



# **CARATTERIZZAZIONE DI AMMASSI ROCCIOSI E CONSOLIDAMENTO DI PENDII IN ROCCIA**

Anna Maria Ferrero  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA  
UNIVERSITA' DI TORINO

## CARATTERISTICHE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI



L'AMMASSO ROCCIOSO è un mezzo naturale, soggetto a stati di tensione e deformazione esistenti e caratterizzato da una rete di discontinuità di diversa natura che ne rendono il carattere

**discontinuo**,

**non omogeneo**

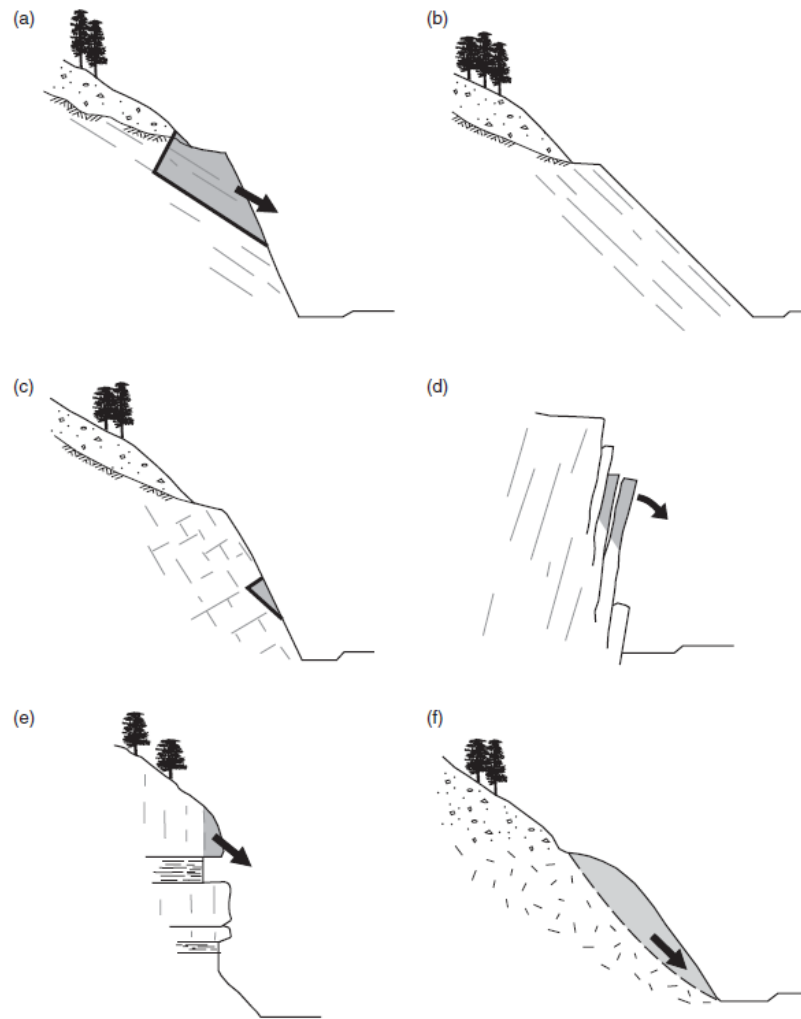
e generalmente **non isotropo**

E' costituito, quindi, da una serie di blocchi di roccia intatta, di varia natura separati da discontinuità (giunti, faglie, piani di stratificazione) che rappresentano "piani di debolezza " .

E' condizionato nel suo comportamento macroscopico dalle caratteristiche meccaniche della roccia intatta e soprattutto dalle caratteristiche geometriche e meccaniche delle discontinuità.



# INFLUENZA DELLA GEOLOGIA SULLE CONDIZIONI DI STABILITÀ DI PENDII (Hoek and Bray 1981)



*Figure 1.4* Influence of geological conditions on stability of rock cuts: (a) potentially unstable—discontinuities “daylight” in face; (b) stable slope—face excavated parallel to discontinuities; (c) stable slope—discontinuities dip into face; (d) toppling failure of thin beds dipping steeply into face; (e) weathering of shale beds undercuts strong sandstone beds to form overhangs; (f) potentially shallow circular failure in closely fractured, weak rock.

# STABILITA' DEI PENDII

CARATTERIZZAZIONE  
GEOLOGICA E  
GEOMECCANICA

MORFOLOGIA (Topografia) e  
CARATTERISTICHE fisico-  
meccaniche DEL VERSANTE

ANALISI CINEMATICHE  
ANALISI DI STABILITÀ

MODELLO DI CALCOLO  
continuo  
discontinuo

ANALISI PARAMETRICHE

MONITORAGGI

SCELTA DELLE GEOMETRIE E DEI RINFORZI

# DISCONTINUITÀ

**DEFINIZIONE:** discontinuità è il termine generale per qualsiasi interruzione di continuità o difetti strutturali in una massa rocciosa (fessure, piani di stratificazione, piani di scistosità, zone di indebolimento, faglie, ecc).

La roccia, essendo un materiale naturale, è stato soggetto per milioni di anni ad azioni meccaniche chimiche e termiche alle quali si possono sommare azioni tettoniche, che hanno comportato l'insorgere di stati tensionali di entità tale da provocarne la fratturazione.

Possono avere origine molto differente:

## ***DIFETTI di TESSITURA***

genesi e caratteristiche dell'ammasso roccioso  
(piani di strato, scistosità, microfessure,..)

## ***DIFETTI STRUTTURALI***

si creano dopo la formazione della roccia e sono dovuti alla storia tensionale della matrice rocciosa (faglie, giunti, pieghe, ecc.). Sono quindi causati dalla rottura del materiale roccioso che può coinvolgere sono alcuni grani o cristalli ovvero tagliare il corpo roccioso per lunghezze che variano dal millimetro al chilometro.

# DISCONTINUITÀ

Spesso, sotto l'aspetto ingegneristico, le discontinuità possono rappresentare il principale fattore influenzante la DEFORMABILITÀ, la PERMEABILITÀ e le CONDIZIONI DI ROTTURA di un ammasso roccioso. Ad esempio i problemi di stabilità dei versanti in roccia, molto spesso, sono causati da condizioni critiche raggiunte anche lungo singoli piani di discontinuità estesi e persistenti.

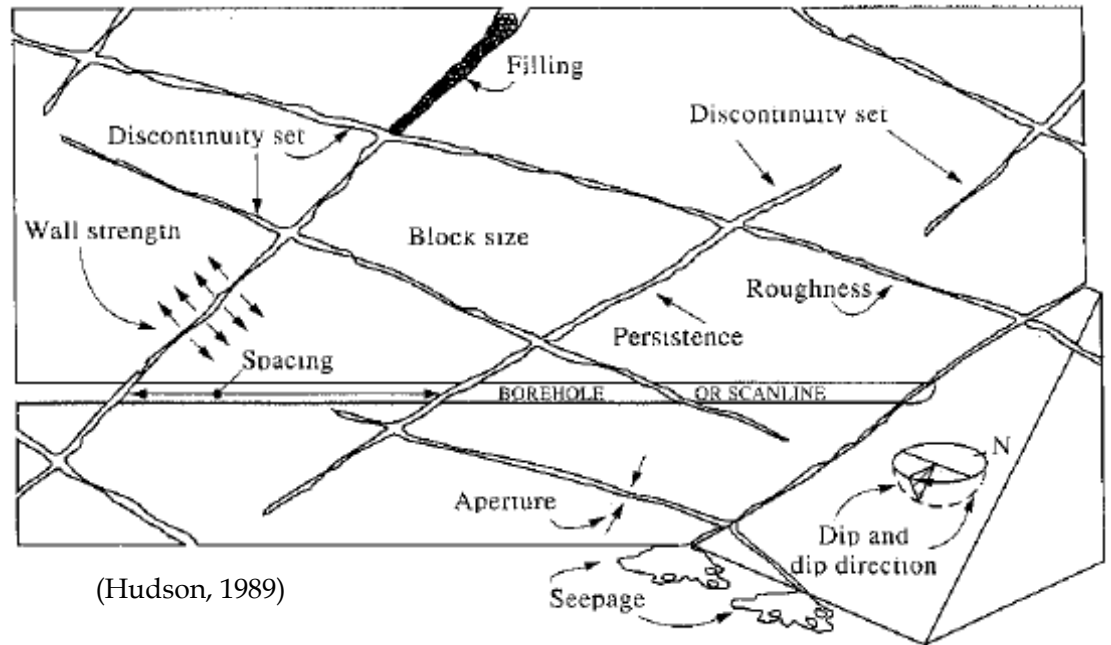
Per tale motivo è necessario comprendere a fondo le proprietà

GEOMETRICHE

MECCANICHE

IDROLOGICHE

delle discontinuità ed il modo in cui esse influenzano le proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso e, quindi, la realizzazione di un'opera o di un intervento in un ammasso roccioso



*Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 15, pp. 319–368  
© Pergamon Press Ltd 1978. Printed in Great Britain

**INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS  
COMMISSION ON  
STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS**

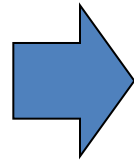
**SUGGESTED METHODS  
FOR THE QUANTITATIVE DESCRIPTION OF  
DISCONTINUITIES IN ROCK MASSES**

# RILIEVO GEOSTRUTTURALE AMMASSI ROCCIOSI

La caratterizzazione di un ammasso roccioso non può prescindere da un rilievo geostrutturale condotto con sistematicità al fine di descrivere quantitativamente le discontinuità presenti.

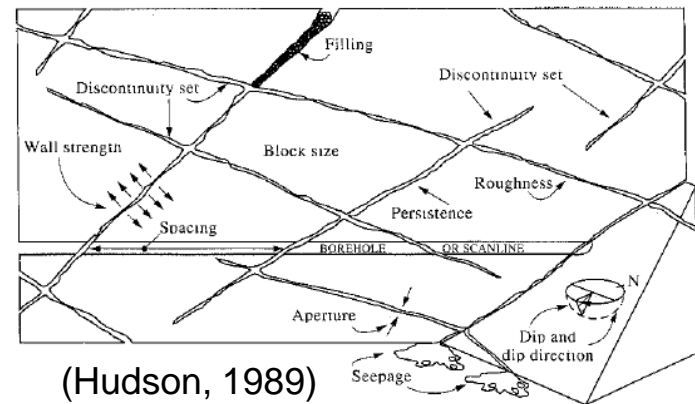
Le proprietà delle discontinuità che devono essere misurate includono (Priest 1983):

1. Orientazione
2. Spaziatura e Frequenza
3. Continuità o Persistenza



1. Numero di Sistemi
2. Forma e Dimensione dei Blocchi

4. Rugosità
5. Resistenza delle Pareti
6. Apertura
7. Riempimento
8. Filtrazioni



(Hudson, 1989)



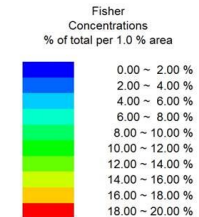
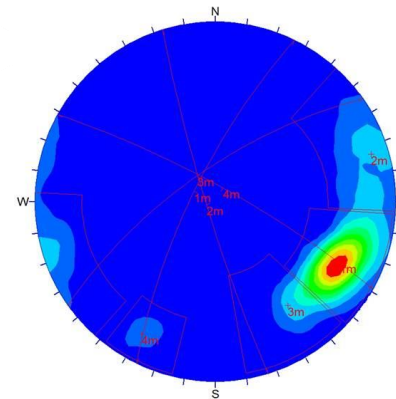
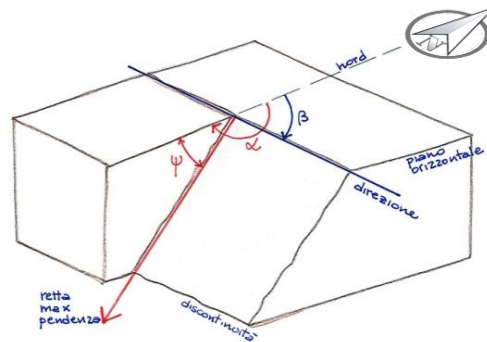
# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DISCONTINUITÀ

## Orientazione

DIP DIP DIRECTION

DIP STRIKE

PLUNGE TREND



No Bias Correction  
Max. Conc. = 19.8738%

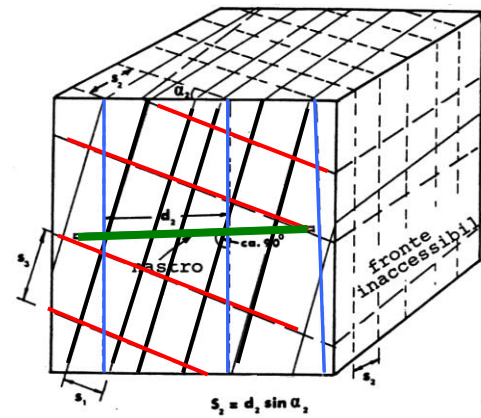
Equal Angle  
Lower Hemisphere  
441 Poles  
441 Entries

Orientations		
ID	Dip	Direction
1	m	75 / 296
2	m	84 / 253
3	m	70 / 325
4	m	80 / 029

## Spaziatura e Frequenza

DISTANZA MINIMA TRA DISCONTINUITÀ ADIACENTI MISURATA IN DIREZIONE ORTOGONALE ALLE DISCONTINUITÀ STESSE.

Normalmente ci si riferisce alla spaziatura media o modale di un sistema di discontinuità



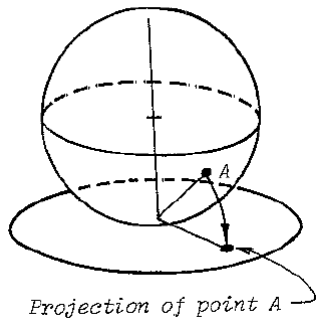
# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DISCONTINUITÀ

## 1. ORIENTAZIONE RAPPRESENTAZIONE GRAFICA

### Come dei dati 3D possono essere manipolati e rappresentati in un piano?

La rappresentazione grafica di una discontinuità (di un piano comunque orientato nello spazio) avviene attraverso la tecnica della Proiezione Sferica, che consente di rappresentare un piano 3D su un diagramma planare (2D).

Le proiezioni sferiche utilizzate per la rappresentazione di piani di discontinuità sono di due tipi:



#### **Proiezione stereografica equi-area (Lambert o Schmidt)**

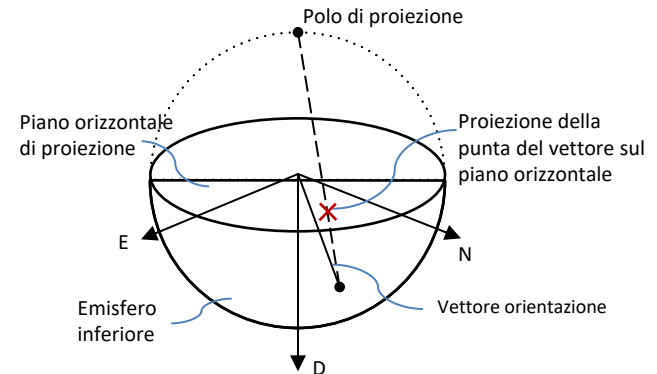
Mantiene le aree ma non la forma (piccole distorsioni).

E' utilizzata per effettuare analisi di tipo statistico sulla distribuzione spaziale delle discontinuità

#### **Proiezione stereografica equi-angola (Wulf)**

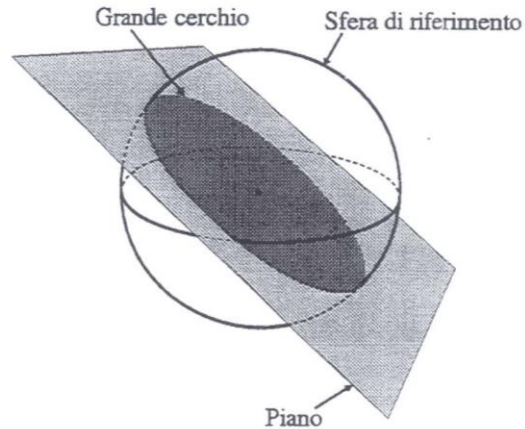
Mantiene gli angoli e quindi le forme (ma non le aree).

Viene utilizzata, ad esempio, nell'applicazione della Teoria del blocco chiave (Goodman & Shi) per l'identificazione dei blocchi instabili.



# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DISCONTINUITÀ

## 1. ORIENTAZIONE RAPPRESENTAZIONE GRAFICA

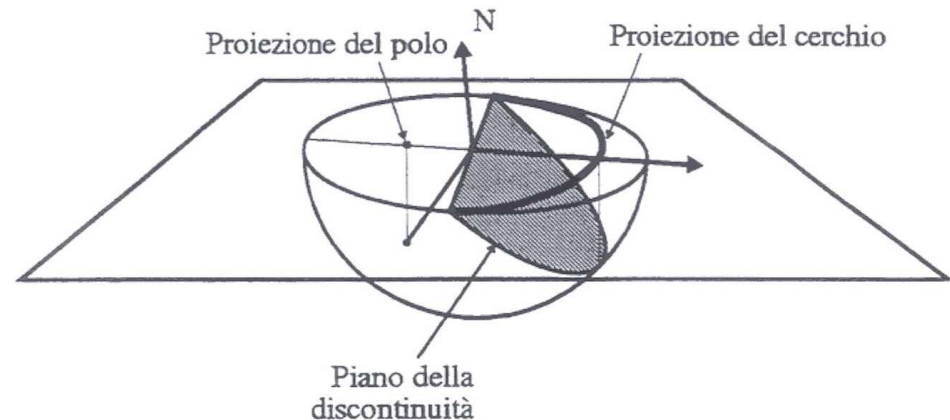


PROIEZIONE SFERICA DEL  
PIANO DI DISCONTINUITA' e del suo POLO

Sfera libera di muoversi nello spazio ma NON di ruotare (ogni direzione radiale è fissa nello spazio).

L'intersezione tra tale sfera ed il piano da rappresentare (contenente il centro della sfera) è un cerchio chiamato "GRANDE CERCHIO"

La rappresentazione grafica del piano si ottiene proiettando (con una delle tecniche viste) il grande cerchio sul piano di rappresentazione. Si considera solo uno dei due emisferi (in genere quello inferiore).



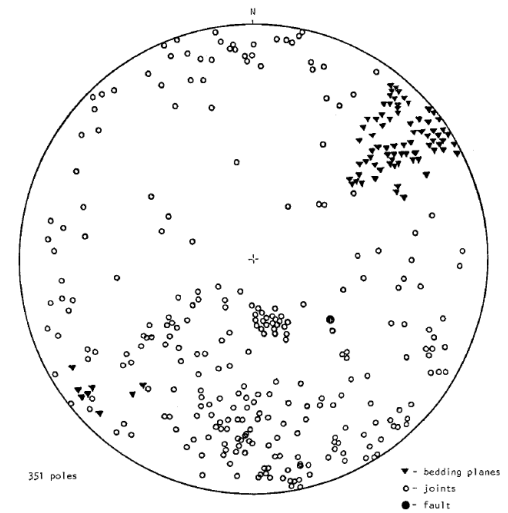
# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DISCONTINUITÀ

## 1. ORIENTAZIONE. RILIEVO DI NUMEROSE DISCONTINUITÀ

La concentrazione dei poli di uno stesso gruppo di discontinuità, può essere analizzata in modo da determinare **il valore centrale del sistema** e la **legge di distribuzione** del campione attorno ad esso.

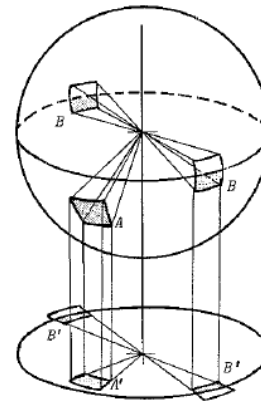
A tale scopo si deve analizzare un numero elevato di piani (351 in figura) e, pertanto, non si rappresentano i piani (curve) ma le loro normali (POLI).

Nella proiezione sferica i POLI rilevati presentano zone di addensamento più o meno evidenti prossime al valore centrale: questo permette di analizzare la distribuzione di frequenza dei dati di orientazione attraverso l'identificazione di curve di iso-densità, che assumono forma differente a seconda del tipo di proiezione scelta:



Anche nel caso ipotetico di distribuzione di orientazione simmetrica rispetto al valore centrale, le curve di egual valore di frequenza sono ellissi distorte nelle proiezioni equiaree e cerchi in quelle equiangole.

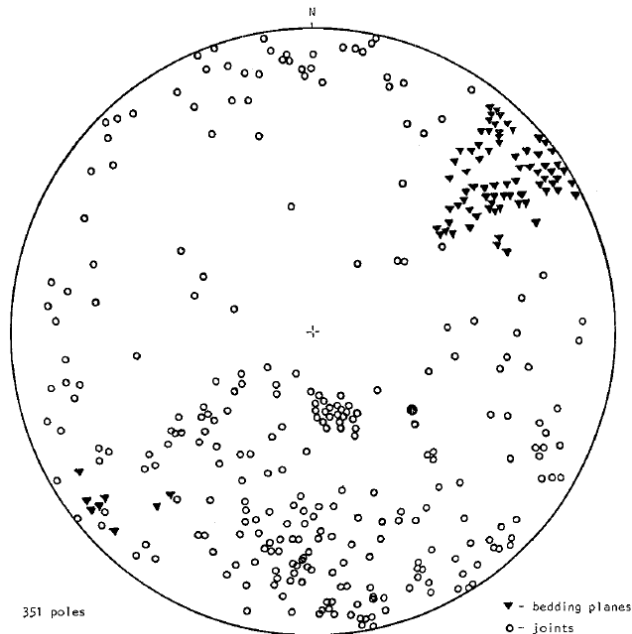
Dovendo eseguire analisi di frequenza nello spazio (numero di poli in un'area) si utilizza la proiezione EQUIAREA (mantiene invariate le aree)



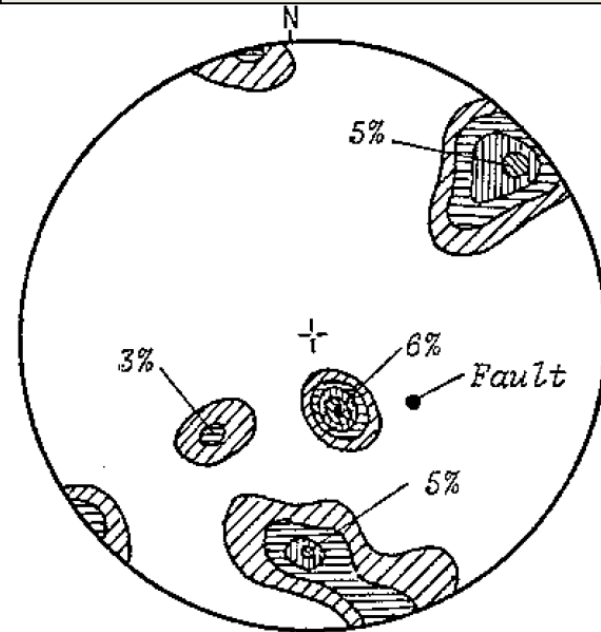
# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DISCONTINUITÀ

## 1. ORIENTAZIONE- DENSITA'

RAPPRESENTAZIONE EQUIAREA dei POLI



AREE DI ISO-FREQUENZA



# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DISCONTINUITÀ

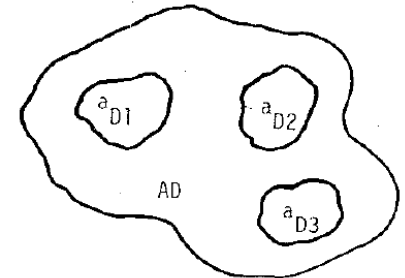
## Continuità o Persistenza

Rappresenta l'estensione della discontinuità all'interno dell'ammasso roccioso.

In realtà le discontinuità non presentano un'estensione infinita ma il piano che idealmente le contiene attraversa anche PONTI di ROCCIA (zone di roccia intatta). E' uno dei parametri più difficili da quantificare.

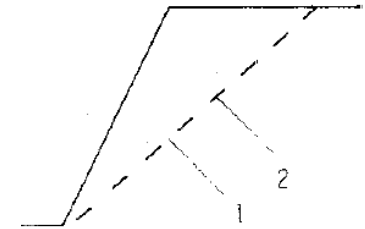
Il valore della persistenza  $K$  è definito come il rapporto tra la somma delle aree discontinue e l'area totale di riferimento.  $K$  varia, quindi, tra 0 e 1, valori limite che rappresentano, rispettivamente, la situazione di roccia intatta e di discontinuità infinitamente estesa.

$$K = \lim_{AD \rightarrow \infty} \frac{\sum_i a_{Di}}{A_D}$$



La persistenza può essere, in modo semplificato, quantificata osservando la lunghezza della traccia visibile dalla superficie esposta.

$$K = \lim_{L_S \rightarrow \infty} \frac{\sum_i l_{si}}{L_S}$$





# TECNICHE DI NON-CONTATTO

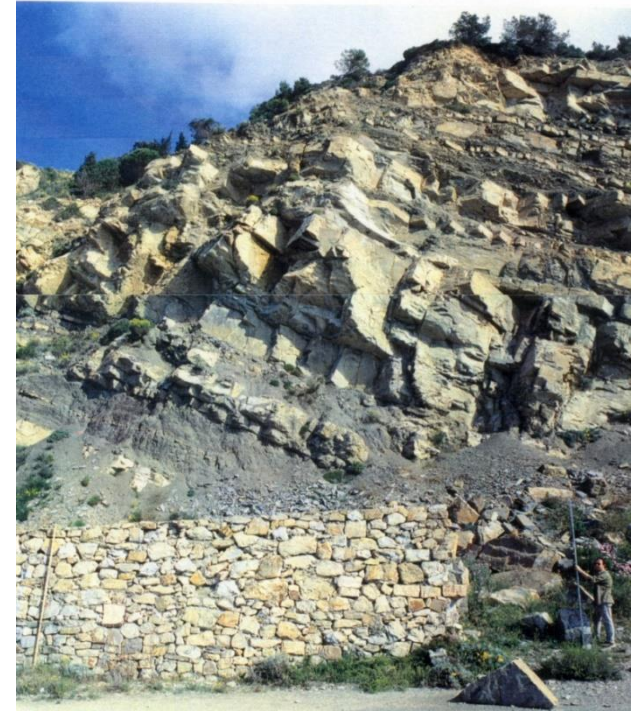
## AMMASSI ROCCIOSI

La superficie di un affioramento roccioso (soprattutto se naturale) è imposta e descritta piani di discontinuità.

Un insieme di punti in un sistema di riferimento scelto (**DSM – Digital Surface Model**) permette di descrivere geometricamente tale superficie.

I suoi sottoinsiemi possono descrivere le superfici affioranti (**discontinuità**) e quindi è possibile determinare (se il sistema di riferimento è opportunamente scelto) le caratteristiche geometriche:

- **Orientazione (Dip-Dip Direction)**
- **Spaziatura**
- **Lunghezza tracce (persistenza)**
- **Dimensioni blocchi**



# RILIEVO TRADIZIONALE



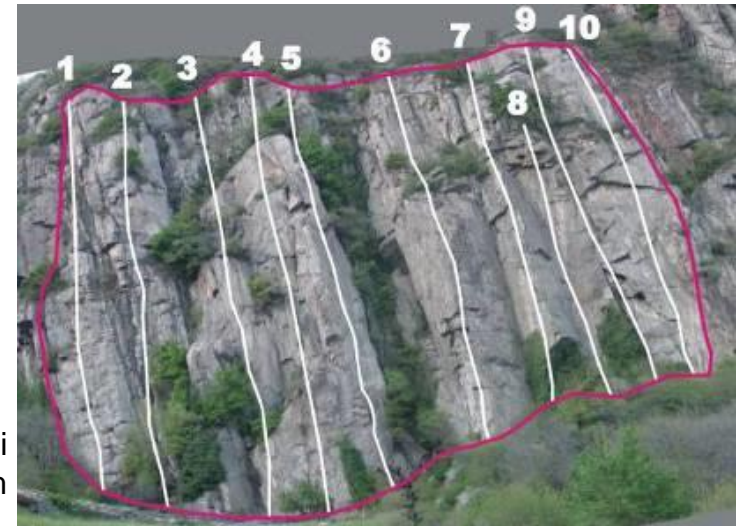


# RILIEVO TRADIZIONALE VS TECNICHE DI NON CONTATTO



## Limiti del rilievo tradizionale:

- Può essere condotto in condizioni di scarsa sicurezza!
- Può avere tempi di esecuzioni lunghi, costosi !
- Non tutte le pareti sono accessibili!
- Le pareti possono essere molto estese e quindi rappresentazione locale e poco obbiettivo !



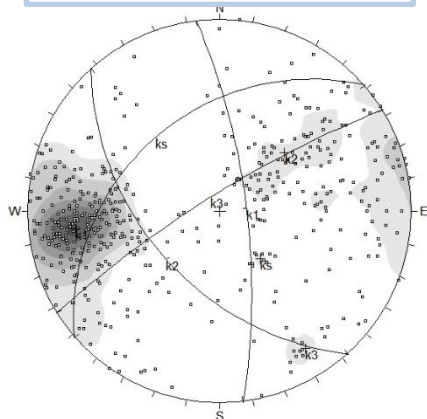
Rilievo con bussola geologica lungo stendimenti verticali lunghi 70 m



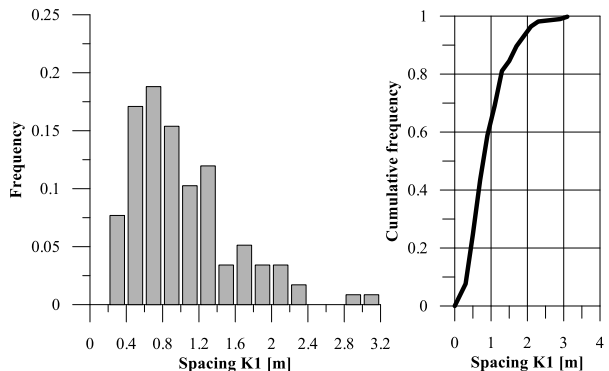
**DA QUI LA MESSA A PUNTO DI TECNICHE DI RILIEVO DI NON-CONTATTO**

# INCERTEZZA, VARIABILITA' e GRADO di CONOSCENZA di una GRANDEZZA

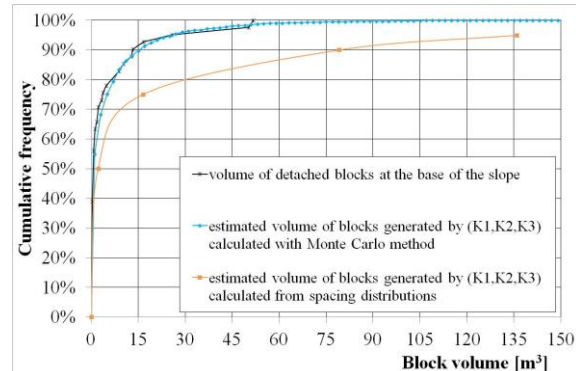
## Sistemi discontinuità e loro orientazione



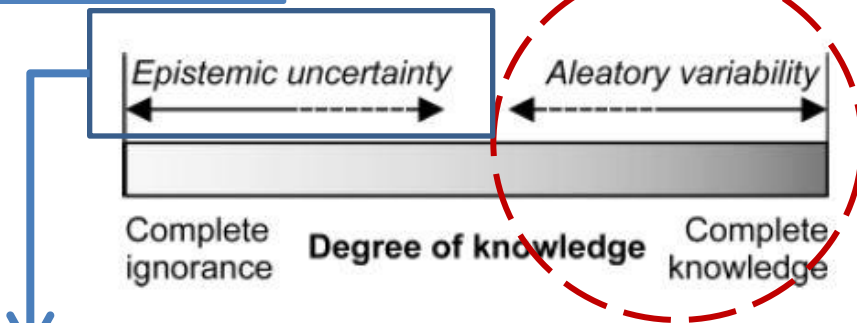
## Spaziatura



## Volume dei blocchi



(Guo & Du 2007).



