



Città di Padula

Provincia di Salerno

Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico e consolidamento distacco parti
rocciose in località "Petrara"
CUP: C34H20001030001

Responsabile Procedimento	
Dott. Angelo D'Aniello	
Progettazione Definitiva/Esecutiva:	Rilievo Geometrico 3D e Geostrutturale:
Ing. Michele Tamburini	Geol. Umberto Del Vecchio
Piano della Sicurezza:	Supporto al RUP:
Ing. Gabriele Petroccelli	Ing. Vincenzo D'Addessio
Relazione Geologica	Collaudo Tecnico/Amministrativo:
Geol. Marcello Ferrigno	Ing. Angelo Maiorino

Rilievi Geometrico Tridimensionale e Geostrutturale			
Rilievo Geostrutturale:		Rilievo Geometrico Tridimensionale:	
Geol. Umberto Del Vecchio		Ing. Maria Danzi	
N. Elaborato:	Titolo elaborato:	Rev:	Data:
A.07	A - elaborati generali Relazione geotecnica e geostrutturale interventi geotecnici di difesa attiva	01	16.03.2022
		Scala:	/

Sommario

PREMESSA	2
1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	4
1.1. Inquadramento geologico	5
2. ANALISI DEL MOVIMENTO DI CADUTA MASSI	6
Metodo di calcolo Lumped Mass	6
Metodo di calcolo CRSP	15
3. DEFINIZIONE DI CARATTERE GENERALE DELLE DISCONTINUITÀ PRESENTI NELLE ROCCE LAPIDEE.....	19
4. METODOLOGIE DI RILIEVO ED ELABORAZIONE DEI DATI RACCOLTI	28
4.1. RILIEVI TOPOGRAFICI TRIDIMENSIONALI	28
4.2. ISPEZIONI, RILIEVI GEOLOGICI E GEOMECCANICI.....	28
5. MODELLAZIONE GEOTECNICA DEL PENDIO AI SENSI DELLE NTC 2018.....	30
5.1. MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO	30

PREMESSA

L'Amministrazione Comunale di Padula (SA) intende provvedere a redigere il progetto definitivo-esecutivo, per la definizione ed il proporzionamento degli “***Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico e consolidamento distacco parti rocciose in località "Petrara"***”.

Gli interventi previsti per mitigare le condizioni di pericolosità intrinseca dell'area in studio si possono ritenere di tipo “attivo”, ovvero interventi di ingegneria geotecnica da realizzare in parete per prevenire l'insorgere di ulteriori potenziali cinatismi dei massi.

Nel seguito si giustificano in dettaglio le scelte progettuali adottate, riferendole alle problematiche di stabilità dell'ammasso roccioso e alla volumetria degli elementi lapidei potenzialmente instabili presenti sul costone roccioso in studio.

L'approccio metodologico utilizzato nel seguente lavoro è stato di tipo interdisciplinare, derivante da analisi integrate di tipo geologiche, geomorfologiche e geotecniche.

In particolare si è proceduto ad impostare un lavoro i cui esiti partono da una base conoscitiva costituita da:

- ❖ Sopralluoghi operativi nelle aree di indagine finalizzati alla corretta pianificazione delle attività di rilievo e analisi di scenario e verifica delle interferenze per l'esecuzione di voli mediante SAPR (sistema aeromobile a pilotaggio remoto);
- ❖ esecuzione del rilievo fotogrammetrico di prossimità mediante SAPR (mediante voli pianificati);
- ❖ elaborazione, filtraggio e trattamento dati raccolti da fotogrammetria, al fine di realizzare un modello tridimensionale dell'ammasso roccioso con resa fotorealistica, alla risoluzione richiesta e per redigere ortofoto prospettiche ad alta risoluzione da utilizzare in fase di rilevamento geologico.
- ❖ ispezione e caratterizzazione delle situazioni di dissesto presenti, al fine di ricavare informazioni circa la pericolosità per fenomeni di crollo.
- ❖ esecuzione di un rilievo completo ad alta risoluzione mediante fotogrammetria di prossimità da drone, per la realizzazione dei modelli tridimensionali e delle basi di rappresentazione.
- ❖ valutazione dell'assetto degli ammassi rocciosi affioranti nell'area oggetto di studio, osservandone le caratteristiche geologiche, geostrutturali e geomeccaniche. le attività di rilievo ed ispezione sono state eseguite in parete e lungo i pendii scoscesi da geologi rocciatori certificati all'uso di sistemi di accesso e posizionamento mediante funi, ai sensi del D.Lgs. 81/2008 del 09 aprile 2008 e del D.Lgs. 106/2009 e delle successive modifiche e integrazioni. I geologi rocciatori sono stati coadiuvati da geologi a terra per il coordinamento delle operazioni.
- ❖ analisi stratigrafica dei depositi (i cosiddetti “indicatori silenziosi” o “testimoni muti”) mediante trincee esplorative.
- ❖ N. 5 prove sismica HVRS
- ❖ N. 1 prova sismica di superficie di tipo MASW
- ❖ N. 2 prove tomografiche elettriche denominate Ert 01 e Ert 02
- ❖ N. 1 prova di laboratorio di compressione della roccia (point load test)

I dati raccolti ed elaborati sono stati integrati, per la parte generale e di inquadramento, con una serie di documenti tecnico-scientifici prodotti sull'area in esame.

Nel prosieguo del lavoro si giustificano in dettaglio le scelte progettuali adottate, riferendole alle problematiche di stabilità dell'ammasso roccioso e alla volumetria degli elementi lapidei potenzialmente instabili rilevati lungo il costone roccioso oggetto d'intervento.

In particolare, dopo una breve descrizione dei luoghi e un cenno geologico, si riferisce sui rilievi e sulle ispezioni effettuate. Si illustrano, quindi, le caratteristiche geostrutturali e le proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso, rappresentandone i problemi di stabilità. In ultimo, si descrivono gli interventi previsti e si riportano i calcoli eseguiti per il relativo dimensionamento.

Gli interventi a farsi, descritti nei paragrafi successivi, oltre a configurarsi come interventi di mitigazione del rischio idrogeologico, si configurano anche come interventi tesi alla promozione di un'azione di tutela, riqualificazione e valorizzazione ambientale.

Le opere di sistemazione idrogeologica contemplate nel presente progetto sono finalizzate alla messa in sicurezza e dunque alla mitigazione del rischio di una porzione del costone roccioso de quo.

1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il rilievo ha interessato il costone in località Petrara, ubicato nel centro antico di Padula, che è una vecchia cava utilizzata anche per estrarre materiale per edificare la Certosa di San Lorenzo.

L'area interessata dal rilievo è caratterizzata da un profondo scavernamento sul quale insiste una cortina di antichi edifici.



Figura 1: Inquadramento dell'area di interesse.

