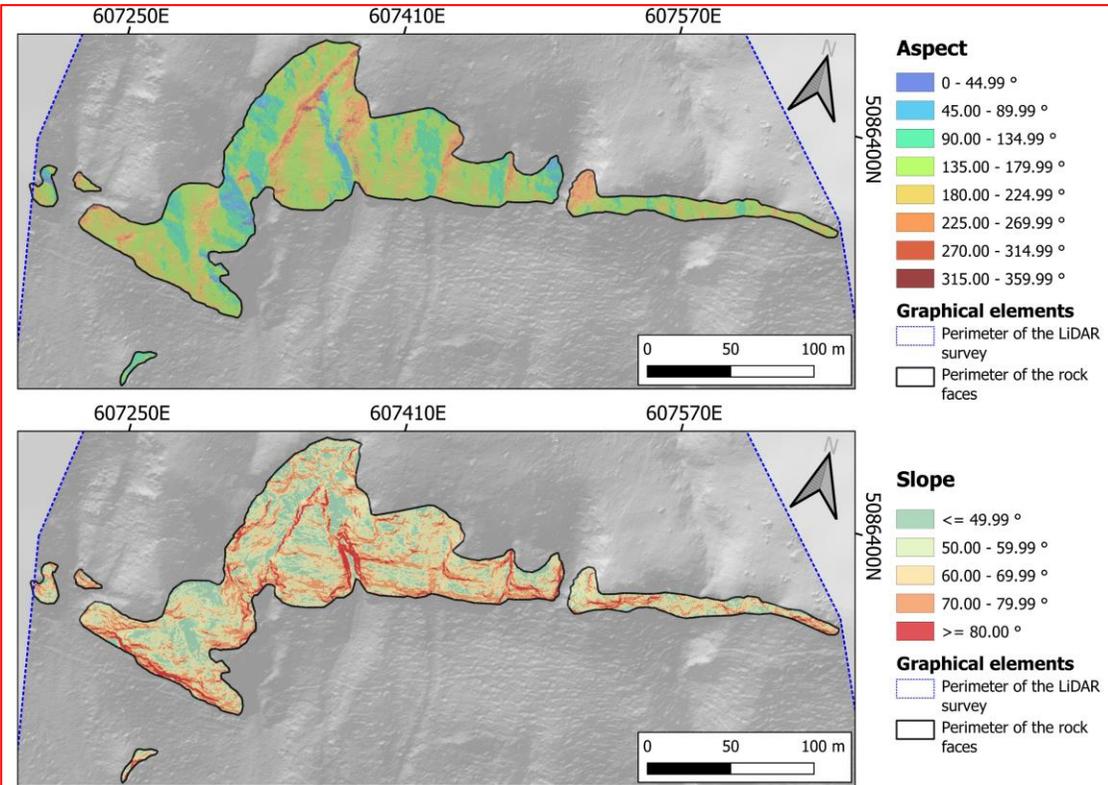


Esempio: Bazena (BS) - 1

Set	Dip	Dip Direction	Joint type
K1	58	253	Joint
K2	73	047	Bedding
K3	45	360	Joint
K4	83	280	Joint

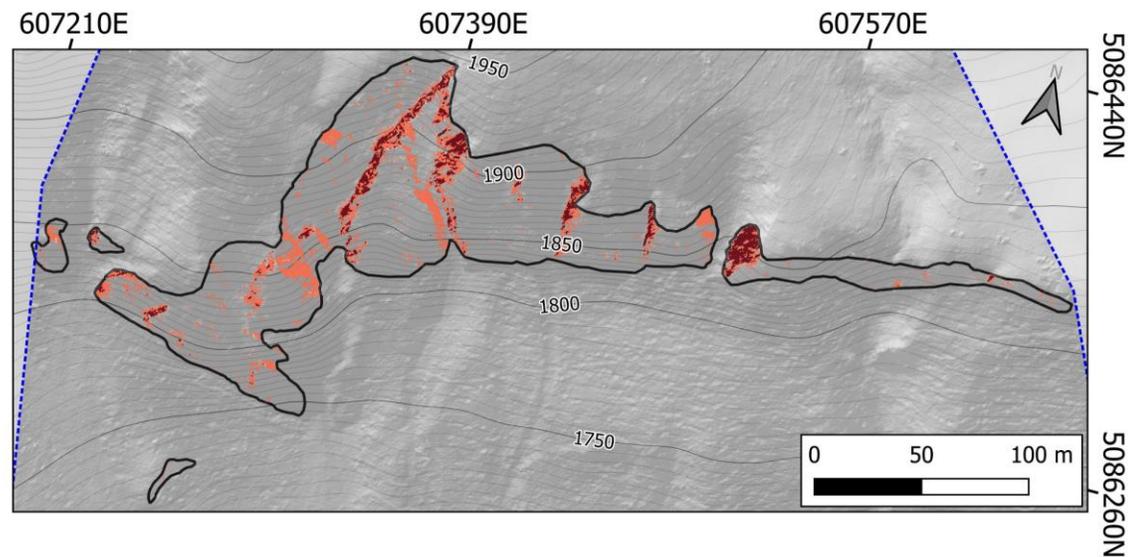
ϕ assunto pari a 30°

DEM da rilievo LiDAR:

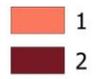


Esempio: Bazena (BS) - 2

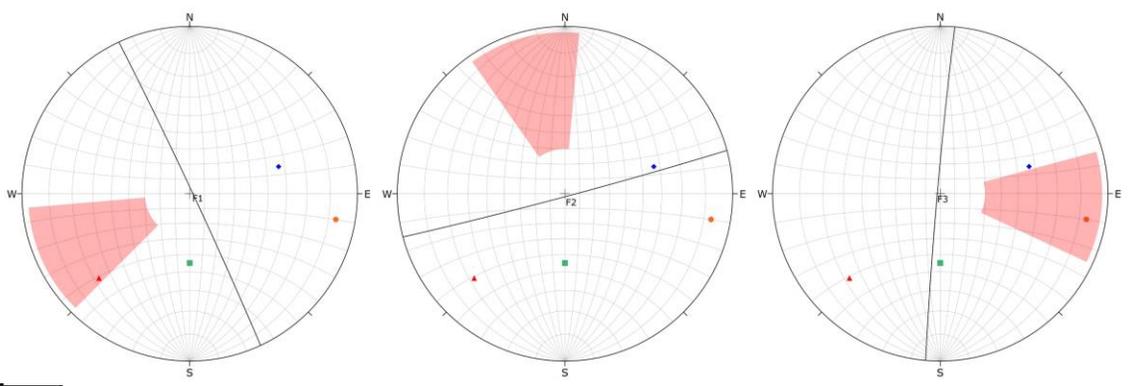
Test per Scivolamento 2D



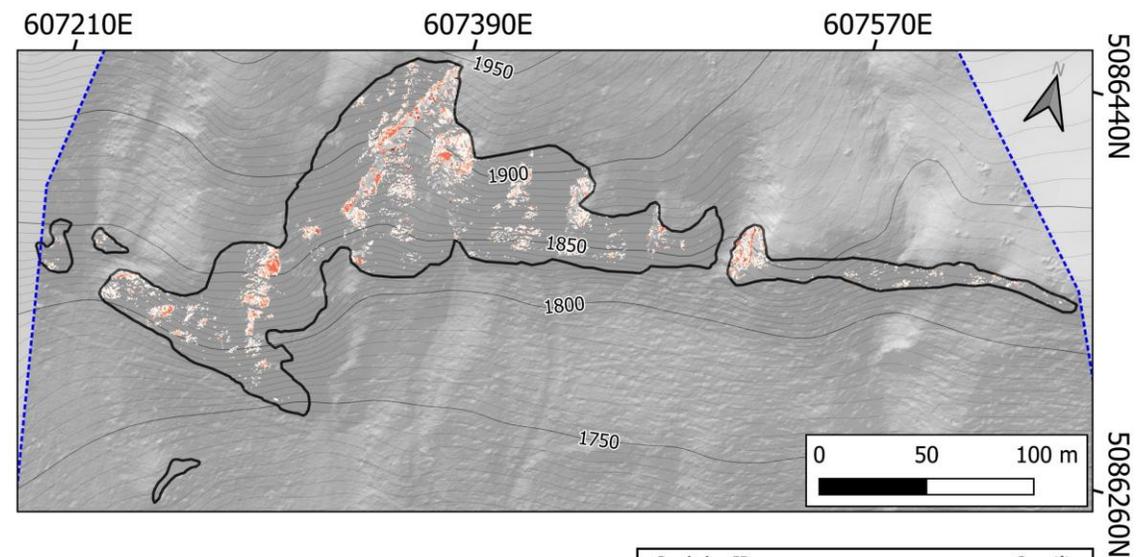
Number of positive tests per pixel:



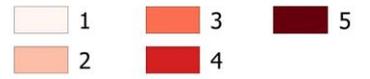
Symbol	ID	Quantity
◆	1	1
▲	2	1
■	3	1
●	4	1