- Precisione degli strumenti
- Precisione della Misura
- Campione rappresentativo

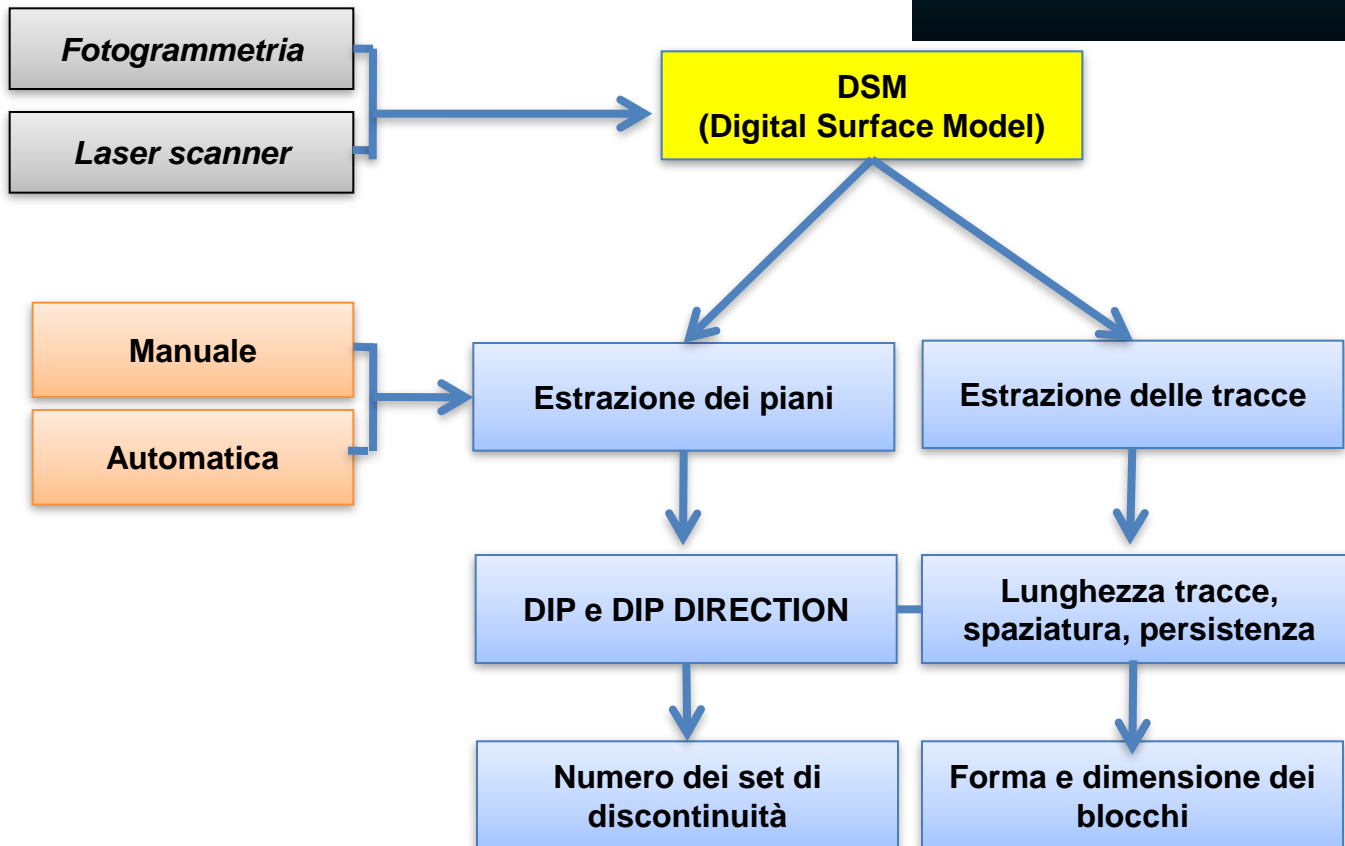
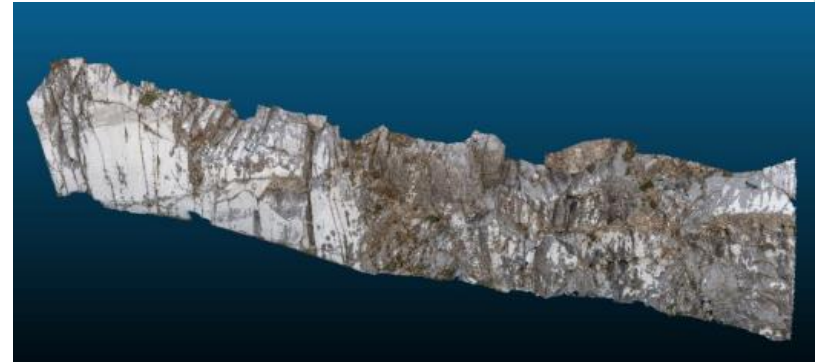
(Bedi & Harrison 2013).

QUANTITA' di informazioni

Sufficient quantity (large data set) Poor quality (imprecise data) <b>EPISTEMIC UNCERTAINTY</b>	Sufficient quantity (large data set) High quality (precise data) <b>ALEATORY VARIABILITY</b>
Insufficient quantity (small data set) Poor quality (imprecise data) <b>EPISTEMIC UNCERTAINTY</b>	Insufficient quantity (small data set) High quality (precise data) <b>EPISTEMIC UNCERTAINTY</b>

**PRECISIONE (qualità dell'informazione)**

# COME ACQUISIRE I DATI NECESSARI



# RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

## GENERAZIONE DTM CON TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE:

- 1) **Progettazione del blocco fotogrammetrico**  
*scelta delle ottiche più adatte*



- 2) **Acquisizione delle immagini**  
*spostamenti difficili, ostacoli alla visuale..*  
*Elicottero o il drone può essere buona soluzione!*

- 3) **Allineamento di immagini con Algoritmi di Structure & Motion:**  
*la qualità del matching tra pixel di immagini diverse dipende da tessitura del materiale*

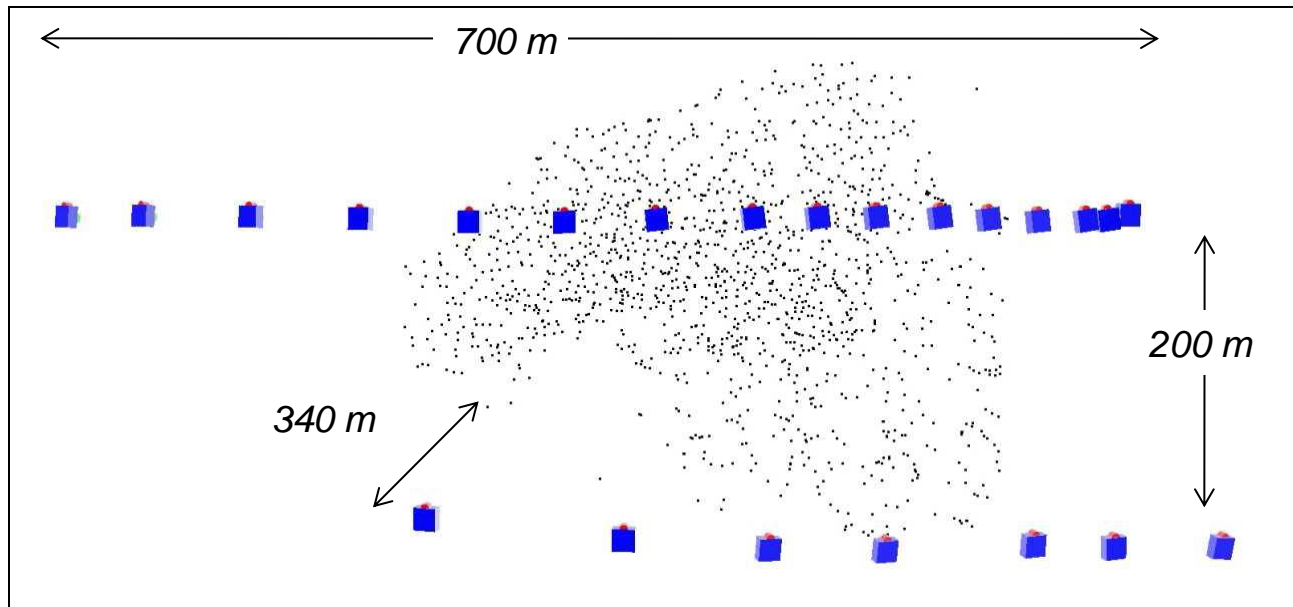




# RILIEVO FOTOGRAMMETRICO



24 images



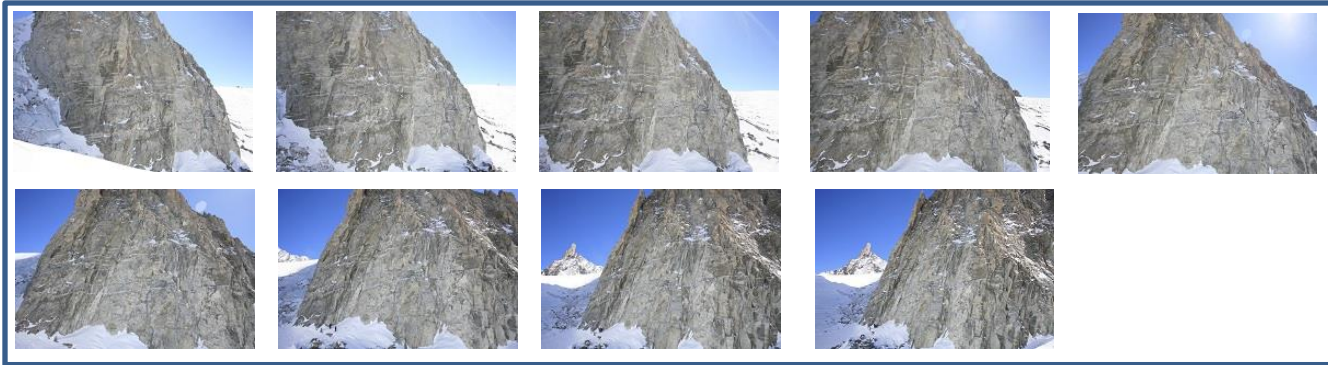
Rappresentazione 3D delle posizioni dei centri di presa (BLU) e dei punti di legame (neri)

Rilievo fotogrammetrico da Elicottero  
Bacino Pellaud (Val d'Aosta)



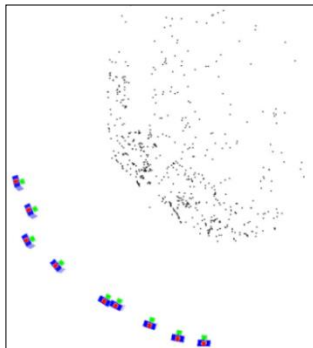
# RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

Una sequenza di immagini è automaticamente processata attraverso un software che utilizza un algoritmo tipo “Structure and Motion” con una routine Dense Matching in grado di ottenere un DSM (Digital Surface Model) della parete rocciosa ad elevata risoluzione.



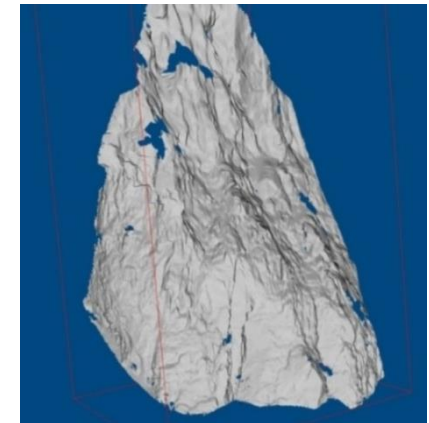
## ***Structure and Motion algorithms***

Sviluppato al DICATeA of University of Parma [Roncella et al., 2005]



## ***Dense Matching routines***

(DICATeA of University of Parma, Roncella, 2007)  
basato su specifici algoritmi: “Least Squares Matching (LSM)”  
[Grün, 1985] e “Multi-photo Geometrically Constrained Matching (MGCM)” [Grün et al., 1988]

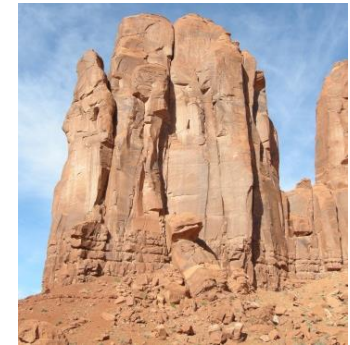


# RILIEVI LASER SCANNER

## GENERAZIONE DTM CON LASER SCANNER:

### 1) Messa in stazione del laser scanner e scansione

*trasporto strumentazione (pesante e ingombrante), base stabile per treppiede, tempi «lunghi» di acquisizione dati (scansione + immagini),*



In caso di parete con occlusioni o convessa non basta una sola scansione *collocazione target per co-registrazione delle scansioni*



Target  
riflettente  
su treppiede

Target in carta  
su roccia



# COSA SI OTTIENE

*Fotogrammetria*

*Laser scanner*

**DSM**  
**(Digital Surface Model)**

**Manuale**

**Automatica**

**Estrazione dei piani**

**Estrazione delle tracce**

**DIP e DIP DIRECTION**

**Lunghezza tracce,  
spaziatura, persistenza**

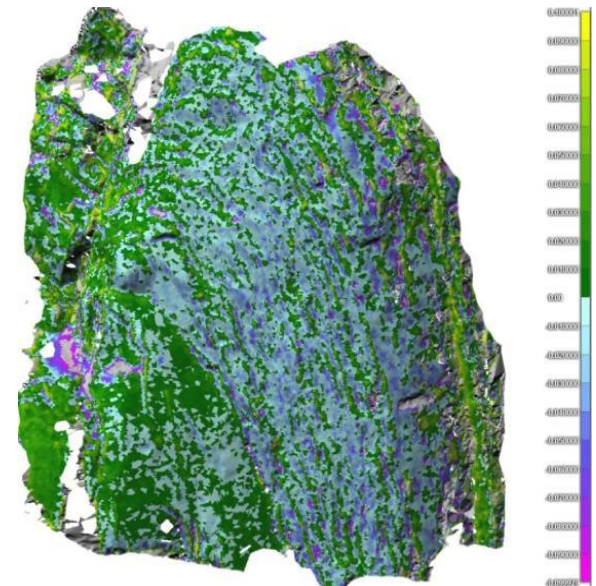
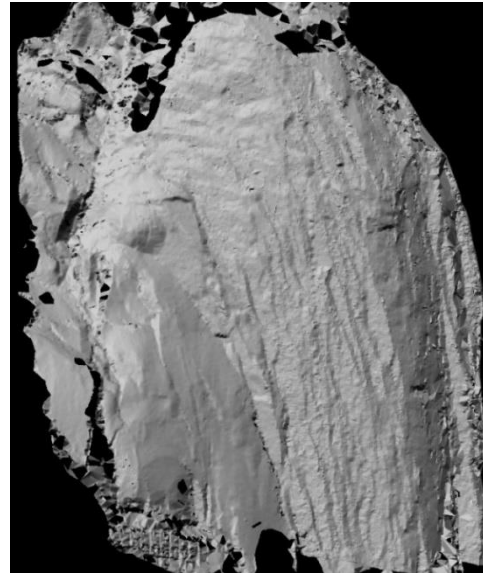
**Numero dei set di  
discontinuità**

**Forma e dimensione dei  
blocchi**



# LASER SCANNER VS FOTOGRAMMETRIA

Applicazione alla Aiguille du Midi Massiccio del Monte Bianco



## DSM OUTPUT

(Laser scanning & Photogrammetry)

- Nuvola di punti
- Struttura della mesh
- Modello 3D Photo-realistico
- accuratezza: fino a 1 cm
- Risoluzione dell'oggetto:  $0.1 \div 1$  pt/cm
- Dimensioni dell'oggetto: up to 1 km!

Confronto DSM photo vs Laser

Punti acquisiti: 400.000

Max distanza 7 cm

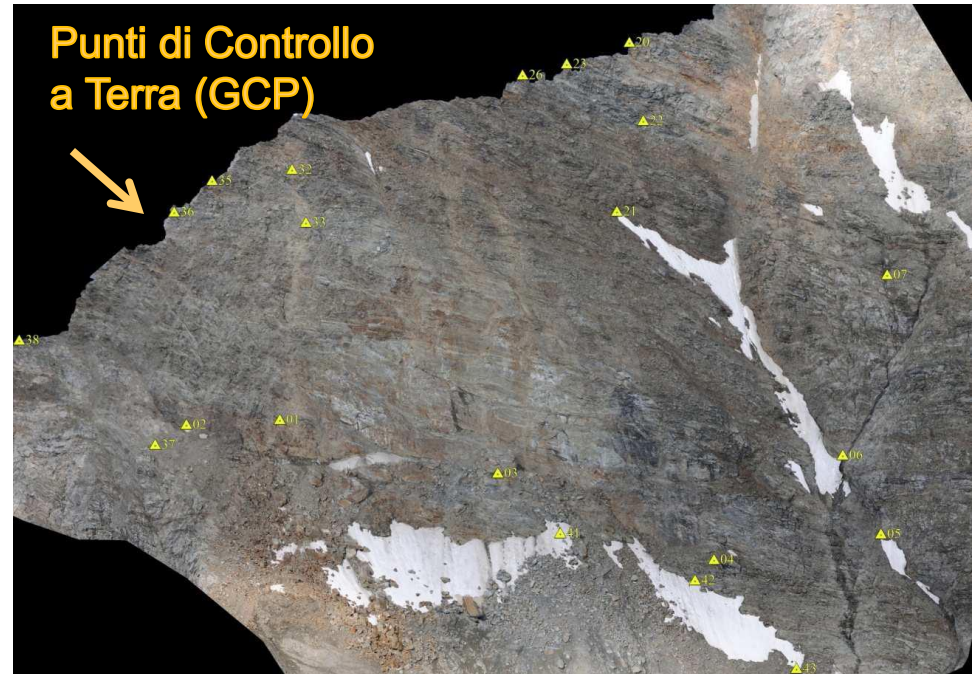
Dev. Stand 4 cm



STESSO PRODOTTO

# GEOREFERENZIAZIONE di un DSM

Un rilievo topografico di appoggio eseguito con una Stazione Totale permette di acquisire le coordinate di un sufficiente numero di **PUNTI DI APPOGGIO a TERRA** (Ground Control Points, GCP) al fine di associare il DSM ad un Sistema di coordinate scelto.