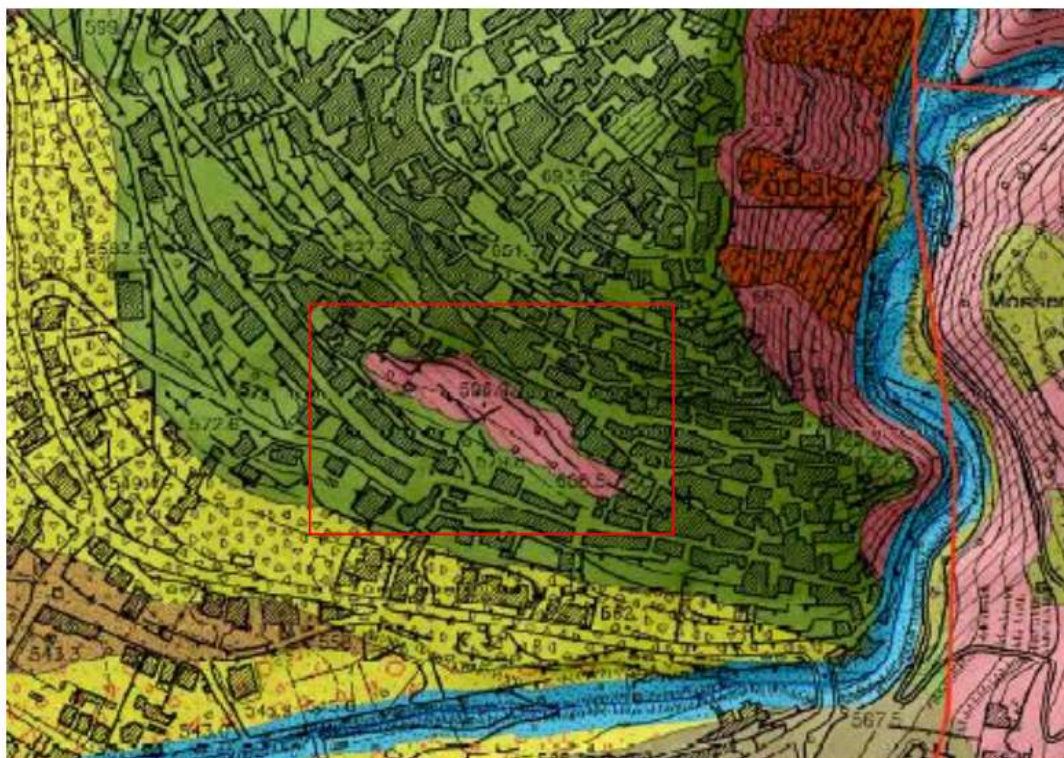
Catastalmente l'area si trova nel catasto terreni del comune di Padula al Foglio 20 particelle 1337, 1338, 1916, 1917 e 1919.



Figura 2 Sovrapposizione ortofoto - catastale

1.1. Inquadramento geologico

Nell'intorno affiorano calcari bianco-grigiastri, da ben stratificate a massive molto fratturati con evidenti piani di faglia. Lo spessore di tale unità può raggiungere i 3000 m ed è distinguibile in affioramenti o sub-affioramenti sotto copertura superficiale. Mentre il piazzale antistante è costituito da materiale detritico crollato dal costone e lungo il versante.



Inquadramento geologico dell'area (fonte carta geolitologica, scala 1:5.000, elemento 5040, elaborato nel Piano Urbanistico Comunale nel 2016)

2. ANALISI DEL MOVIMENTO DI CADUTA MASSI

L'analisi del movimento di caduta massi viene svolta con riferimento al moto di un singolo blocco che si distacca da una parete rocciosa e perde temporaneamente contatto con il pendio senza interagire con altri blocchi.

I tipi di moto da descrivere possono, in prima approssimazione, essere limitati a quattro:

- Caduta libera;
- Rimbalzo;
- Rotolamento e scivolamento.

L'innesco di un movimento di caduta è determinato generalmente da una rottura per taglio o per trazione lungo piani di discontinuità preesistenti che separano un blocco potenzialmente instabile dalla retrostante massa rocciosa costituente il pendio.

Le principali cause che possono provocare il “**distacco iniziale**” sono:

- il flusso d'acqua nelle discontinuità;
- le vibrazioni indotte da un sisma o quelle generate dall'utilizzo di esplosivo;
- le pressioni indotte nelle discontinuità dalle pressioni idrauliche o dalla formazione di ghiaccio;
- le operazioni di scavo o l'applicazione di carichi sul pendio;
- un blocco che si distacca da una parete rocciosa può precipitare nel vuoto quando la parete è sub-verticale o aggettante oppure può scivolare, ribaltare o rotolare lungo il pendio prima di raggiungere le condizioni di incipienza di caduta libera.

La velocità del blocco, nel momento in cui si affaccia nel vuoto, costituisce un dato iniziale per l'analisi dei successivi movimenti.

Metodo di calcolo Lumped Mass

Il calcolo dei parametri iniziali può essere eseguito con il procedimento descritto dall'**ALIVERINI, 1995**, facendo riferimento ad un pendio inclinato di α rispetto all'orizzontale e ad un singolo blocco:

- blocco schematizzato come una lamina che scivola lungo il pendio:

Applicando le equazioni cardinali della dinamica:

$$\begin{cases} m\vec{a}_g = m\vec{g} + \vec{r} \\ M_g^v = 0 \end{cases} \quad (1)$$

dove:

\vec{a}_g è il vettore accelerazione, riferito al baricentro G;

\vec{r} è il vettore risultante dalle reazioni vincolari;

\vec{g} è il vettore dell'accelerazione di gravità;

M_g^v è il momento delle forze esterne (vincolari) calcolato in G.

Tenendo conto della legge dell'attrito dinamico:

$$\vec{r} = f_d m \vec{g} \quad (2)$$

Dove f_d è il coefficiente d'attrito.

Proiettando le relazioni (1) e (2) sugli assi x e y si ottiene:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin \alpha + r_x \\ 0 = -mg \cos \alpha + r_y \\ r_x = -f_d mg \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

Sostituendo la terza equazione nella prima si ottiene:

$$m \ddot{x} = m g \sin \alpha - f_d \cdot m g \cos \alpha$$

Sostituendo $f_d = \tan \alpha$ e semplificando si ottiene l'equazione del moto:

$$\ddot{x} = g \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \phi) \quad (4)$$

E' necessario distinguere tre fasi di moto, potendo assumere valori maggiori, minori e uguali a zero:

1. Fase di moto uniformemente accelerato:

$$\tan \alpha > \tan \phi \Rightarrow \ddot{x} > 0, \dot{x} \ddot{x} > 0$$

2. Fase di moto uniforme:

$$\tan \alpha = \tan \phi \Rightarrow \ddot{x} = 0$$

3. Fase di moto uniformemente ritardato:

$$\tan \alpha < \tan \phi \Rightarrow \ddot{x} < 0, \dot{x} \ddot{x} < 0$$

La velocità del blocco, quindi, decresce sino ad annullarsi per $\dot{x} = 0$.

Assumendo che il blocco nella fase precedente la caduta, sia in una fase di moto uniformemente accelerato, la velocità iniziale di caduta libera è determinata dalla formula:

$$\dot{x}^2 = \dot{x}_0^2 + 2\ddot{x}(x - x_0)$$

Sostituendo l'espressione dell'accelerazione (4) si ottiene:

$$\dot{x}^2 = \dot{x}_0^2 + 2[g \cos \alpha - \tan \phi]x$$

Assumendo:

$x = l$ cioè il tratto percorso sia pari a l

$x_0 = 0$ cioè che il blocco parta da fermo

Si ricava la velocità iniziale del blocco:

$$\dot{x}^2 = 2[g \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \phi)]l \quad (5)$$

- **Blocco schematizzato come una sfera:**

Nell'ipotesi che il blocco rotoli, senza scivolare, dalle equazioni cardinali della dinamica si ottiene:

$$\begin{cases} m\vec{a}_G = m\vec{g} + \vec{r} \\ \dot{\vec{K}}_G = \overline{GA} \times \vec{r} \end{cases} \quad (6)$$

Dove:

G è il baricentro della sfera;

$\dot{\vec{K}}_G$ è la derivata del momento della quantità di moto rispetto a G;

A è il punto di contatto sfera piano inclinato;

\vec{r} è la risultante delle forze esterne.