Test per Scivolamento 3D

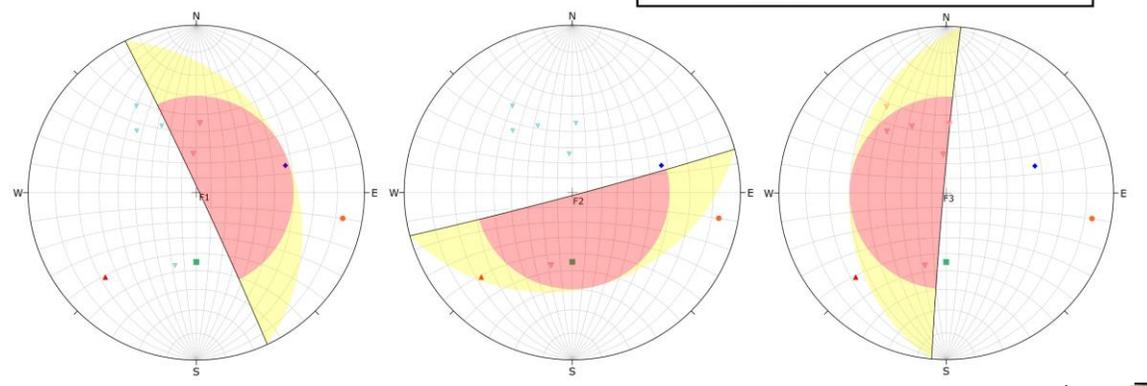


Number of positive tests per pixel:

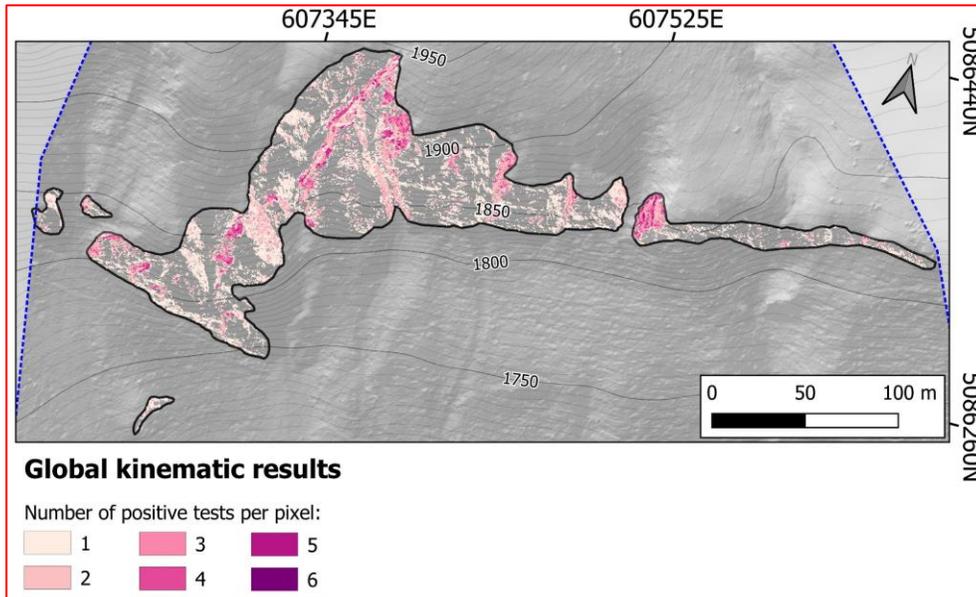


Symbol	ID	Quantity
◆	1	1
▲	2	1
■	3	1
●	4	1

Symbol	Feature
▽	Critical Intersection
▽	Intersection



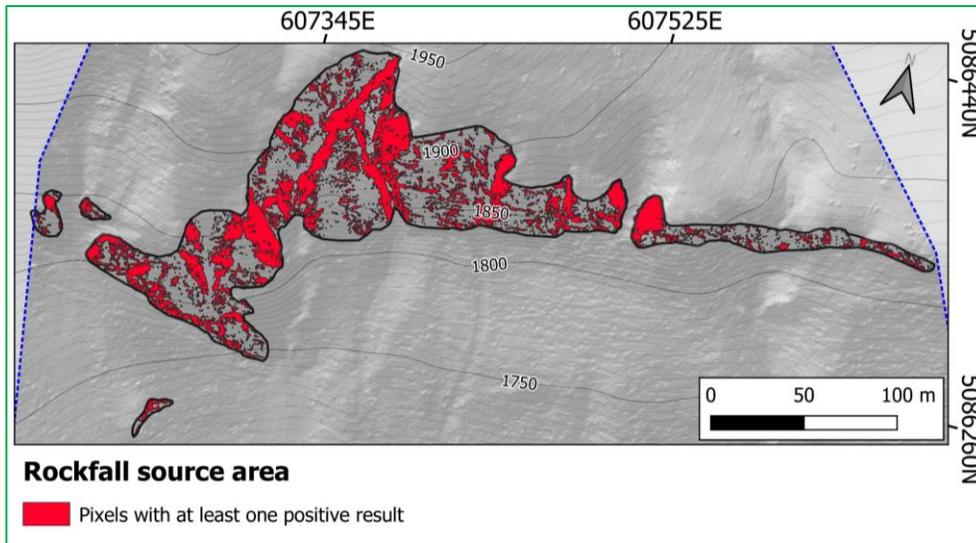
Esempio: Bazena (BS) - 3



Risultati Globali

N° di test positivi per cella:

- Indicazione sulle porzioni di parete più predisposte a produrre instabilità



Aree sorgente

Celle con almeno un test positivo:

- Mappatura accurata e rigorosa delle potenziali aree sorgente per fenomeni di caduta massi



Simulazioni numeriche

Criteria e approcci - 1

AMTT Tool 1.0

INPUT:

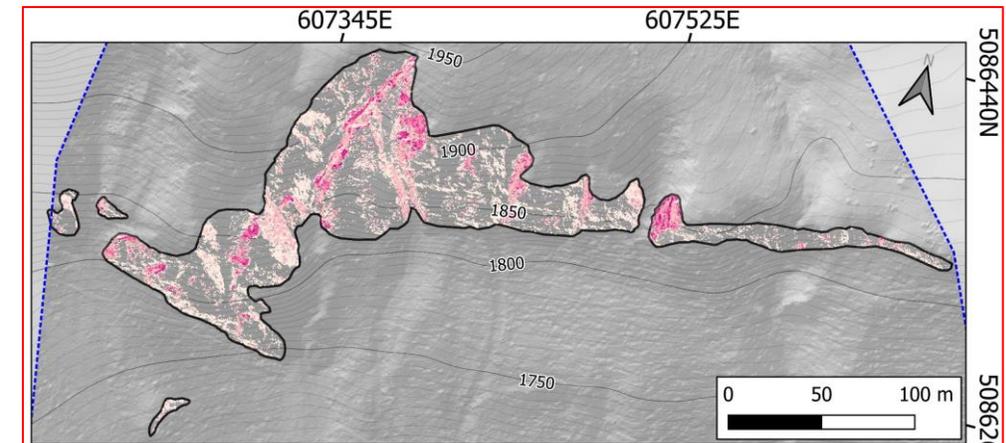
- ORIENTAZIONE delle discontinuità →
- ϕ delle discontinuità
- ESPOSIZIONE della parete
- PENDENZA della parete

Valori deterministici di
Immersione e Inclinazione



Analisi dei dati di
terreno e
riconoscimento
delle famiglie (K)
principali

Set	Dip	Dip Direction	Joint type
K1	58	253	Joint
K2	73	047	Bedding
K3	45	360	Joint
K4	83	280	Joint



Global kinematic results

Number of positive tests per pixel:



Approccio
DETERMINISTICO



- **NON** tiene conto della variabilità di orientazione
- **NON** tiene conto delle discontinuità random

AMTT Tool 2.0

INPUT:

- ORIENTAZIONE delle discontinuità →
- ϕ delle discontinuità
- ESPOSIZIONE della parete
- PENDENZA della parete

Valori misurati di
Immersione e Inclinazione



~~Analisi dei dati di terreno e riconoscimento delle famiglie (K) principali~~

Approccio RAW
DATA



- **CONSIDERA** la variabilità di orientazione
- **CONSIDERA** le discontinuità random

Esempio

Joint	Dip	Dip Direction	Joint type
1	58	253	Joint
2	73	047	Bedding
3	45	360	Joint
4	83	280	Joint
5	70	340	Joint
6	66	329	Joint
7	72	336	Joint
8	76	329	Bedding
9	73	329	Joint
10	74	340	Joint
11	74	340	Bedding
12	68	340	Joint
13	67	341	Joint
14	76	343	Bedding
15	72	341	Bedding
16	66	340	Bedding
17	75	176	Bedding
18	86	174	Joint
19	86	169	Joint
20	86	169	Joint
21	80	164	Joint
...