Rilievo fotogrammetrico



GCP = punti naturali riconoscibili anche sulle foto

Rilievo Laser scanner



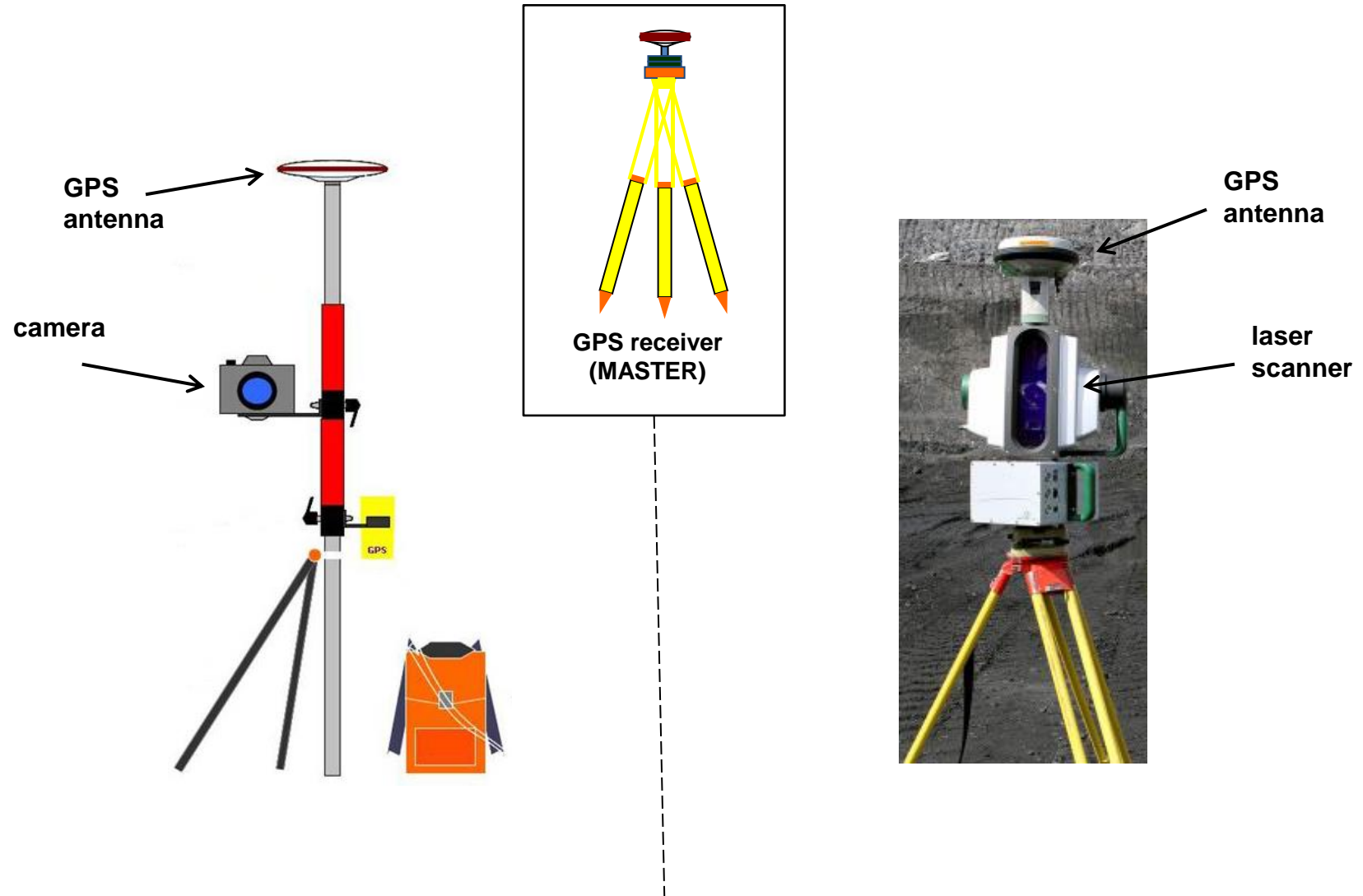
GPC = Target riflettenti o in altri supporti devono essere posizionati sull parete



...MA COME ??

# GEOREFERENZIAZIONE di un DSM

GPS è uno strumento estremamente utile...



# PROBLEMATICHE NELL'APPLICAZIONE DELLE TECNICHE di RILIEVO

## DSM CREATO CON TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE :

- Progetto del BLOCCO FOTOGRAMMETRICO (serie di immagini)– *scelta della lunghezza focale adeguata alla ripresa e scelta sulla base della minima distanza rispetto all'oggetto, percentuale di sovrapposizione, ecc.*
- Acquisizione delle immagini - difficoltà nel cambio di posizione, ostacoli alla visibilità...
- Processamento delle immagini – tessitura del materiale (ad esempio rocce molto scure o molto chiare, ghiaccio,...)

## DSM CREATO CON LASER SCANNER:

- Scansione -trasporto dello strumento (pesante e ingombrante)
- posizionamento del laser scanner
- tempi di acquisizione (scansione + immagini)
- posizionamento dei target per la georeferenziazione

# QUALE E' LA MIGLIORE?

## NON C'E' UNA RISPOSTA UNIVOCA...DIPENDE DALLE CONDIZIONI DI UTILIZZO

### **CONFRONTO STRUMENTAZIONE:**

Laser Scanner è più caro (circa 10 volte il costo di una camera digitale professionale – per altro non necessaria) LS pesante (circa 10-15kg + treppiede) and ingombrante (uno zaino non è sufficiente!)

### ***FOTOGRAMMETRIA PREFERIBILE se ci sono costrizioni riguardanti:***

- TRASPORTO per raggiungere il luogo ove svolgere il rilievo
- DURATA ACQUISIZIONE (ad esempio per il rilievo sistematico di fronti di scavo di gallerie; siti con rischio di collasso, ...)
- STAZIONAMENTO (es. Strati di neve alla base rendono instabile la ripresa; elicottero;...)
- CONDIZIONI CLIMATICHE ESTREME (basse temperature possono accorciare notevolmente la durata delle batterie)

### ***Laser Scanner PREFERIBILE se ci sono costrizioni riguardanti :***

- VISIBILITA', sia quando limita notevolmente la distanza tra immagini adiacenti – base di ripresa o elevate distanze dall'oggetto (rapporto  $z/B > 10$ )
- DURATA DEL PROCESSAMENTO DEI DATI (visualizzazione immediate del DSM; monitoraggio continuo; etc.)

# CARATTERISTICHE DSM

*Maggiore è la densità dei punti, migliore è la descrizione della superficie...*

**In Teoria :** Si generano sempre DSM con la massima densità di punti

**Nella Pratica:** E' necessario considerare le analisi successive e lo scopo per cui viene impiegato il DSM

**...questo perché dobbiamo essere in grado di gestire il DSM!!**

- ❑ Dimensione dei file:  
esempio per una parete rocciosa di 100m x 100m

Area (m <sup>2</sup> )	Passo acquisizione punti (m)	Densità (punti/m <sup>2</sup> )	N° punti	Dimensione File (MB)
10'000	0.01	10'000	100'000'000	9'542.9
10'000	0.1	100	1'000'000	95.4
10'000	1	1	10'000	0.95



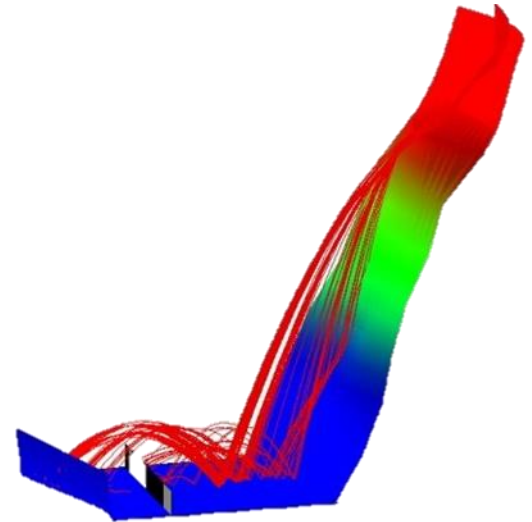
# DSM per STABILITA' DEI PENDII

## Densità richiesta:

- ✓ Poco elevata
- ✓ circa uniforme

**Passo:**  $1 \div 2$  m  $\Rightarrow$  densità  $1 \div 0.5$  punti/m<sup>2</sup>

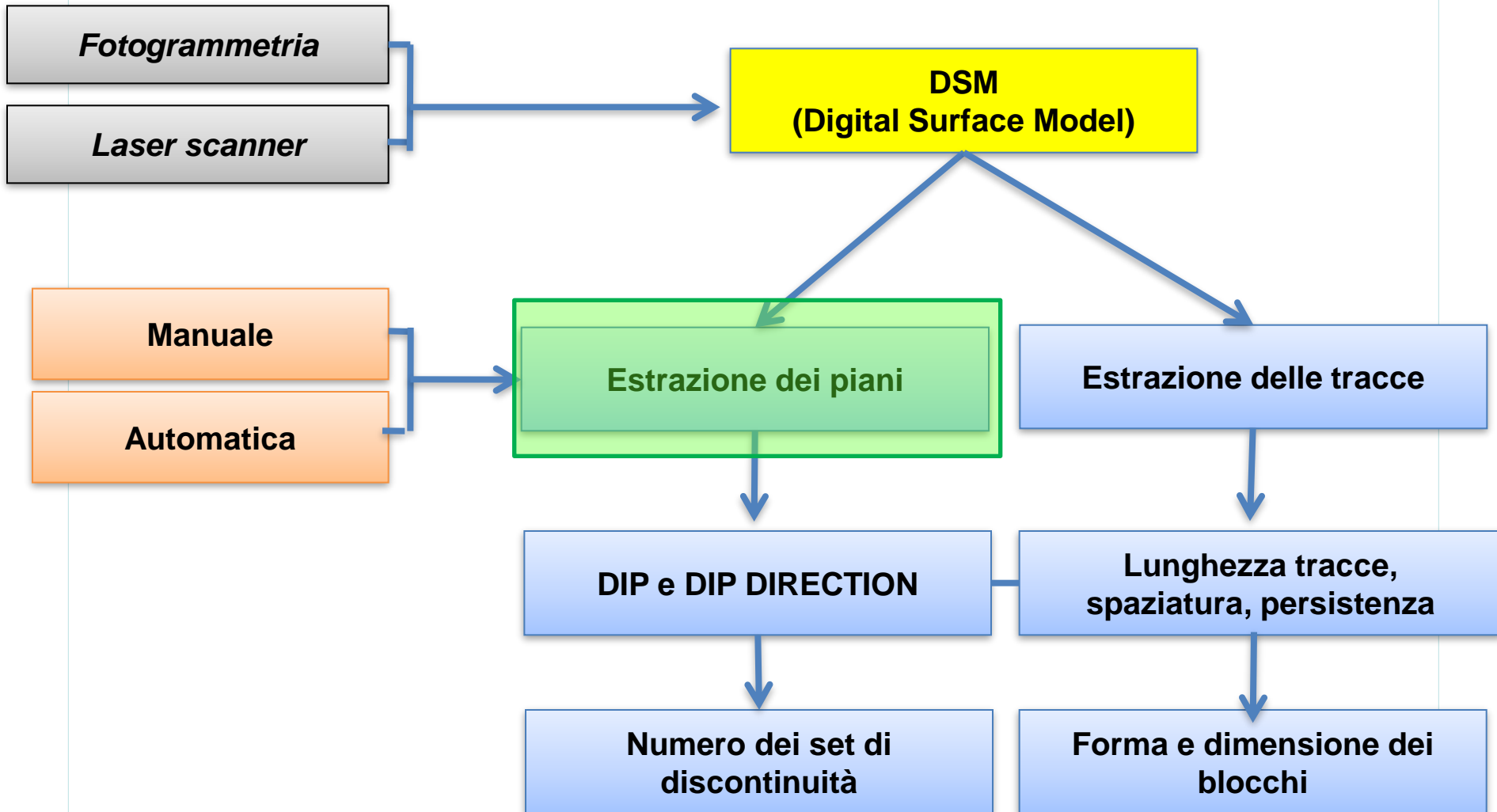
- Per creare sezioni adatte alla simulazione di fenomeni di caduta massi bastano l'andamento medio della superficie e le pendenze.



## Progettazione opere di difesa



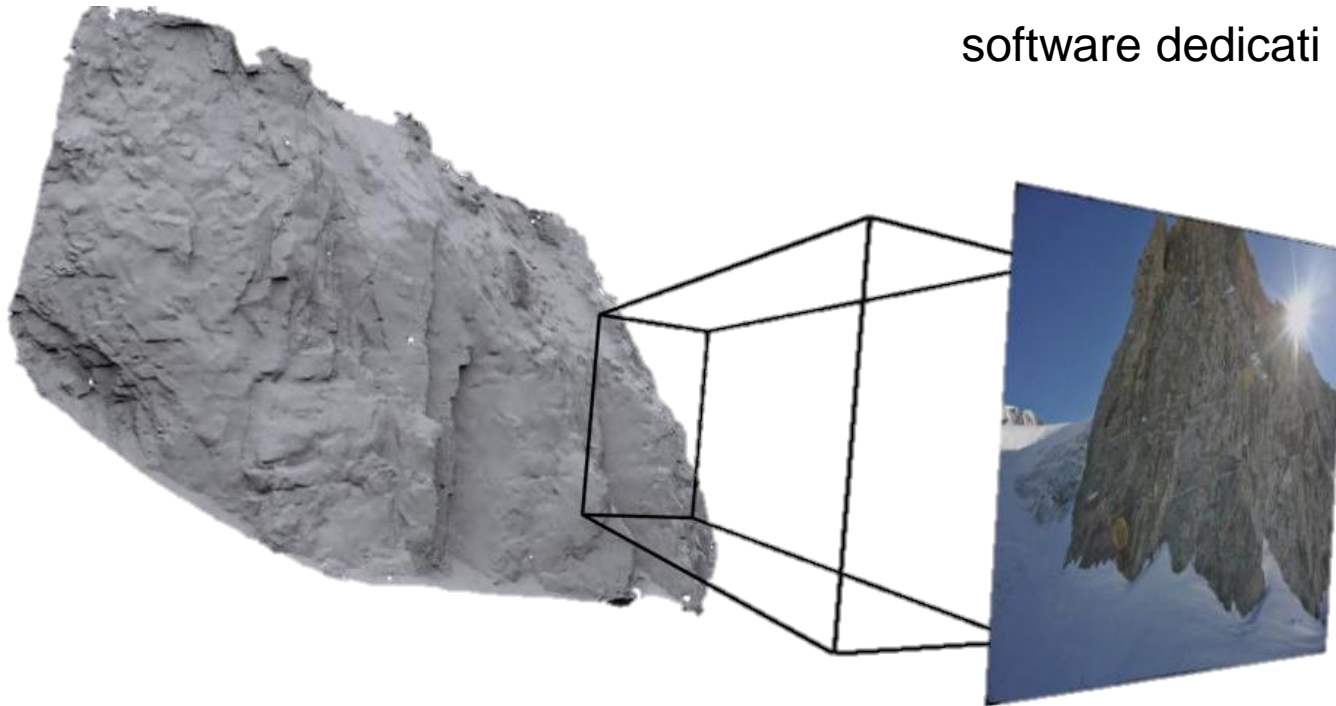
# COME ESTRARRE I DATI GEOSTRUTTURALI





# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE - PIANI DI DISCONTINUITA'

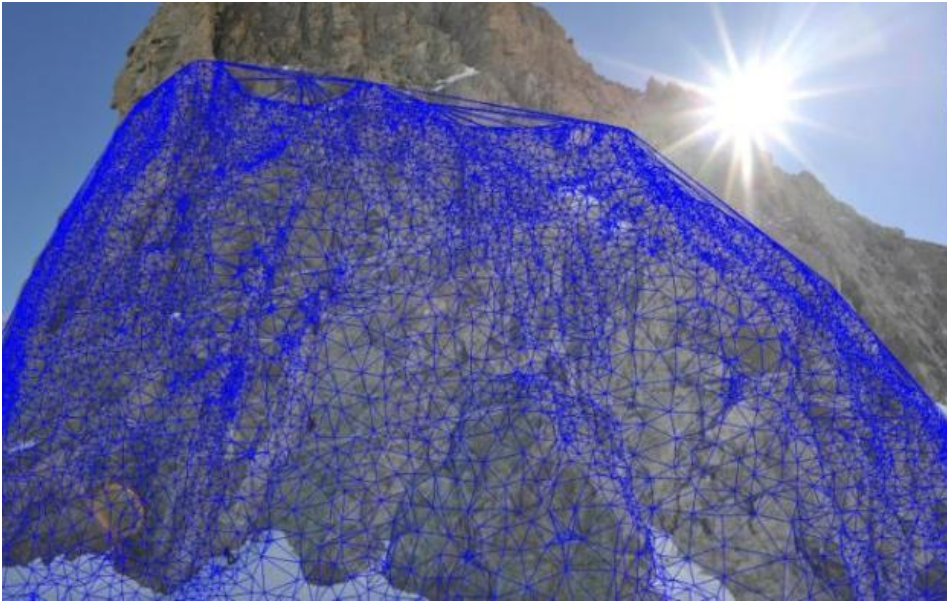
software dedicati (Rockscan)