Proiettando la relazione sugli assi x e y si ottiene:

$$\begin{cases} m \ddot{x} = mg \sin \alpha + r_x \\ m \ddot{y} = 0 = -mg \cos \alpha + r_y \\ j \ddot{\theta} = r_x R \end{cases} \quad (7)$$

dove:

$j = \frac{2}{5}mR^2$ è il momento d'inerzia della sfera;

$\ddot{\vartheta}$ è l'accelerazione angolare;

R è il raggio della sfera.

Sostituendo il valore di j .

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin \alpha + r_x \\ m\ddot{y} = 0 = -mg \cos \alpha + r_y \\ \frac{2}{5}mR\ddot{\vartheta} = r_x \end{cases} \quad (8)$$

Affinché sia rispettata l'ipotesi di non scivolamento deve essere verificata la disuguaglianza:

$$r_x \leq f_d r_y \quad (9)$$

Dalla (8) si ricava:

$$r_y = mg \cos \alpha$$

Ed utilizzando la (9) si ottiene:

$$-\ddot{x} = r\ddot{\vartheta} \Rightarrow \ddot{\vartheta} = -\frac{\ddot{x}}{R} \quad (10)$$

Sostituendo la (10) nella terza delle equazioni (8) si ottiene:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin \alpha + r_x \\ m\ddot{y} = 0 = -mg \cos \alpha + r_y \\ \frac{2}{5}mR\ddot{\vartheta} = r_x \end{cases} \quad (11)$$

Si ricava pertanto:

$$r_x = -\frac{2}{5}m\ddot{x} \Rightarrow \ddot{x} = -\frac{5}{2} \frac{r_x}{m} \quad (12)$$

Che sostituiti nella prima delle (8) danno:

$$r_x = \frac{2}{7}mg \sin \alpha$$

Sostituendo nella condizione di non scivolamento (9) si deve avere che:

$$\frac{2}{7}mg \sin \alpha \leq f_d mg \cos \alpha \quad (13)$$

Semplificando e dividendo per $\cos \alpha$, si ottiene la condizione di rotolamento senza scivolamento:

$$\tan \varphi = f_d \geq \frac{2}{7} \tan \alpha \quad (14)$$

Sostituendo nella prima delle (8) il valore di r_x dato dalla (12) è possibile ricavare l'accelerazione del blocco sferico:

$$\ddot{x} = \frac{5}{7}g \sin \alpha$$

Ed infine la velocità:

$$\dot{x}^2 = \dot{x}_0^2 + \frac{10}{7}g \sin \alpha l$$

- **Blocco schematizzato come un cilindro, che scivola e rotola:**

Dalle equazioni cardinali della dinamica:

$$\begin{cases} m\vec{a}_g = m\vec{g} + \vec{r} \\ \dot{\vec{K}}_G = \overline{GA} \times \vec{r} \end{cases} \quad (6)$$

Inoltre

$$\vec{T} = -f_d N \hat{v} \quad (15)$$

Essendo

$$\dot{\vec{K}}_G = \frac{1}{2} m R^2 \dot{\vartheta} \hat{e}_3 \quad (16)$$

$$\overline{GA} \times \vec{r} = -\widehat{Re}_2 \times (r_x \hat{e}_1 + r_y \hat{e}_2) = R r_x \hat{e}_3 \quad (17)$$

Dove $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$, sono i versori degli assi x,y,z.

Proiettando rispetto agli assi x e y si ottiene:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin \alpha + r_x \\ m\ddot{y} = 0 = -mg \cos \alpha + r_y \\ \frac{1}{2} m R \ddot{\vartheta} = r_x \end{cases} \quad (18)$$

Essendo:

$$r_x = -f_d r_y \quad (19)$$

Sostituendo la (19) nella prima e nella terza delle (18) si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} m R \ddot{\vartheta} = -f_d r_y \\ m\ddot{x} = mg \sin \alpha - f_d r_y \end{cases} \quad (20)$$

Dalla seconda delle (18) :

$$r_y = mg \cos \alpha$$

Sostituendo nelle (20) si ottengono le equazioni del moto:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} m R \ddot{\vartheta} = -f_d mg \cos \alpha \\ m\ddot{x} = mg \sin \alpha - f_d mg \cos \alpha \end{cases} \quad (21)$$

L'ipotesi di scivolamento è:

$$v_{\tau A} = \dot{x} + R \dot{\vartheta} \quad (22)$$

Ed ammettendo che:

$$\begin{aligned} \dot{x}(0) &= x_0 \\ \vartheta(0) &= \vartheta_0 \\ \dot{x} + R \dot{\vartheta} &\geq 0 \end{aligned}$$

Integrando le (21) si ottiene:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (g \sin \alpha - f_d g \cos \alpha) t + \dot{x}_0 = g \cos \alpha (\tan \alpha - f_d) t + \dot{x}_0 \\ R \dot{\vartheta} &= -2 f_d g \cos \alpha t + R \dot{\vartheta}_0 \end{aligned}$$

Sostituendo nella (22):

$$v_{\tau A} = (g \sin \alpha - 3 f_d g \cos \alpha) t + \dot{x}_0 + R \dot{\vartheta}_0 = g \cos \alpha (\tan \alpha - 3 f_d) t + \dot{x}_0 + R \dot{\vartheta}_0$$

Essendo $\dot{x}_0 + R \dot{\vartheta}_0 \geq 0$ per ipotesi, si può verificare che:

- $\tan \alpha = 3 f_d \Rightarrow v_{\tau A} > 0$
- $\tan \alpha > 3 f_d \Rightarrow v_{\tau A} > 0$
- $\tan \alpha < 3 f_d \Rightarrow \exists t_*: v_{\tau}(t_*) = 0$

Quando si verificano le condizioni 1 e 2 il blocco continua a scivolare e rotolare, mentre per la condizione 3 abbiamo il seguente comportamento, per un $t > t_*$:

Dalle equazioni (18) sostituendo la terza nella prima si ottiene:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mg \sin \alpha \\ \frac{3}{2}m\ddot{x} &= mg \sin \alpha \\ \ddot{x} &= \frac{3}{2}g \sin \alpha \end{aligned}$$

Sostituendo nella prima delle equazioni (18) si ottiene:

$$\begin{aligned} r_x &= \frac{2}{3}mg \sin \alpha - mg \sin \alpha = -\frac{1}{3}mg \sin \alpha \\ r_y &= mg \cos \alpha > 0 \end{aligned}$$

E per la (9) si ha che:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3}mg \sin \alpha &\leq \tan \varphi mg \cos \alpha \\ \tan \varphi &\geq f_d > \tan \alpha > \frac{1}{3} \tan \alpha \end{aligned}$$

Se la disuguaglianza è verificata, allora il blocco termina la fase di scivolamento e continua il moto di rotolamento.