- ! = • Nuova definizione degli indici come %
- Identificazione di una soglia per classificare le aree sorgente
- Tempo di esecuzione più lungo
- Output dipendente direttamente dalla qualità del rilievo

AMTT Tool

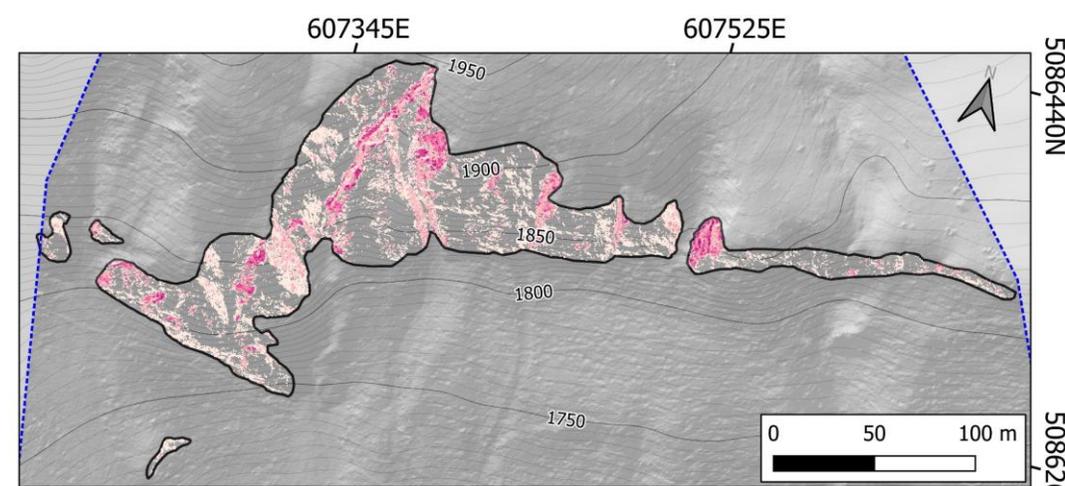
Strumento per l'esecuzione di Test Cinematici su pareti rocciose in modo automatico

- Permette di **mappare** le porzioni di parete rocciosa dove ciascuno delle quattro tipologie di cinematismo sono verificate
- Permette di **mappare** sulla parete rocciosa l'effetto globale di tutte le tipologie di cinematismo
- Permette di **mappare** sulla parete rocciosa le potenziali aree sorgente



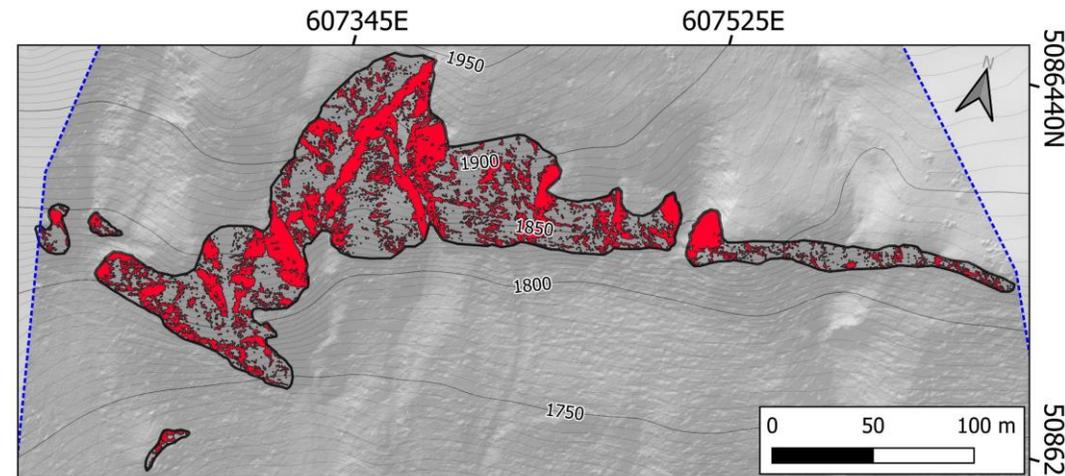
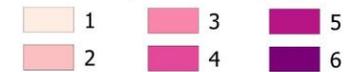
Approccio **DETERMINISTICO** e **RAW DATA**

! = AMTT rappresenta l'estensione in contesto cartografico dei Test di Markland, mantenendone la semplicità, immediatezza e facilità di lettura



Global kinematic results

Number of positive tests per pixel:



Rockfall source area

 Pixels with at least one positive result

AMTT Tool

Prospettive per il futuro:

- Traduzione in **Python** → Linguaggio **Open source** e estensione su **QGIS**
- Implementazione pseudo-applicabilità per **DSM** → Superamento limiti DEM
- Implementazione terzo approccio (**Probabilistico**) → Descrizione completamente probabilistica del problema

! → liberamente accessibile su GitHub:

<https://github.com/gessicaumili/AMTT2.0>



Grazie per l'attenzione!

gessica.umili@unito.it