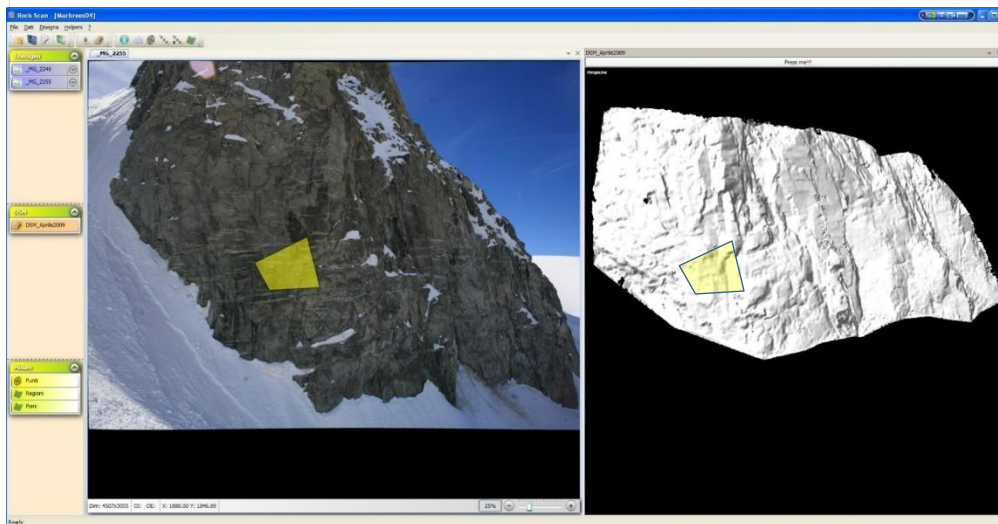
Dati di ingresso:

1. Modello Digitale di superficie (DSM) della parete
2. 1 o più fotogrammi orientati della parete (immagine digitale + parametri di orientazione dello scatto)
3. parametri di calibrazione della macchina fotografica (camera + obiettivo)

# CARATTERISTICHE GEOMETRICHE - PIANI DI DISCONTINUITA'



La nuvola di punti 3D (o la mesh triangolata) può essere proiettata sul piano della foto ed essere resa ad essa virtualmente solidale

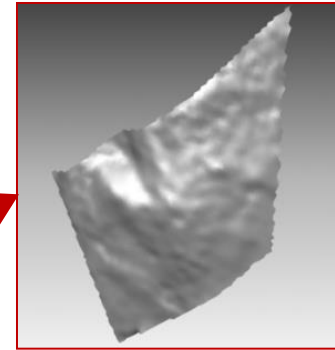
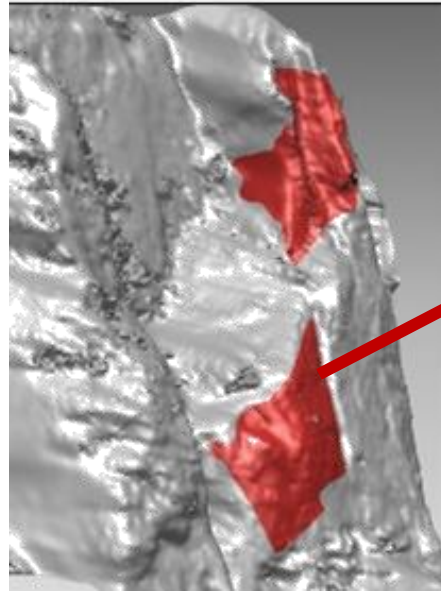


Interrogazione di una porzione di **immagine** selezionata

**CORRISPONDE**

all'interrogazione diretta del **DSM** nella medesima zona

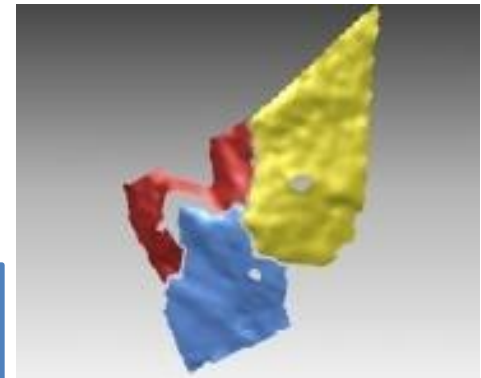
# ESTRAZIONE ORIENTAZIONE E POSIZIONE PIANI



Algoritmo di segmentazione  
**RANSAC**  
(Fischler & Bolles, 1981)

Selezione aree comprendenti un numero imprecisato di superfici di discontinuità con riconoscimento automatico dei singoli piani e determinazione di:

- **Numero dei piani individuati in un'area**
- **Equazione dei piani    DIP DIP DIRECTION**
- **Posizione discontinuità**
- **Spaziatura**



DIP parameter.dip - Blocco note

N. Plane	N. Sub_Plane	Dip	Dip Dir.	Xg	Yg	Zg
1	1	77.703340	237.411927	11.267728	43.907509	-61.578236
1	2	81.412236	74.805149	9.195218	39.547668	-60.289301
1	3	66.791321	274.284268	7.332679	43.053717	-60.219060
2	1	83.672940	257.327840	12.515467	62.998417	-68.054038
2	2	86.749582	114.150866	13.417916	64.535650	-68.242054
2	3	75.253326	273.040717	10.967354	68.727620	-70.553921
2	4	88.909384	257.073166	12.898222	64.135566	-67.537137

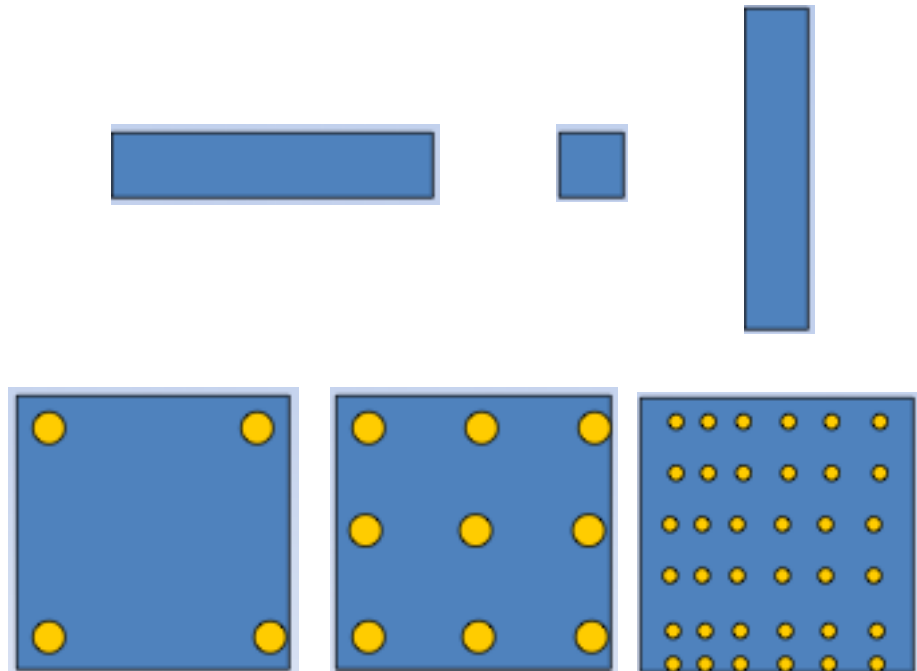
# PRECISIONE ED ACCURATEZZA NEL CALCOLO DELLA ORIENTAZIONE DI UN PIANO

## ipotesi

- Superfici di discontinuità PIANE e RETTANGOLARI
- Punti EQUAMENTE SPAZIATI in tutte le direzioni
- Precisione OMOGENEA delle tre coordinate (ellissoide sferico d'errore)
- Precisione espresso come percentuale della dimensione più piccola

## Analisi Parametriche

- rapporto  $b/h$ : 5, 1, 0.2
- Densità dei punti: 5 maglie
- Inclinazione del piano



# PRECISIONE ED ACCURATEZZA NEL CALCOLO DELLA ORIENTAZIONE DI UN PIANO

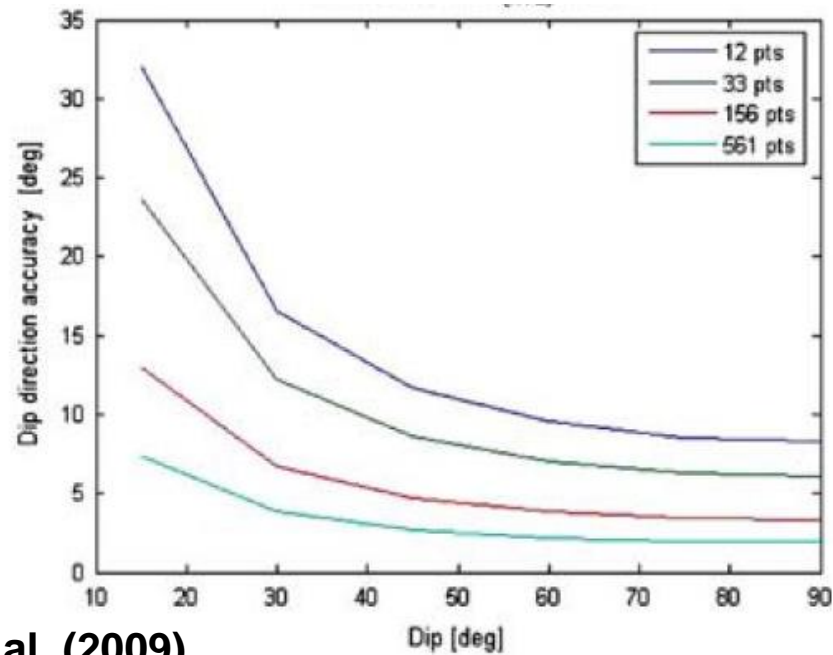
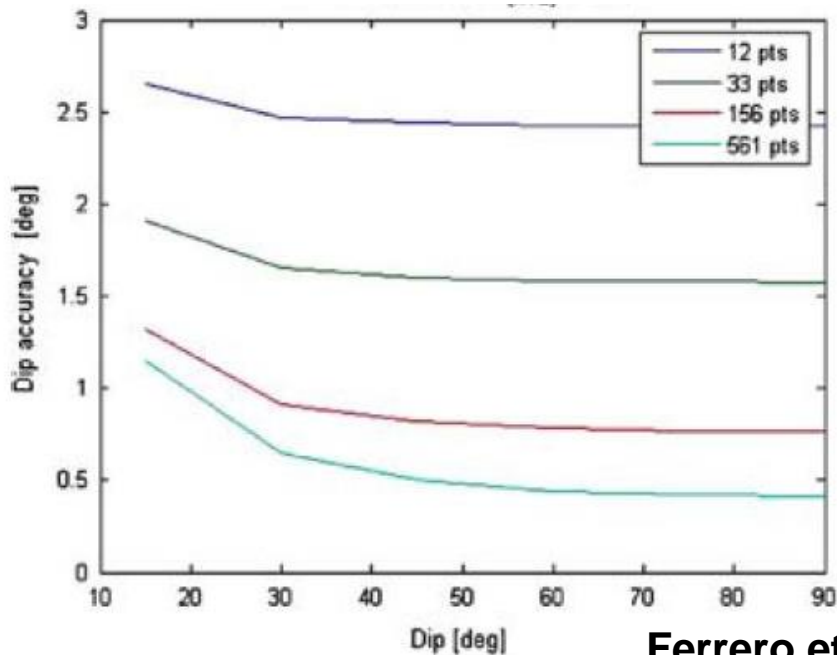
$h/b = 5$

Dip dir =  $90^\circ$

$\sigma_{(XYZ)}/b = 0.05$

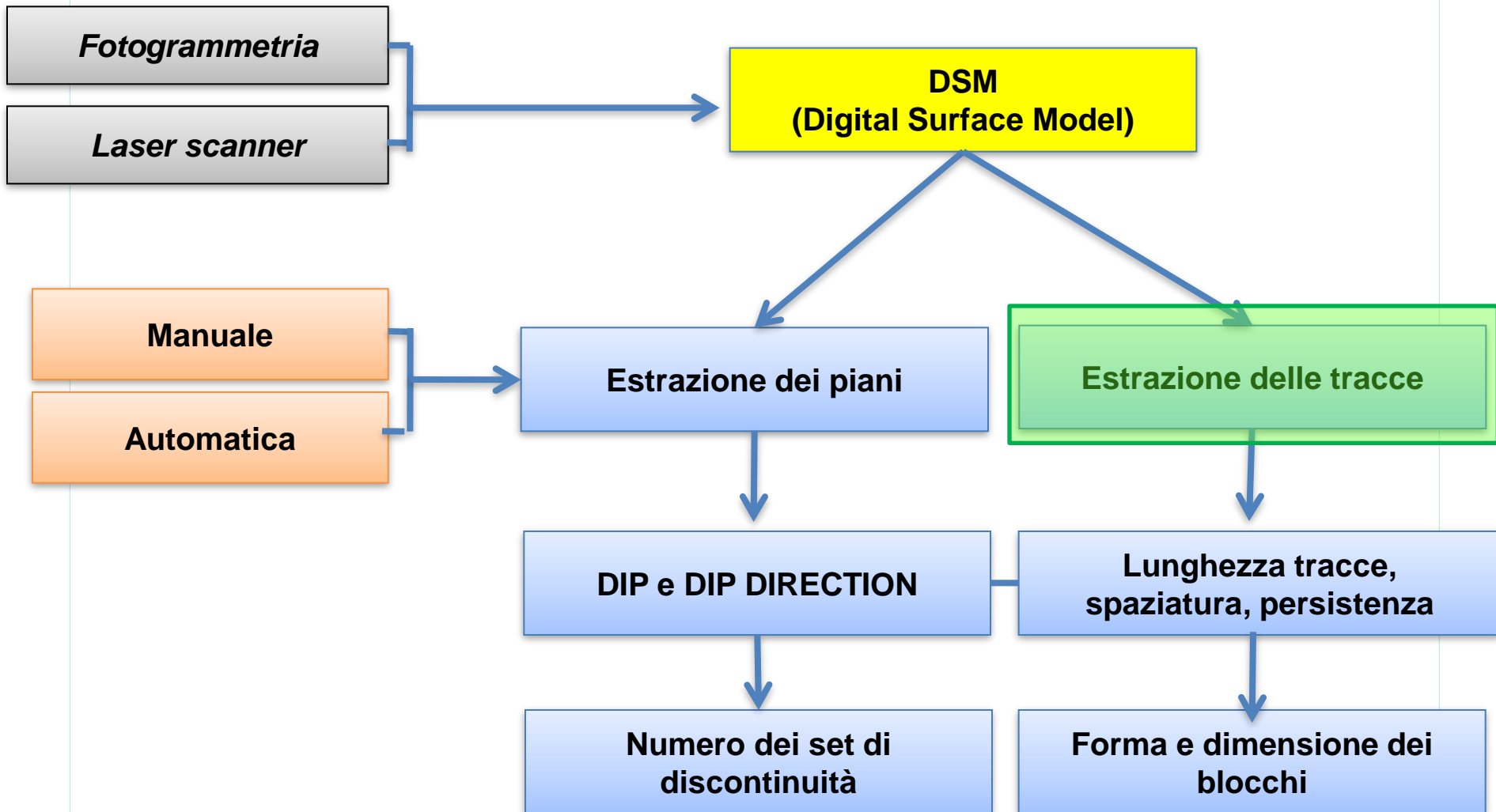
grid spacing =  $k * \min(b, h)$

points	k	Grid spacing
12	1	1
33	0.5	0.5
156	0.2	0.2
561	0.1	0.1



Ferrero et al. (2009)

# COME ESTRARRE I DATI GEOSTRUTTURALI



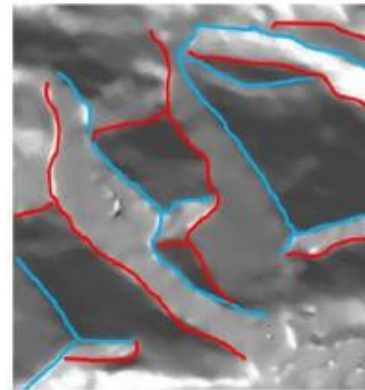


# RICONOSCIMENTO ED ESTRAZIONE TRACCE

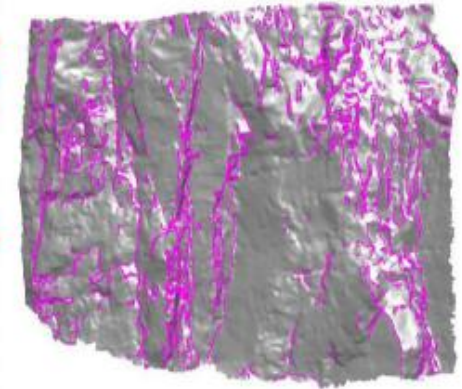
## **IDEA:**

Assumere che le linee di rottura di un DSM di un ammasso roccioso coincidano con le tracce di discontinuità.