In letteratura sono disponibili delle carte di stabilità (Bray e Goodman, 1981 e Sagasetta, 1986) che definiscono, note le dimensioni del blocco analizzato, l'inclinazione del pendio su cui poggia il blocco e l'angolo di attrito tra blocco e pendio, i campi di diverso cinematismo del blocco. Queste carte sono ricavate dall'analisi delle quattro condizioni nelle quali il blocco può trovarsi: stabilità, ribaltamento, scivolamento, ribaltamento e scivolamento.

In fig. 1 è riportata la carta di stabilità di SAGASETA (1986)

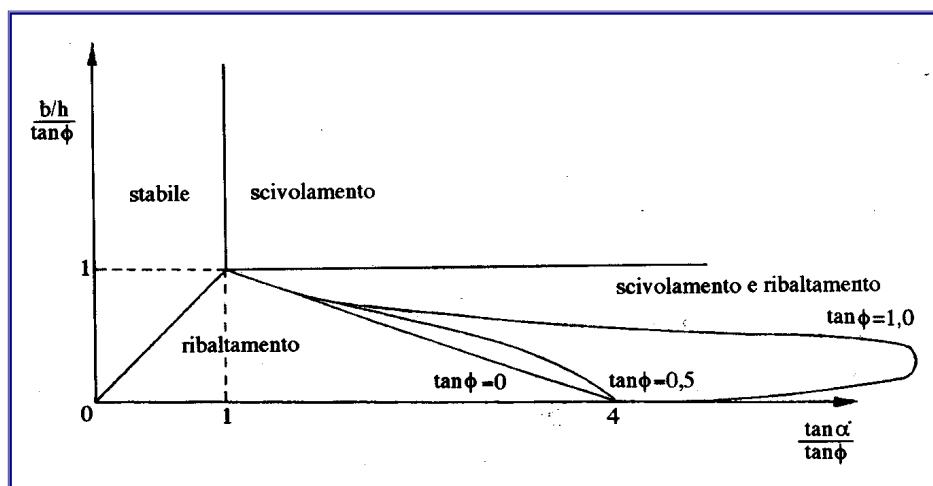


Fig. 1

Facendo riferimento ad un blocco di forma parallelepipedica giacente su un piano inclinato rispetto all'orizzontale di un angolo α , si esaminano le condizioni di equilibrio allo scivolamento e al ribaltamento.

Dalle equazioni cardinali della statica ci ricaviamo le condizioni di stabilità del blocco:

$$\begin{cases} 0 = m\vec{g} + \vec{r} \\ 0 = \vec{M}_0^v \end{cases} \quad (23) \quad \text{Dove:}$$

m è la massa del blocco;

g è l'accelerazione di gravità;

\vec{r} è il vettore della reazione nel vincolo.

Proiettando la prima delle equazioni 23 sugli assi x e y si ottiene:

$$\begin{cases} r_x = mg \sin \alpha \\ r_y = mg \cos \alpha \end{cases} \quad (24)$$

Le componenti del vettore \vec{r} sono legate dalla relazione:

$$|r_x| \leq \tan \varphi |r_y| \quad (25)$$

Sostituendo le 24 nelle 25 si ricava:

$$\tan \varphi \geq \frac{mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \tan \alpha \quad (26)$$

Se è verificata la disuguaglianza (26) il blocco non scivola.

Affinché non si abbia ribaltamento, la reazione \vec{r} esplicata dal vincolo deve cadere all'interno della base e deve essere verificata la condizione:

$$\alpha \leq \beta \Rightarrow \tan \alpha \leq \tan \beta = \frac{b}{h} \quad (27)$$

Dove b ed h sono rispettivamente la larghezza e l'altezza del blocco. E quindi dalla (27) si ricava la condizione di non ribaltamento:

$$\tan \alpha \leq \frac{b}{h} \quad (28)$$

Le coppie dei valori di $\tan \beta$ e $\tan \alpha$ che soddisfano alle condizioni di non scivolamento (26) e di non ribaltamento (28) individuano sulla carta di Sagaseta (fig. 1) l'area di stabilità del blocco.

Dalle equazioni cardinali della dinamica si ricavano le condizioni di ribaltamento e scivolamento del blocco:

Condizioni di ribaltamento.

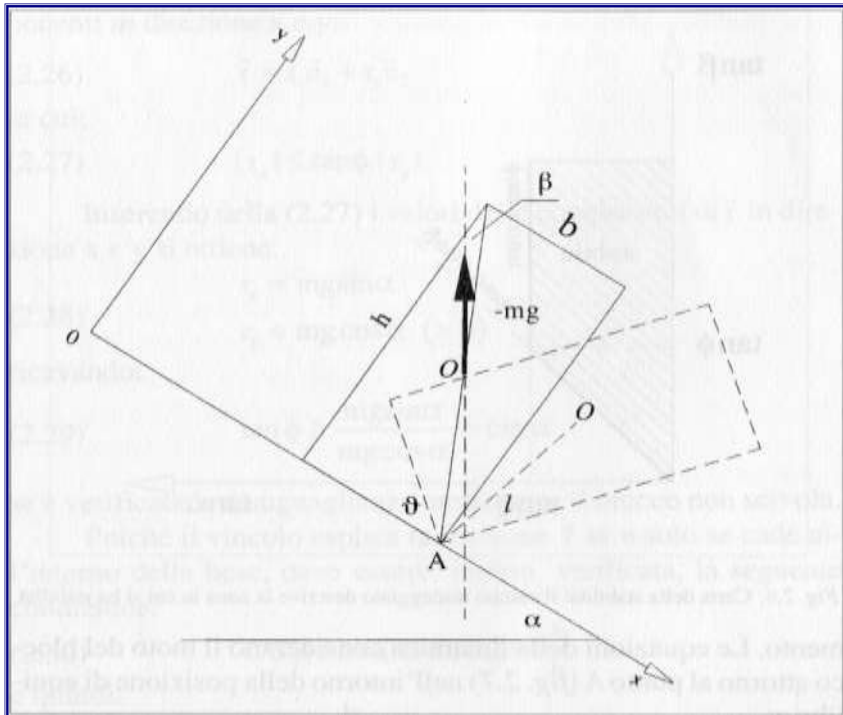


Fig. 2 : Schematizzazione del moto del blocco nel caso di movimento di solo ribaltamento

$$\begin{cases} m \vec{a}_o = m \vec{g} + \vec{r}_a \\ \vec{K}_A = A \vec{O} \times m \vec{g} \end{cases} \quad (29)$$

dove:

$$\vec{K}_A = J_a (-\ddot{\vartheta}) \hat{e}_3 \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
A \vec{O} &= -l \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{2} - \beta\right) \hat{e}_1 + l \sin\left(\vartheta + \frac{\pi}{2} - \beta\right) \hat{e}_2 = \\
&= l \sin(\vartheta - \beta) \hat{e}_1 + l \cos(\vartheta - \beta) \hat{e}_2 \\
m \vec{g} &= m \vec{g} \sin \alpha \hat{e}_1 - m g \cos \alpha \hat{e}_2
\end{aligned}$$

sviluppando il prodotto vettoriale:

$$\begin{aligned}
A \vec{O} \times m \vec{g} &= [-mgl \cos \alpha \sin(\vartheta - \beta) - mgl \sin \alpha \cos(\vartheta - \beta)] \hat{e}_3 = \\
&= -mgl \sin(\vartheta + \alpha - \beta) \hat{e}_3
\end{aligned}$$

Inserito nella seconda delle (29) e tenendo conto della (30) si ottiene:

$$J_a \ddot{\vartheta} = mgl \sin(\vartheta + \alpha - \beta) \quad (31)$$

Se si tiene conto che all'istante iniziale è $\vartheta = 0$, si ricava la condizione di ribaltamento:

$$\alpha > \beta \Rightarrow \ddot{\vartheta} > 0 \quad (32)$$

La (32) è una condizione necessaria, ma non sufficiente al ribaltamento del blocco.