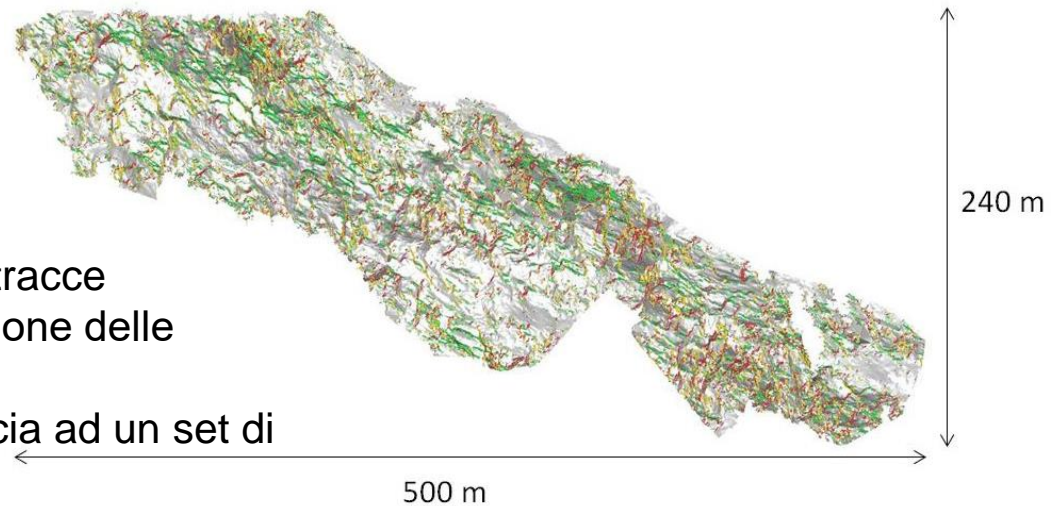
CURVATOOL code  
(Umili, 2012)



(a)



(b)



## **FASI DEL METODO:**

- Estrazione automatica delle tracce
- Determinazione dell'orientazione delle tracce
- Attribuzione di ciascuna traccia ad un set di discontinuità
- Misura delle lunghezze delle tracce e delle spaziature

# COME ESTRARRE DATI GEOSTRUTTURALI

*Fotogrammetria*

*Laser scanner*

**DSM**  
**(Digital Surface Model)**

**Manuale**

**Automatica**

**Estrazione dei piani**

**Estrazione delle tracce**

**DIP e DIP DIRECTION**

**Lunghezza tracce,  
spaziatura, persistenza**

**Numero dei set di  
discontinuità**

**Forma e dimensione dei  
blocchi**



# DETERMINAZIONI INDIRETTE: VOLUME DEI BLOCCHI

L'ammasso roccioso è caratterizzato dalla presenza di blocchi risultanti dall'intersezione delle discontinuità, definiti da forma e dimensioni determinate dalle caratteristiche geometriche sopra descritte:

- **forma dei blocchi** è correlata al **numero di sistemi di discontinuità** ed alla loro **orientazione relativa**
- **dimensione** dei blocchi è influenzata dalla **spaziatura e dalla persistenza** caratteristica dei sistemi di giunti.

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

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

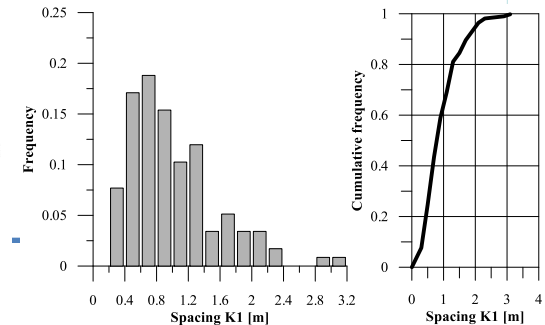
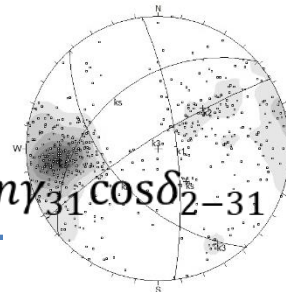
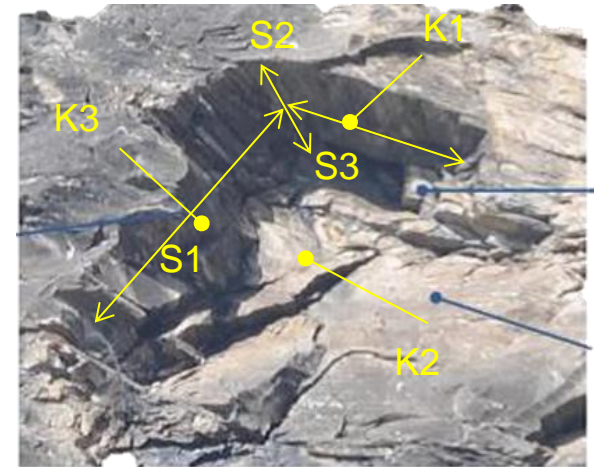
3 sistemi di discontinuità:

S1, S2 e S3 spaziature caratteristiche dei sistemi

$\gamma_{12}$ ,  $\gamma_{13}$ ,  $\gamma_{23}$ , angoli tra i piani medi dei sistemi

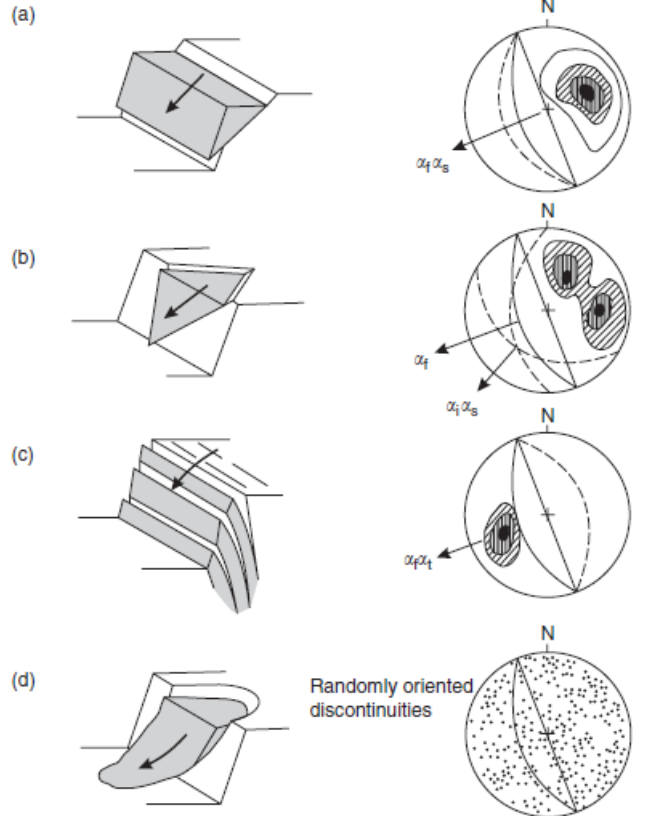
$V_{BO}$  Volume caratteristico definito da piani perpendicolari

## Misure ed osservazioni Dirette

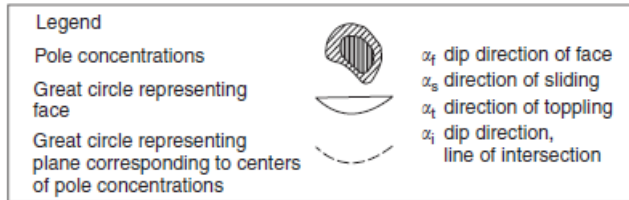


**Umili et al.  
(2024)**

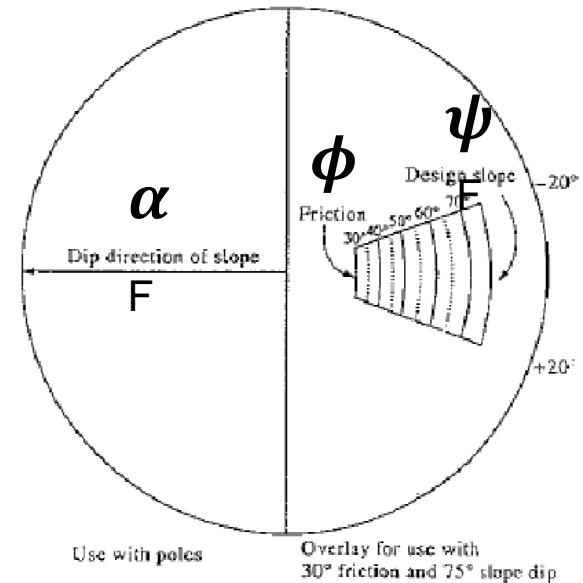
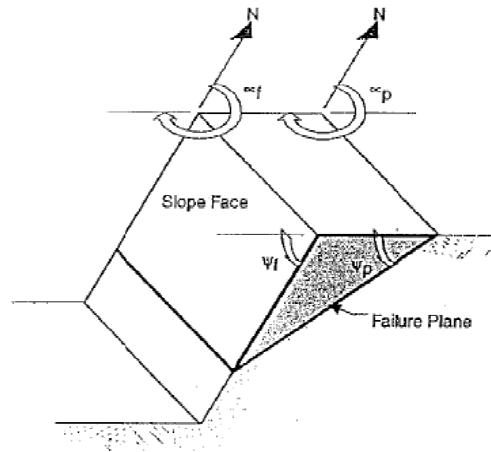
# ANALISI CINEMATICHE



Il test di Markland, permette, attraverso un'analisi comparata della giacitura dei sistemi di discontinuità presenti nell'ammasso e dell'orientazione del versante, di identificare il tipo di instabilità come scivolamento planare, scivolamento tridimensionale (o a cuneo), ribaltamento a blocchi o ribaltamento flessionale.



# ANALISI CINEMATICHE SCIVOLAMENTO PLANARE



$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_P = \alpha_F \pm 20^\circ \\ \phi < \psi_P < \psi_F \end{array} \right.$$

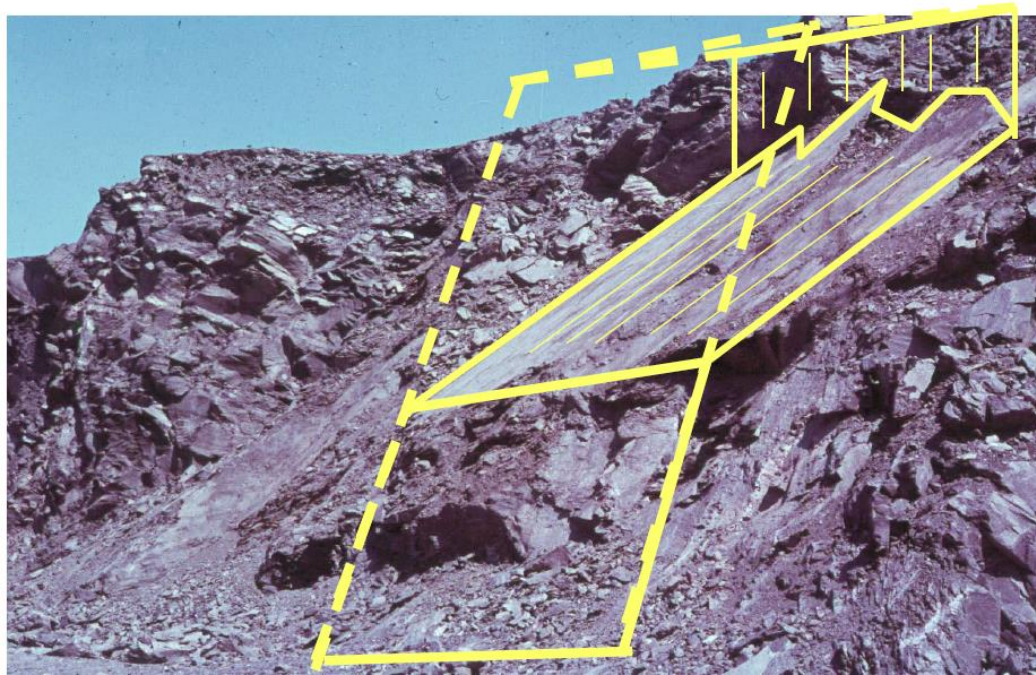
P = piano di discontinuità

F = fronte del pendio

«MASCHERA» da sovrapporre allo stereogramma

Caso:  $\phi = 30^\circ$ ,  $\psi_F = 75^\circ$   
Cerco i poli che ricadono nella finestra

# ANALISI CINEMATICHE SCIVOLAMENTO PLANARE

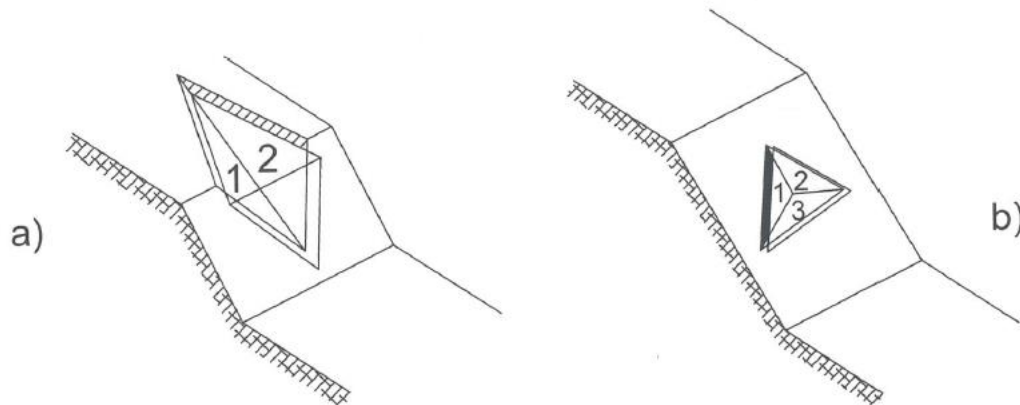




# ANALISI CINEMATICHE SCIVOLAMENTO TRIDIMENSIONALE

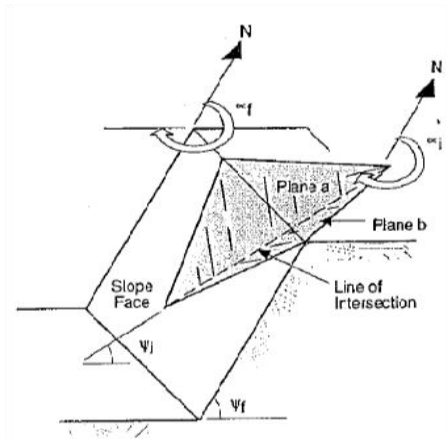
Il più semplice schema di scivolamento tridimensionale fa riferimento ad un cuneo di roccia di forma tetraedrica. Si possono distinguere 2 diverse situazioni:

- Due facce di tetraedro libere e due all'interno dell'ammasso: solitamente si verifica in fronti di scavo.
- Una sola faccia libera: caratterizza dissesti modesti che interessano solo porzioni del fronte (es. gallerie)





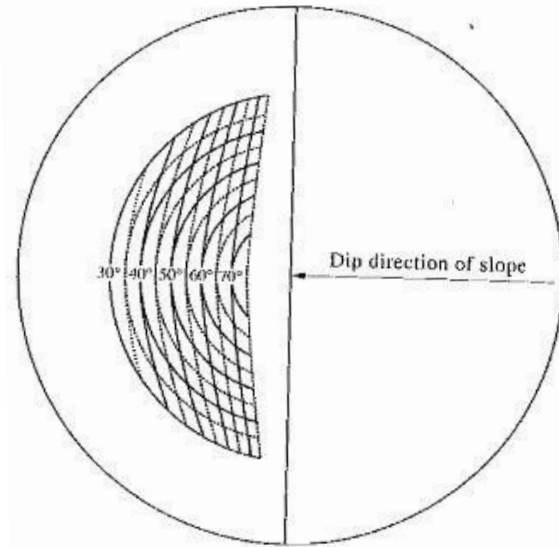
# ANALISI CINEMATICHE SCIVOLAMENTO TRIDIMENSIONALE



$$\left[ \begin{array}{l} |\alpha_F - \alpha_i| < 90^\circ \\ \phi < \psi_i < \psi_F \end{array} \right.$$