La sufficienza si ottiene dalla relazione, che impone la compatibilità con il vincolo nell'istante iniziale:

$$|r_x| \leq \tan \varphi_s |r_y| \quad (33)$$

dall'espressione della velocità in 0:

$$\vec{v}_0 = l \dot{\vartheta} \cos(\vartheta - \beta) \hat{e}_1 - l \dot{\vartheta} \sin(\vartheta - \beta) \hat{e}_2$$

derivando, e trascurando i termini di ordine superiore, si ottiene:

$$\vec{a}_0 = l \ddot{\vartheta} \cos(\vartheta - \beta) \hat{e}_1 - l \ddot{\vartheta} \sin(\vartheta - \beta) \hat{e}_2$$

..

sostituendo a ϑ l'espressione data dalla (31) e tenendo conto che:

$$\begin{aligned}
J_a &= \frac{1}{12} m(b^2 + h^2) + ml^2 = \frac{4}{3} ml^2 \\
21 &= \sqrt{h^2 + b^2} \\
|AO| &= 1
\end{aligned}$$

si ottiene:

$$a_0 = \frac{3}{4} g \sin(\alpha - \beta) \cos \beta \hat{e}_1 + \frac{3}{4} g \sin(\alpha - \beta) \sin \beta \hat{e}_2 \quad (34)$$

sostituendo la (34) nella prima delle (29) si ottiene:

$$\begin{aligned}
\vec{r} &= \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \cos \beta \hat{e}_1 + \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \sin \beta \hat{e}_2 + \\
&\quad - mg \sin \alpha \hat{e}_1 + mg \cos \alpha \hat{e}_2
\end{aligned}$$

le cui componenti sono:

$$\begin{aligned}
r_x &= \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \cos \beta - mg \sin \alpha \\
r_y &= \frac{3}{4} mg \sin(\alpha - \beta) \sin \beta - mg \cos \alpha
\end{aligned}$$

le quali sostituite nella (33) forniscono:

$$\sin \alpha - \frac{3}{4} \sin(\alpha - \beta) \cos \beta \leq \tan \varphi_s \left(\frac{3}{4} \sin(\alpha - \beta) \sin \beta + \cos \alpha \right)$$

da cui si ottiene la condizione di solo ribaltamento:

$$\frac{4 \sin \alpha - 3 \sin(\alpha - \beta) \cos \beta}{3 \sin(\alpha - \beta) \sin \beta + 4 \cos \alpha} \leq \tan \varphi_s$$

con $\alpha > \beta$.

- **Condizione di scivolamento.**

Dalle equazioni cardinali della dinamica:

$$\begin{cases} m \vec{a}_0 = m \vec{g} + \vec{r}_a \\ 0 = \vec{M}_0^v \end{cases} \quad (36)$$

proiettate sugli assi:

$$\begin{cases} m \ddot{x} = mg \sin \alpha + r_x \\ 0 = -mg \cos \alpha + r_y \\ 0 = \vec{M}_o^v \end{cases} \quad (37)$$

essendo:

$$r_x = -f_d r_y \quad (38)$$

sostituendo la prima e la seconda delle equazioni (37) nella (38) si ottiene:

$$m \ddot{x} = mg \sin \alpha - f_d mg \cos \alpha$$

$$\ddot{x} = g \cos \alpha (\tan \alpha - f_d) \quad (39)$$

Affinché il blocco non scivoli si devono verificare le seguenti condizioni:

$$\begin{aligned} f_d &= \tan \varphi_d \\ \tan \varphi_d &\leq \tan \beta \end{aligned}$$

$$\tan \alpha > \tan \varphi_d \quad (40)$$

- **Caduta libera.**

Il moto di caduta libera si verifica quando un blocco perde il contatto con il pendio. Questo può avvenire nella fase di distacco o anche lungo il percorso in corrispondenza di una brusca variazione della superficie topografica. Il moto può essere caratterizzato da impatti e rimbalzi; le equazioni del moto di caduta libera possono essere utilizzate anche per questo tipo di movimento. In ogni caso per conoscere il moto del blocco è necessario conoscere la velocità prima e dopo l'impatto (fig. 3).

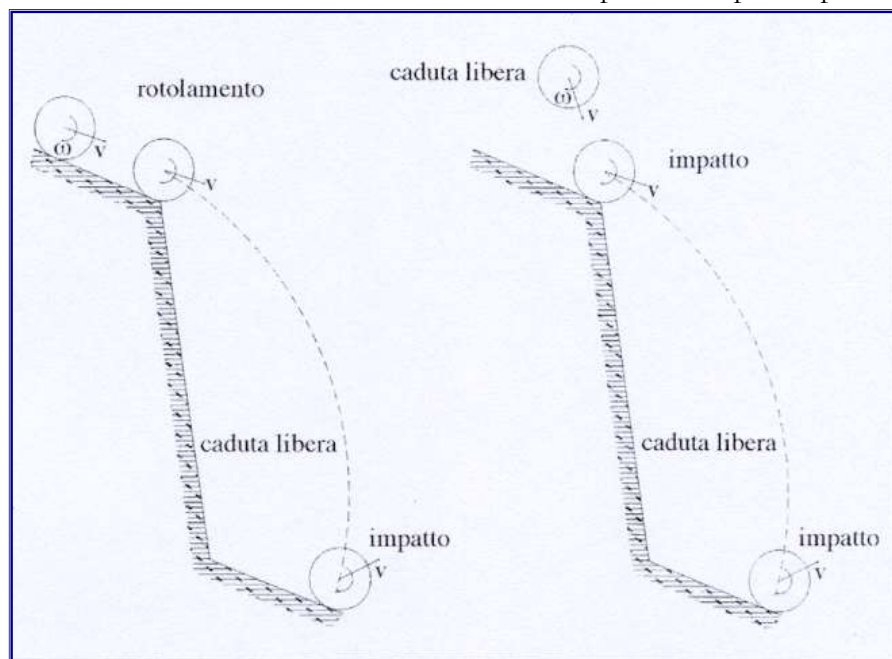


Fig. 3: Possibili condizioni iniziali della fase di caduta libera

Dalle equazioni cardinali della dinamica, trascurando la resistenza offerta dall'aria, si ricavano le caratteristiche del moto:

$$\begin{cases} m \vec{a}_G = \vec{R}^{(e)} = m \vec{g} \\ \vec{K}_G = M_G^{(e)} = 0 \end{cases} \quad (41)$$

La prima delle (41) descrive il moto del baricentro G del blocco, mentre la seconda descrive il moto del blocco intorno al suo baricentro.

Facendo riferimento per semplicità di calcolo ad un modello bidimensionale (fig. 4), si scelgono le traiettorie a priori tenendo conto della topografia del pendio, della posizione geometrica delle zone instabili da cui possono avvenire distacchi di blocchi e della morfologia del sito.

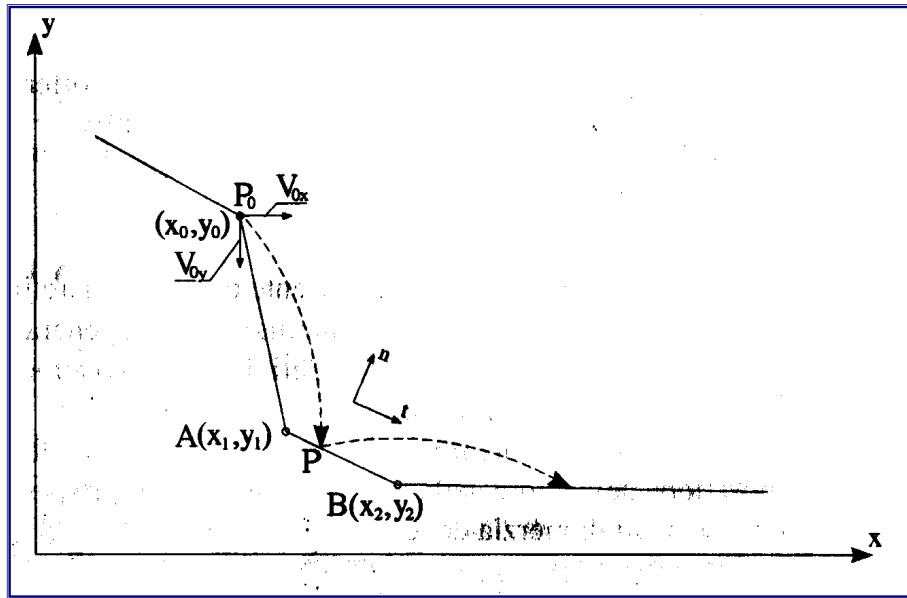


Fig. 4: Traiettoria parabolica del blocco e rimbalzo

Proiettando la prima delle equazioni (41) sugli assi x e y, si ottiene:

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{y} = -g \end{cases}$$

da cui integrando due volte:

$$\begin{cases} x = v_{0x}t + x_0 \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t + y_0 \end{cases}$$

ricavando t dalla prima e sostituendo nella seconda si ottiene:

$$y = -\frac{1}{2}g \frac{(x-x_0)^2}{v_{0x}^2} + v_{0y} \frac{x-x_0}{v_{0x}} + y_0 \quad (42)$$

Le coordinate del punto d'impatto $P(x_p, y_p)$ si ricavano mettendo a sistema l'equazione (42) con l'equazione della retta passante per i punti A e B.

$$\begin{aligned} y_p &= -\frac{1}{2}g \frac{(x_p - x_0)^2}{v_{0x}^2} + v_{0y} \frac{x_p - x_0}{v_{0x}} + y_0 \\ \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} &= \frac{x_p - x_1}{x_2 - x_1} \end{aligned}$$

- **Rimbalzo.**

Il rimbalzo è un movimento che può essere conseguente all'impatto di un blocco sul pendio.

Quando l'inclinazione del pendio è elevata, il moto del blocco, avviene, prevalentemente per caduta libera e rimbalzi. In ogni urto il blocco perde una frazione delle zone che vengono a contatto. Le caratteristiche di rimbalzo sono esprimibili con dei semplici parametri, definiti coefficienti di restituzione, che esprimono la dissipazione di energia cinetica nell'urto.

Dal principio della conservazione della quantità di moto, si determina il coefficiente di restituzione:

$$K = \frac{v^f}{v^i} \quad (43)$$

dove:

v^i è la velocità del blocco prima dell'impatto;

v^f è la velocità del blocco dopo l'impatto.

Il coefficiente di restituzione K varia nell'intervallo (0 -1):

$K=0$ urto completamente anelastico, il blocco si ferma.

$K=1$ urto completamente elastico, il blocco non dissipa energia cinetica.

Il coefficiente di restituzione K deve essere considerato nelle sue componenti normali K_n e tangenziale K_t che sono definite come:

$$K_n = \frac{v_{npost}}{v_{npre}}$$
$$K_t = \frac{v_{tpost}}{v_{tpre}}$$

dove:

v_{npre} e v_{tpre} sono le componenti normali e tangenziali della velocità nel momento dell'impatto;

v_{npost} e v_{tpost} sono le componenti normali e tangenziali della velocità dopo l'impatto.

L'analisi sperimentale dei fenomeni ha rilevato che le caratteristiche del moto successive all'impatto dipendono oltre che dalla quantità d'energia dissipata nell'urto anche dalla forma del blocco, dalla geometria e rugosità del pendio.

I blocchi costituiti da rocce e di forma poliedrica, subiscono delle rotture degli spigoli nelle collisioni con il pendio, tendendo ad avere una forma sempre più arrotondata e quindi a raggiungere una condizione di moto sempre più efficace.

I blocchi di roccia scistosa, negli impatti, tendono a rompersi secondo piani di scistosità e quindi a formare solidi tabulari il cui movimento avviene poi secondo la condizione di moto più efficiente con il piano di maggior inerzia del solido parallelo alla sezione verticale di movimento.

Su pendii coperti da materiali detritici, si ha un diverso comportamento del blocco, in funzione della sua dimensione rispetto a quella dei detriti.

Se il blocco a volume maggiore di quello dei blocchi del detrito si nota una maggiore perdita di energia nell'impatto ed il blocco tende a rotolare.

Se il blocco è di dimensioni inferiori alle dimensioni medie dei blocchi, il movimento con rimbalzi predomina rispetto a quello di rotolamento.

Metodo di calcolo CRSP

Il modello detto *CRSP* (*Colorado Rockfall Simulation Program*) è stato messo a punto da *Pfeiffer e Bowen* (1989) con lo scopo di modellare il moto di caduta di blocchi aventi la forma di sfere, cilindri o dischi, con sezione circolare nel piano verticale del movimento.

Per descrivere il movimento dei blocchi il modello *CRSP* applica l'equazione del moto parabolico di un corpo in caduta libera ed il principio di conservazione dell'energia totale.

Il fenomeno dell'impatto viene modellato utilizzando come ulteriori parametri, rispetto al metodo *Lumped mass*, la rugosità del pendio e la dimensione dei blocchi.