I = intersezione tra due piani di discontinuità

F = fronte del pendio

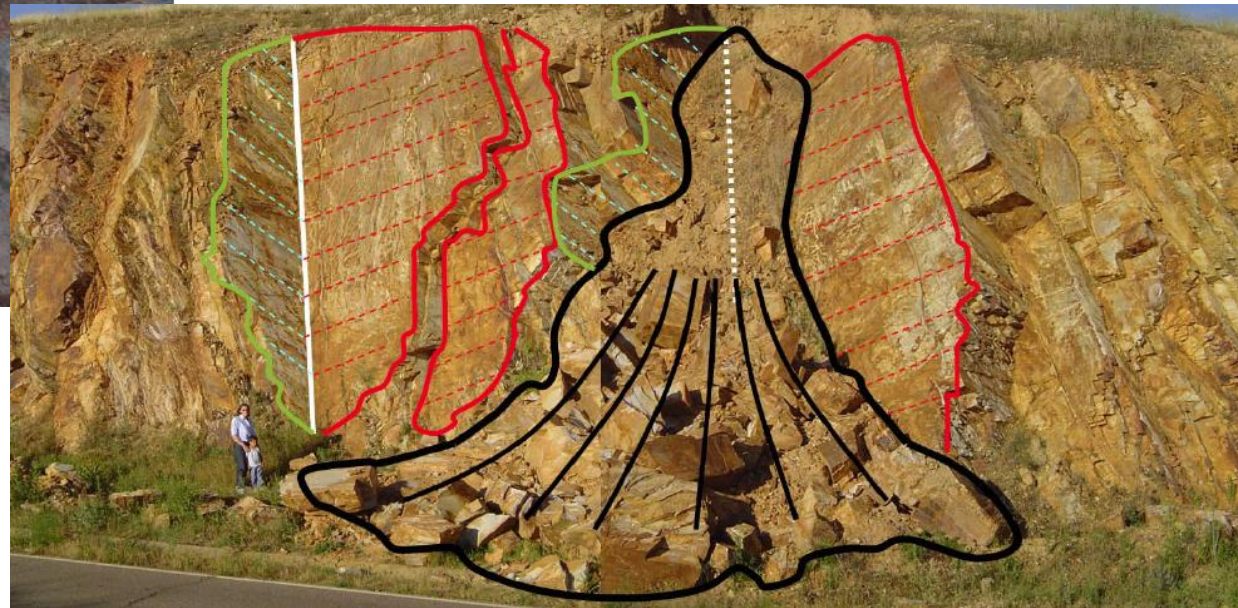


«MASCHERA» da sovrapporre allo stereogramma

Caso:  $\phi = 30^\circ$ ,  $\psi_F = 75^\circ$

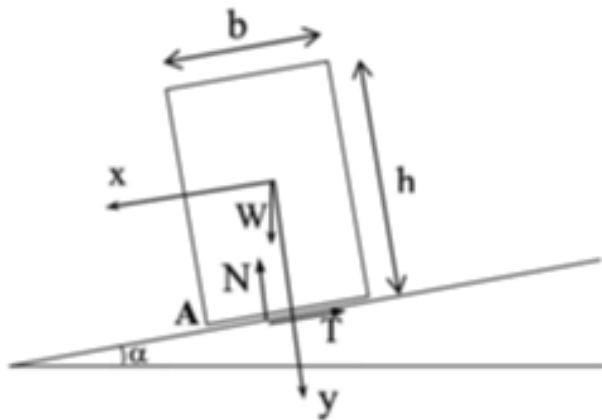
Cerco le intersezioni che ricadono nella finestra

# ANALISI CINEMATICHE SCIVOLAMENTO TRIDIMENSIONALE



## ANALISI CINEMATICHE RIBALTAMENTO

Con il termine ribaltamento (toppling) si identificano quei fenomeni di instabilità che si manifestano con la rotazione rigida di blocchi o la flessione continua verso valle di lastre di roccia, delimitate da discontinuità parallele al fronte, tipicamente immergenti verso monte e notevolmente inclinate o subverticali.



$$T = N \cdot \tan \phi$$

$$T = W \cdot \sin \alpha$$

$$N = W \cdot \cos \alpha$$

$$\tan \phi > \tan \alpha$$

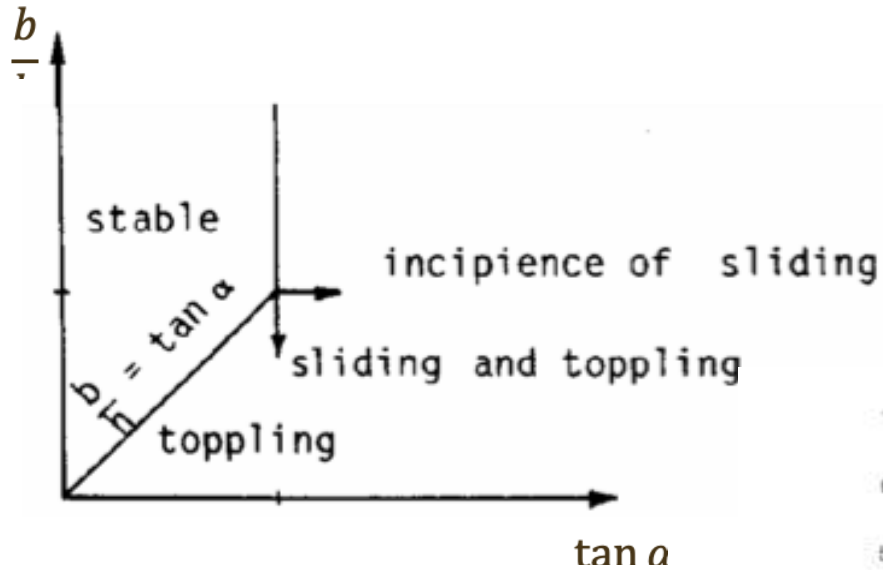
Condizione non  
scivolamento

$$W \cdot \sin \alpha \cdot \frac{h}{2} = W \cdot \cos \alpha \cdot \frac{b}{2}$$

$$\frac{b}{h} = \tan \alpha$$

Condizione non ribaltamento

# ANALISI CINEMATICHE RIBALTAMENTO



$$\tan \phi > \frac{b}{h}$$

Condizione affinché non avvenga scivolamento in condizioni limite al ribaltamento

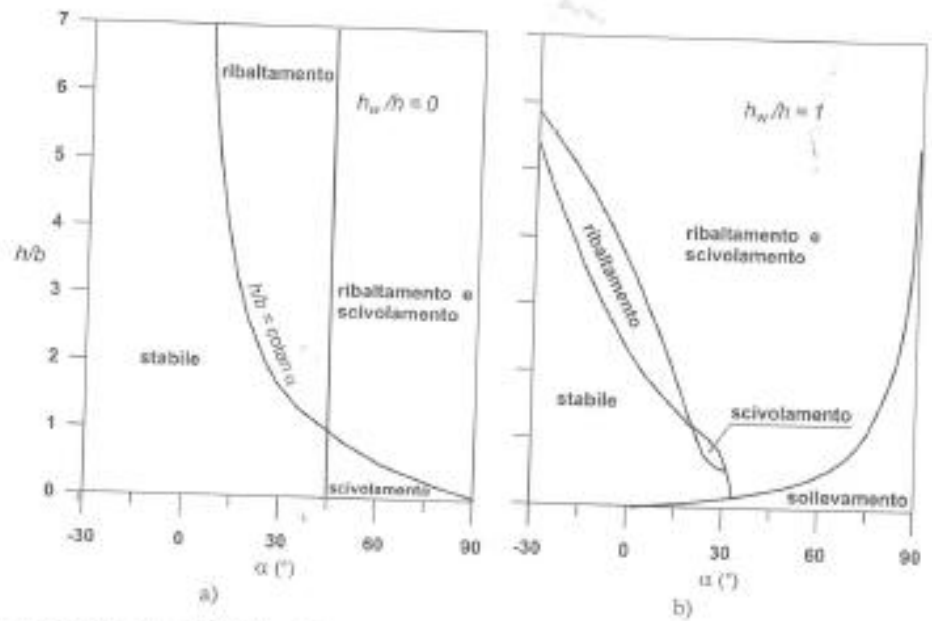


Figura 7.43. Carta di stabilità di un blocco rigido su base rigida in condizioni "asciutte" (a) e con giunti completamente riempiti d'acqua (b) ( $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi = 45^\circ$ ) [Martinetti & Ribacchi 1977, modificata].

# RIBALTAMENTO

Si avranno quindi ribaltamenti legati alla gravità quando:

- Le superfici di discontinuità sono sufficientemente inclinate per dare scivolamento. Condizione necessaria iniziale per avere scivolamenti è che le discontinuità abbiano un'inclinazione maggiore dell'angolo di attrito.
- Le superfici di discontinuità hanno la stessa direzione del versante o comunque ne differiscono di  $\pm 30^\circ$ . In proiezione stereografica i poli delle discontinuità che potranno dare ribaltamento si trovano quindi tra due piccoli cerchi con asse orizzontale e apertura  $90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$ .
- Le superfici di discontinuità sono a reggipoggio, cioè hanno direzione di immersione opposta a quella del versante.
- Il versante è sufficientemente inclinato. Se l'inclinazione delle discontinuità è  $\delta$ , allora il ribaltamento con un pendio inclinato  $\alpha$  può avvenire se  $(90^\circ - \delta) + \varphi < \alpha$ . In proiezione stereografica, questo significa che il ribaltamento può avvenire solo se il polo delle discontinuità N immerge come il versante con un'inclinazione minore dell'angolo  $\alpha - \varphi$ .



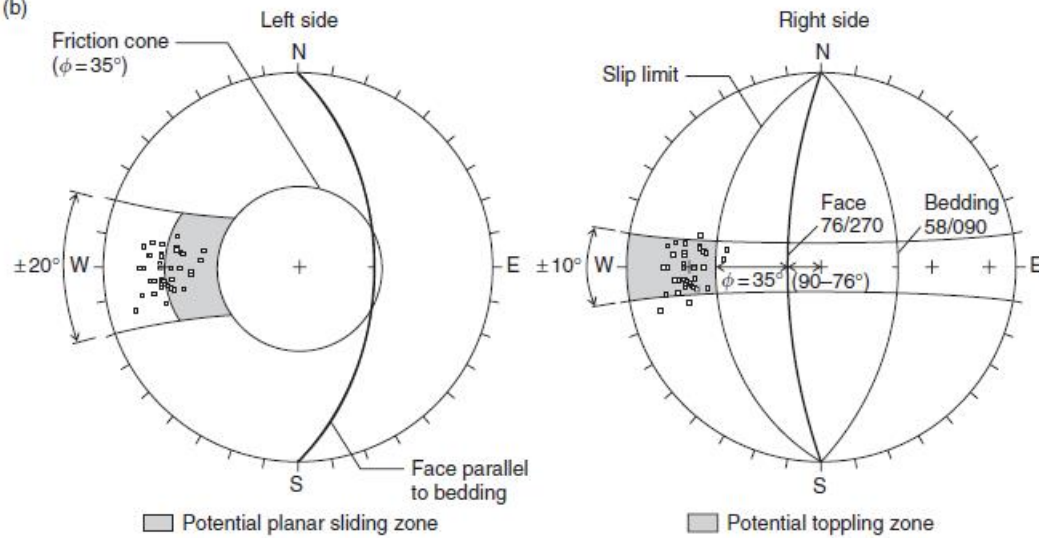


# ANALISI CINEMATICHE

(a)



(b)



# ANALISI CINEMATICHE

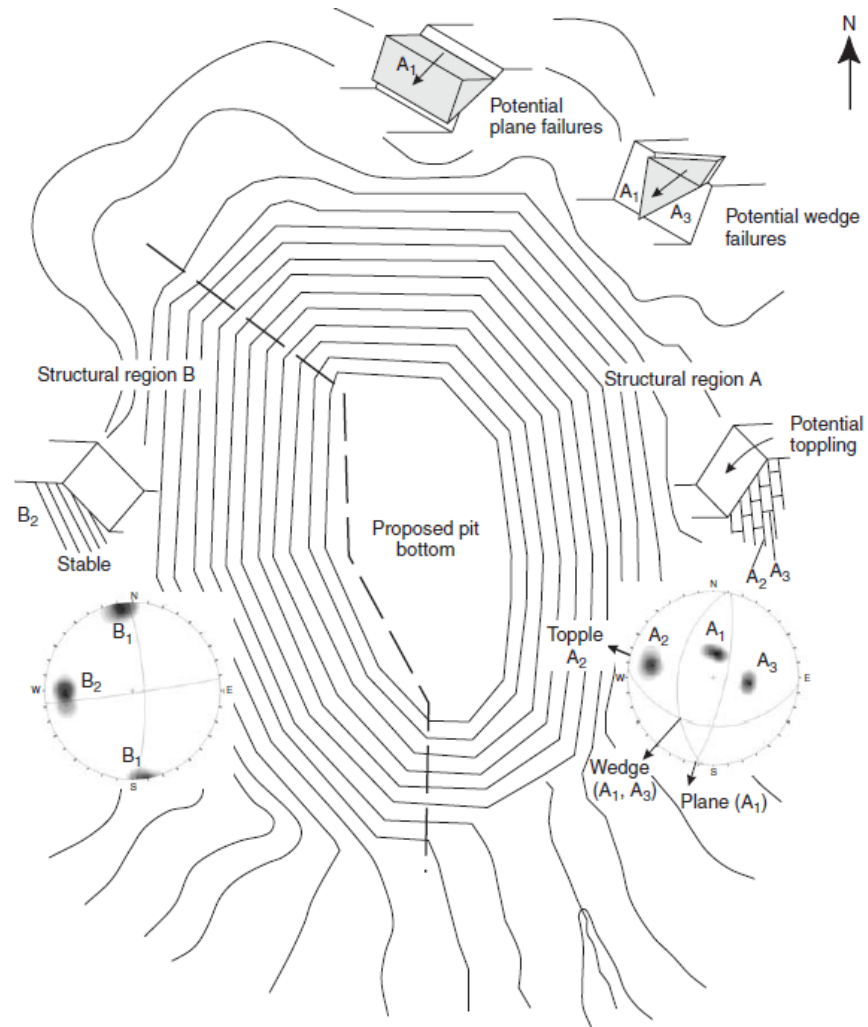
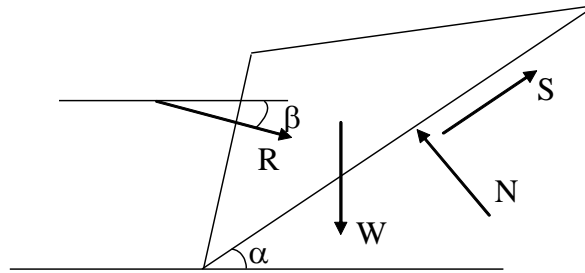


Figure 2.21 Presentation of structural geology on stereonet, and preliminary evaluation of slope stability of proposed open pit mine.