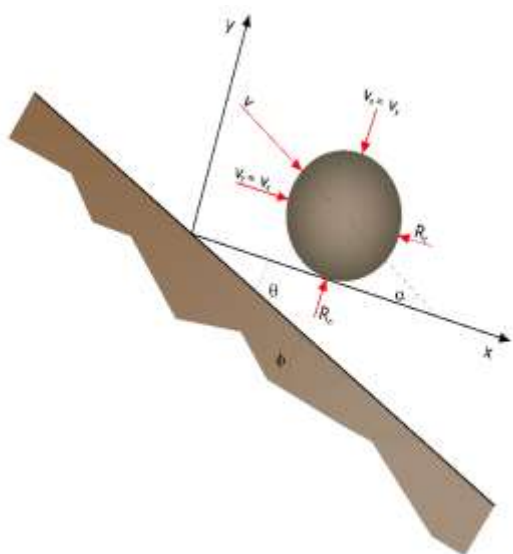
In particolare il modello *CRSP* assume che l'angolo formato tra la direzione del blocco ed il profilo del pendio vari secondo una statistica che deve essere definita per ogni caso analizzato. Il modello tratta

quindi in modo statistico anche i risultati che principalmente constano nelle velocità e nelle altezze di rimbalzo, rispetto alla superficie del pendio, durante il percorso di caduta. Il modello considera quindi le combinazioni dei movimenti di caduta libera, di rimbalzo, di rotolamento e di scivolamento, che possono variare a seconda delle dimensioni dei blocchi e della rugosità del pendio.

L'affidabilità del modello è stata verificata attraverso confronti tra i risultati numerici e quelli ottenuti da prove in sito.

La descrizione del moto di caduta libera inizia da un punto nel quale, è nota la velocità iniziale scomposta nelle sue componenti orizzontali e verticali. Il blocco è soggetto al movimento di caduta libera fino a quando non collide con la superficie del pendio.

Dall'intersezione vengono ricavate le coordinate del punto di impatto. Il vettore della velocità di pre-impatto V , forma un angolo α con il pendio.



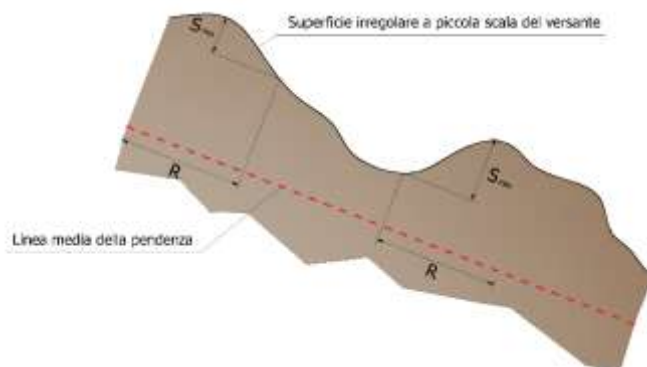
Rappresentazione della fase di impatto: a) l'angolo di impatto è definito come funzione della traiettoria del blocco; q) inclinazione del pendio; f) variazione del pendio in funzione della rugosità locale del pendio

Ad ogni impatto l'inclinazione del pendio f è fatta variare casualmente in un campo di valori compreso tra 0 e θ_{max} . il valore di θ_{max} dipende dalla rugosità del pendio e dalla dimensione del blocco e viene determinato da misure in sito.

Detto R il raggio del blocco in esame si ha:

$$\tan \theta_{max} = \frac{S_{max}}{R}$$

Ad ogni impatto l'inclinazione del pendio viene fatta variare casualmente in un campo di valori compreso tra 0 ed un valore funzione della rugosità del pendio e dalla dimensione del blocco.



La velocità che si ottiene a seguito dell'impatto, viene determinata attraverso l'equazione di conservazione dell'energia totale così espressa:

$$\left(\frac{1}{2}J\bar{\omega}_1^2 + \frac{1}{2}M_{t1}^2\right) \cdot f(F) \cdot SF = \frac{1}{2}J\bar{\omega}_2^2 + \frac{1}{2}M_{t2}^2 \quad (1)$$

dove:

M = Massa del blocco;

J = Momento d'inerzia del blocco;

w_1 = Velocità angolare prima dell'impatto;

w_2 = Velocità angolare dopo l'impatto;

V_{t1} = Velocità tangenziale prima dell'impatto;

V_{t2} = Velocità tangenziale dopo l'impatto;

La funzione $f(F)$ di attrito così definita:

$$f(F) = SF + \frac{(1 - R_t)}{\left[\left(\frac{V_{t1} - \bar{\omega}_1 \cdot R}{20}\right)^2 + 1.2\right]}$$

Mentre la funzione di scala SF :

$$SF = \frac{R_t}{\left[\left(\frac{V_{n1}}{250 \cdot R_n}\right)^2 + 1\right]}$$

Dove:

R_n = Coefficienti di restituzione normale;

R_t = Coefficienti di restituzione tangenziale;

R = Raggio del blocco;

I termini $f(F)$ e SF sono ricavabili attraverso espressioni empiriche che vengono utilizzate per valutare l'energia cinetica dissipata nelle collisioni tra blocco e pendio a causa dell'attrito e dell'urto.

L'attrito riguarda principalmente la dissipazione dell'energia prodotta dalla velocità tangenziale, l'urto quella prodotta dalla velocità normale al pendio.

Le velocità tangenziali e angolari post-collisione sono messe in relazione tra loro dalla seguente equazione:

$$V_{t2} = \omega_2 \cdot R$$

che assume che i blocchi abbandonino il contatto con il pendio ruotando, indipendentemente dalla velocità angolare precedente.

Dalla (1) si ottiene V_{t2} , mentre la velocità normale post-collisione viene ricavata dalla seguente espressione empirica:

$$V_{n2} = V_{n1} \cdot \frac{R_n}{\left[1 + \left(\frac{V_{n1}}{9}\right)^2\right]}$$

che intende tener conto del fatto, verificato anche sperimentalmente, che il rapporto tra le velocità normali post-impatto e pre-impatto diminuisce con l'aumentare della velocità normale pre-impatto stessa.

3. DEFINIZIONE DI CARATTERE GENERALE DELLE DISCONTINUITÀ PRESENTI NELLE ROCCE LAPIDEE

Con il termine “**discontinuità**” si indica qualsiasi interruzione di continuità in una massa rocciosa. Con tale termine si indicano la maggior parte delle fessure, dei piani di stratificazione, dei piani di scistosità, delle zone di indebolimento e delle faglie.

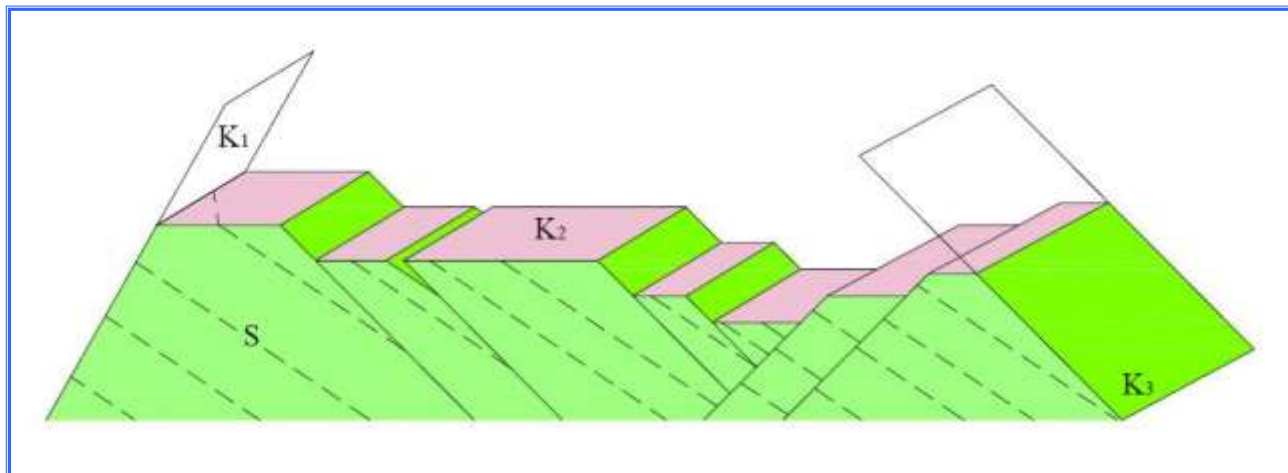


Fig. 5: K1, K2, K3, = sistemi di discontinuità; S= stratificazione

I parametri che in dettaglio consentono di descrivere le discontinuità, e quindi di caratterizzare sotto il profilo geotecnico un ammasso roccioso sono di seguito elencati.