# ANALISI DI STABILITA'

a) Scivolamento planare di un volume di roccia soggetto alla forza peso  $W$  e ad una forza esterna  $R$  (es. un tirante)



- la componente normale al piano:

$$N = W \cos \alpha + R \sin(\alpha + \beta)$$

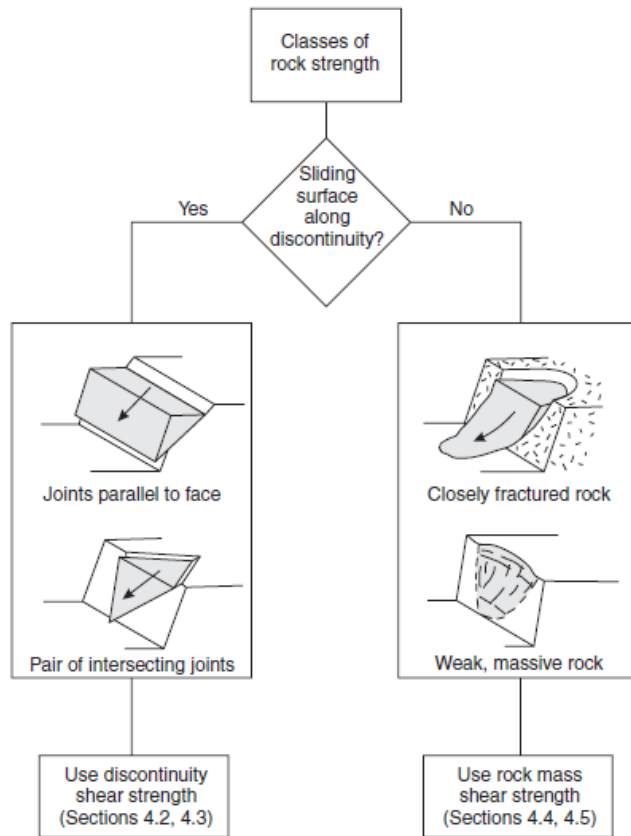
- la componente parallela al piano:

$$S = W \sin \alpha - R \cos(\alpha + \beta)$$

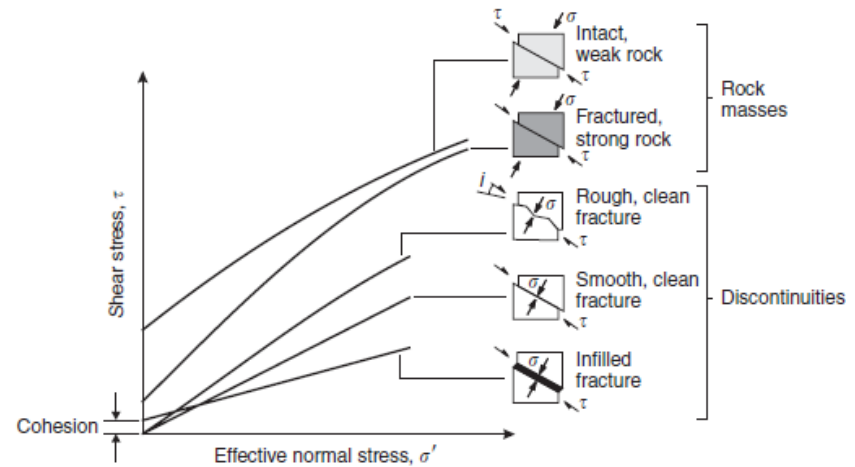
Il fattore di sicurezza:

$$F_s = \frac{cA + [W \cos \alpha + R \sin(\alpha + \beta)] \operatorname{tg} \phi}{W \sin \alpha - R \cos(\alpha + \beta)}$$

# ANALISI DI STABILITA'

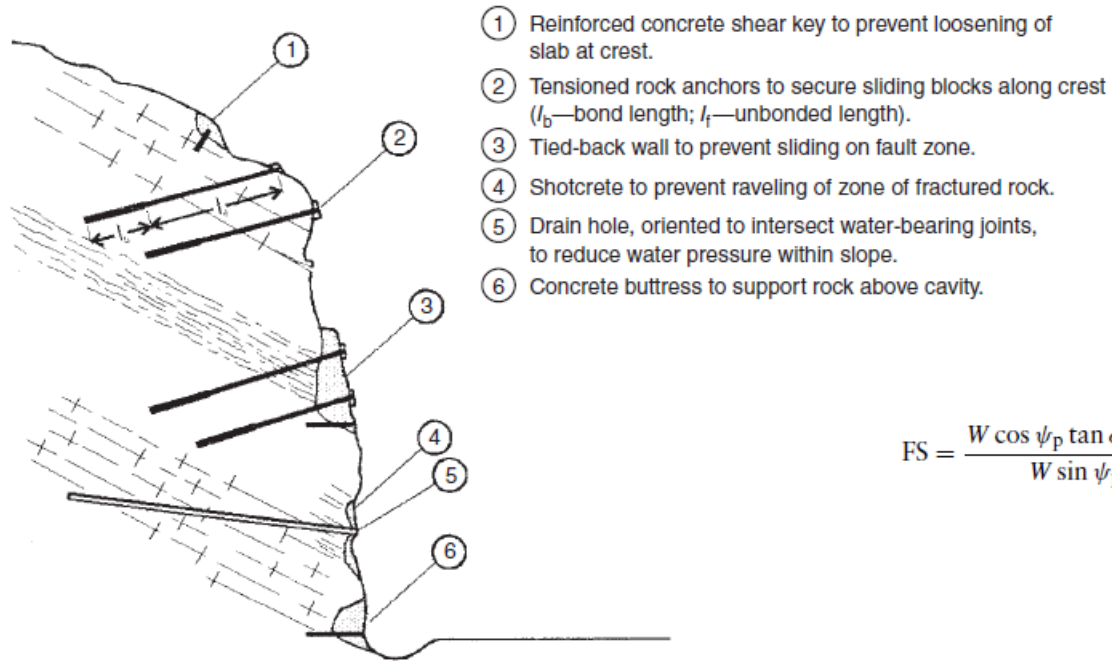


Involuppi di rottura da prove in sito e/o in laboratorio



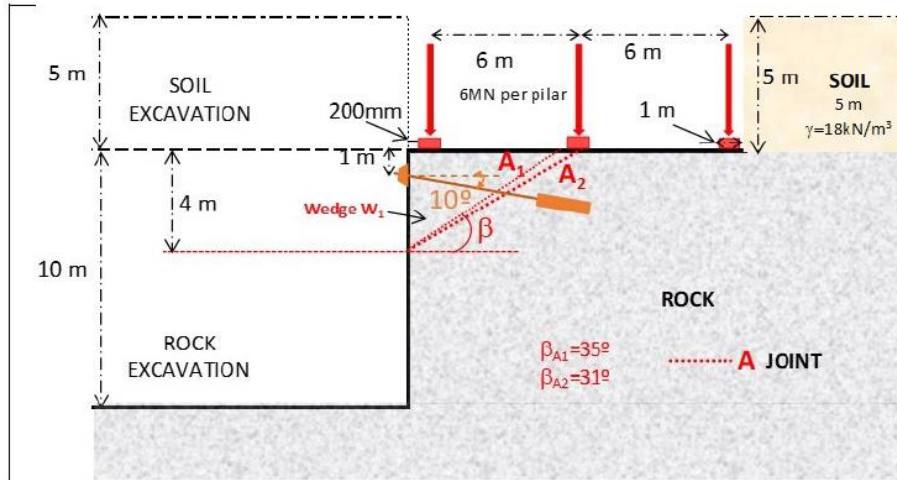


# CRITERI DI MESSA IN SICUREZZA



$$FS = \frac{W \cos \psi_p \tan \phi + R_k}{W \sin \psi_p}$$

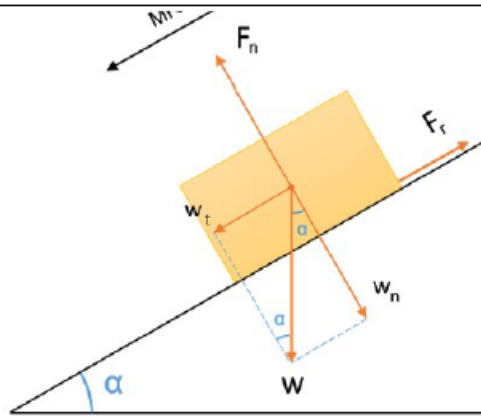
# DIMENSIONAMENTO



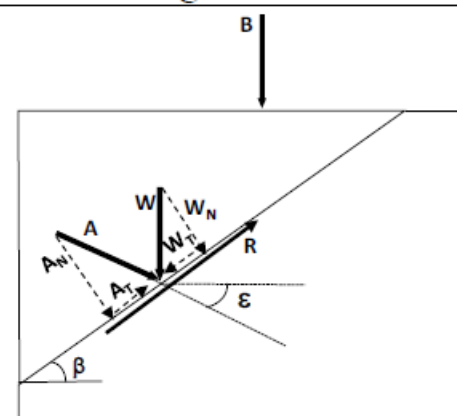
Conceptual representation of the ground at site

- Rock weight density:  $27 \text{ kN/m}^3$
- Shear strength in Joint A  
Represented by a Mohr-Coulomb envelope with
  - Cohesion = 0
  - Friction angle =  $25^\circ$

Representative values



Conceptual model:  
Rigid body on an inclined plane



Calculation model:  
Wedge with the actions on the sliding plane

# VERIFICA STATI LIMITE CON FATTORI DI SICUREZZA PARZIALI EUROCODE 7

J. Estaire and G. Franzén, 2024

Table 4.1: Partial factors for the verification of ground resistance of slopes and cuttings, for persistent and transient design situations (prEN1997-3:202x-April 2021)

Verification of	Partial factor on	Symbol	Material factor approach (MFA) <sup>a,b</sup>
Overall stability	Actions and effects-of-actions	$\gamma_F$ and $\gamma_E$	DC3
	Ground properties <sup>c</sup>	$\gamma_M$	M2 <sup>b</sup>

Table A.1.8 Partial factors on actions for persistent and transient design situations (prEN1990-Sept 2021)

Action or effect				Partial factors $\gamma_F$ and $\gamma_E$ for Design Cases 1 to 4				
Type	Group	Symbol	Resulting effect	Structural resistance	Static equilibrium and uplift		Geotechnical design	
Design case				DC1 <sup>a</sup>	DC2(a) <sup>b</sup>	DC2(b) <sup>b</sup>	DC3 <sup>c</sup>	DC4 <sup>d</sup>
Formula				(8.4)	(8.4)		(8.4)	(8.5)
Permanent action ( $G_k$ )	All <sup>f</sup>	$\gamma_G$	unfavourable /destabilizing	1,35 $K_F$	1,35 $K_F$	1,0	1,0	$G_k$ is not factored
	Water	$\gamma_{G,w}$		1,2 $K_F$	1,2 $K_F$	1,0	1,0	
	All <sup>f</sup>	$\gamma_{G,stab}$	stabilizing <sup>g</sup>	not used	1,15 <sup>e</sup>	1,0	not used	
	Water <sup>l</sup>	$\gamma_{G,w,stab}$			1,0 <sup>e</sup>	1,0	not used	
	All	$\gamma_{G,fav}$	favourable <sup>h</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	
Prestress ( $P_k$ )		$\gamma_P$ <sup>k</sup>						
Variable action ( $Q_k$ )	All <sup>f</sup>	$\gamma_Q$	unfavourable	1,5 $K_F$	1,5 $K_F$	1,5 $K_F$	1,3	$\gamma_{Q1}/\gamma_{Q1}^l$
	Water <sup>l</sup>	$\gamma_{Q,w}$		1,35 $K_F$	1,35 $K_F$	1,35 $K_F$	1,15	1,0
	All	$\gamma_{Q,fav}$	favourable	0				
Effects of actions ( $E$ )		$\gamma_E$	unfavourable	effects are not factored			1,35 $K_F$	
		$\gamma_{E,fav}$	favourable				1,0	

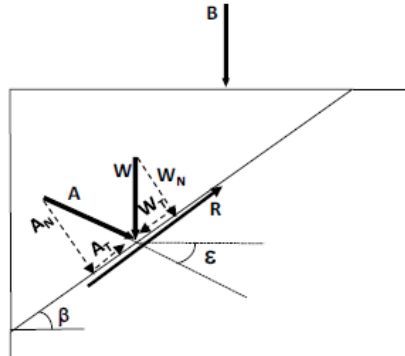
<sup>c</sup> Design Case 3 (DC3) is typically used for the design of slopes and embankments, spread foundations, and gravity retaining structures. See EN 1997 for details.

Table 4.7 Partial factors on ground properties for persistent and transient and accidental design situations (prEN1997-1-April 2021)

Ground property	Symbol	M1 <sup>a</sup>	M2 <sup>a</sup>	
		Persistent Transient Accidental	Persistent Transient	Accidental
<b>Rock parameters</b>				
Shear strength <sup>2</sup> ( $\tau$ )	$\gamma_{\tau}$	1,0	1,4 $K_M$	1,2
Coefficient friction along discontinuity ( $\tan \phi_{dis}$ ) <sup>4</sup>	$\gamma_{\tan \phi_{dis}}$	1,0	1,4 $K_M$	1,2
Unconfined compressive strength <sup>3</sup> ( $q_u$ )	$\gamma_{qu}$	1,0	1,4 $K_M$	1,2
<sup>1</sup> M1, and M2 are alternative sets of material factors. EN 1997-3 specifies which set to use for specific geotechnical structures. <sup>2</sup> Intended to be used for numerical models and non Mohr-Coulomb strength criteria. <sup>3</sup> Used for foundation purposes only. <sup>4</sup> the partial factor is applied to the $\tan \phi$				
Consequence class (CC)	Description of consequences	Consequence factor $K_M$		
CC3	Higher	1,1		
CC2	Normal	1,0		
CC1	Lower	0,9		

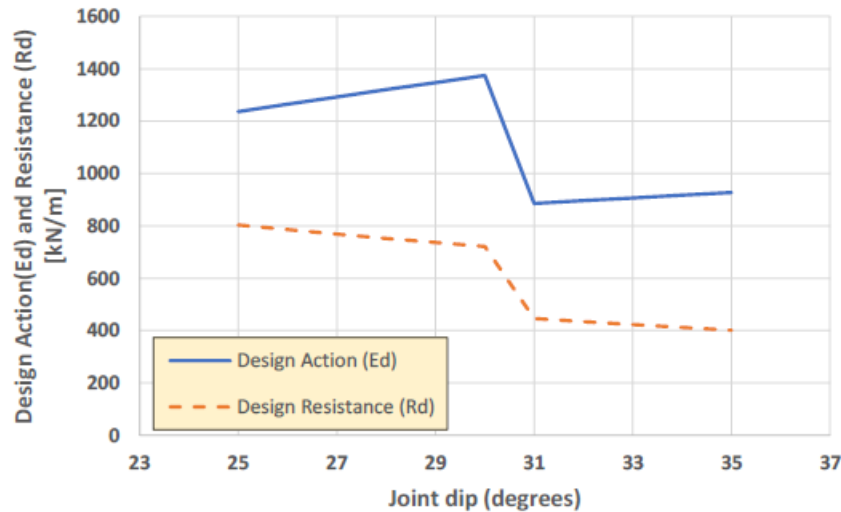
E se non sono presenti i fattori di sicurezza per le grandezze che regolano il fenomeno?

# VERIFICA STATI LIMITE CON FATTORI DI SICUREZZA PARZIALI EUROCODE 7

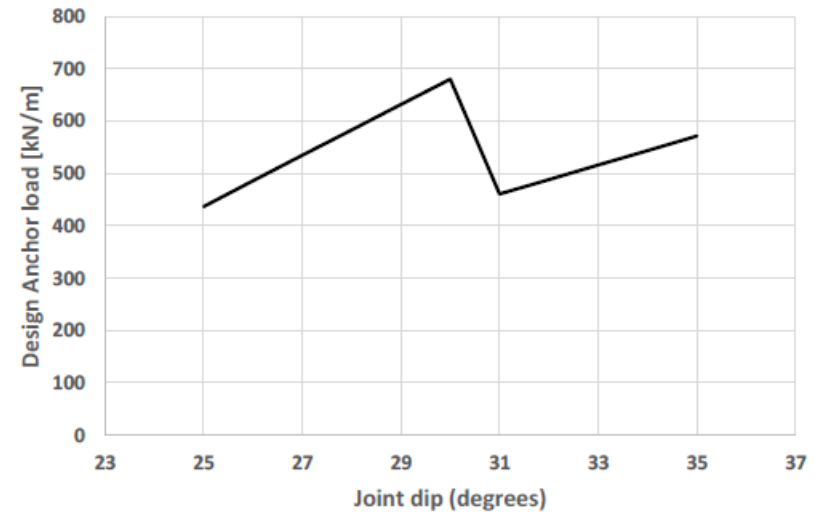


$$E_d \leq R_d$$

$$A_d > (W_d + B_d) \frac{\sin \beta - \cos \beta \frac{\tan(\phi_{rep})}{\gamma_M}}{\sin(\beta + \epsilon) \frac{\tan(\phi_{rep})}{\gamma_M} + \cos(\beta + \epsilon)}$$



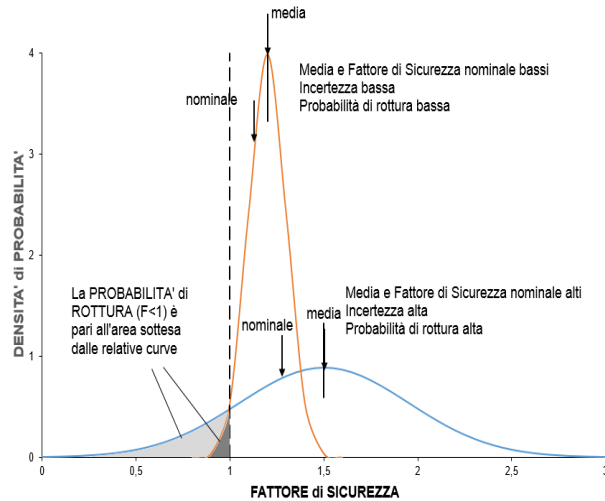
Results of the wedge (without reinforcement) for different joint inclinations



Results of the anchor load needed for different joint inclinations

J. Estaire and G. Franzén, 2024

# VERIFICA SULLA STIMA DELL'AFFIDABILITÀ IN ACCORDO CON EUROCODE 7



LA PROGETTAZIONE BASATA SULL'AFFIDABILITÀ può essere utilizzata in due modi:

1. Se disponiamo di dati sufficienti su un determinato pendio, possiamo calcolare la distribuzione statistica di azione e resistenza e possiamo calcolare direttamente la probabilità di rottura
2. Se otteniamo dati molti casi, possiamo generalizzare il problema e calcolare i fattori parziali corretti da utilizzare in tutti i casi simili

**LA PROGETTAZIONE BASATA SULL'AFFIDABILITÀ è possibile se disponiamo di dati sufficienti per effettuare un'analisi statistica!**





[anna.ferrero@unito.it](mailto:anna.ferrero@unito.it)



Scuola di dottorato GNIG in Ingegneria Geotecnica, Gaeta – 03/09/2024



**Grazie per l'attenzione!**