- **Orientazione:** indica la posizione della discontinuità nello spazio. Essa viene descritta dalla direzione di immersione e dall'inclinazione della linea di massima pendenza del piano di discontinuità.

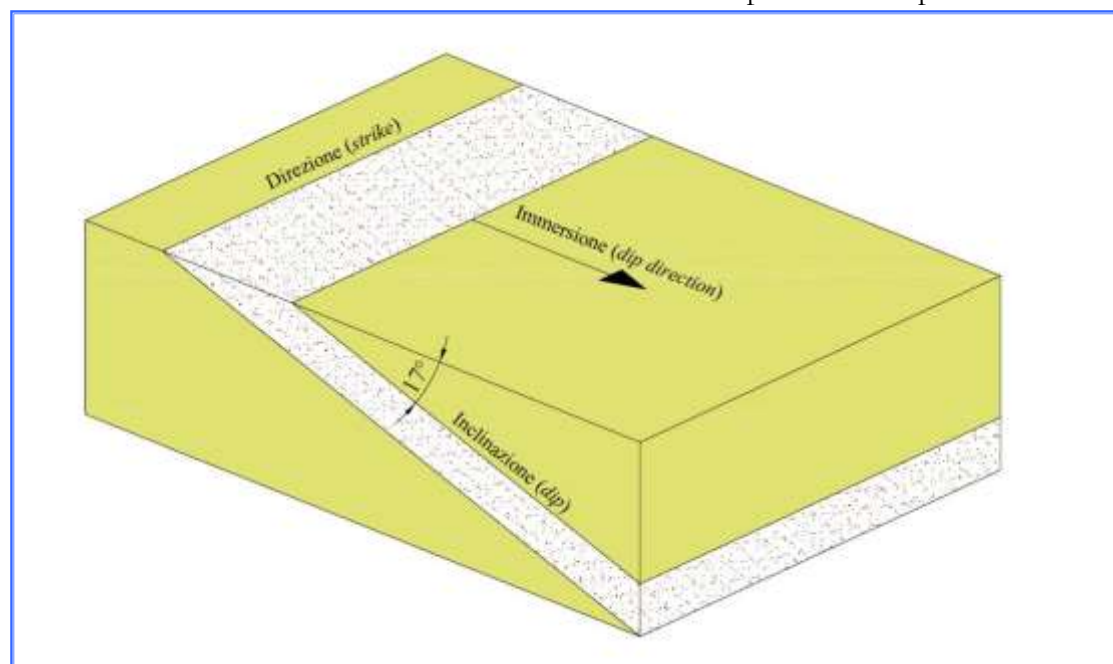


Fig. 6: Rappresentazione di un piano di discontinuità nello spazio

- **Spaziatura:** indica la distanza tra discontinuità adiacenti misurata in direzione ortogonale alle discontinuità stesse.

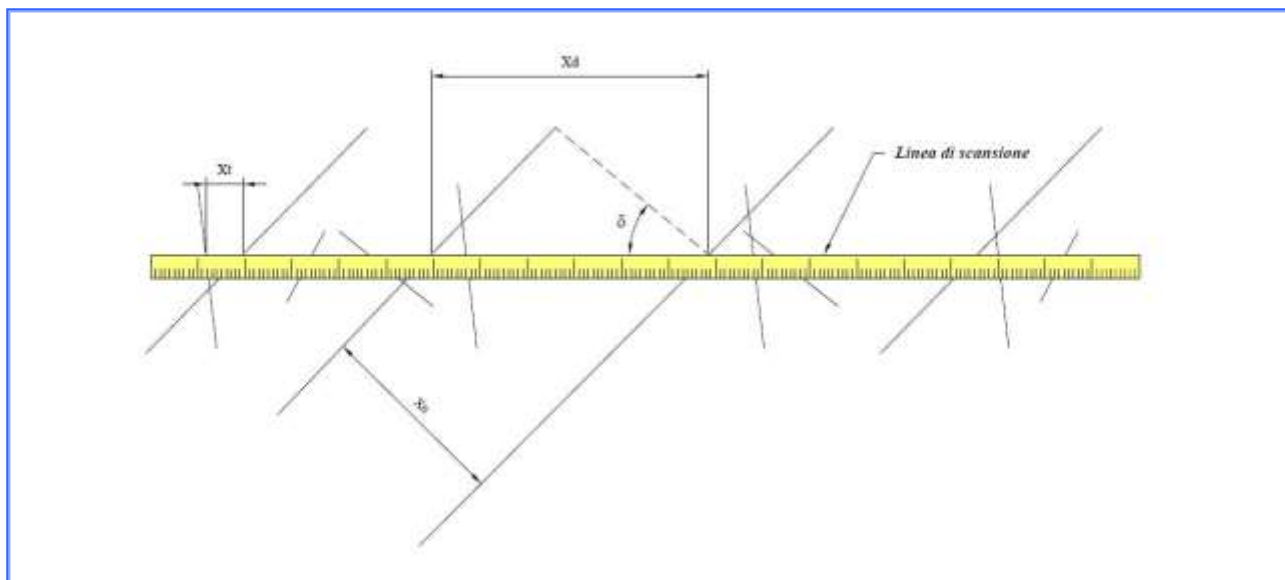


Fig. 7: Spaziatura delle discontinuità negli ammassi rocciosi. Definizione bidimensionale della spaziatura normale (X_n), della spaziatura totale (X_t) e della spaziatura del set (X_d).

<i>Descrizione</i>	<i>Spaziatura</i>
Sp. estremamente stretta	< 2 cm
Spaziatura molto stretta	2÷6 cm
Spaziatura stretta	6÷20 cm
Spaziatura moderata	20÷60 cm
Spaziatura larga	60÷200 cm
Spaziatura molto larga	200÷600 cm
Sp. estremamente larga	> 600 cm

Classificazione ISRM in base alla spaziatura

- **Persistenza:** lunghezza della discontinuità osservata in un affioramento. Essa dà una misura dell'estensione areale e/o della profondità di penetrazione di una discontinuità. Il fatto che il piano di discontinuità termini in roccia massiccia o contro altre discontinuità riduce la persistenza.

<i>Descrizione</i>	<i>Persistenza</i>
Pers. molto bassa	<1 m
Persistenza bassa	1÷3 m
Persistenza media	3÷10 m
Persistenza alta	10÷20 m
Persistenza molto alta	>20 m

Classificazione ISRM in base alla persistenza

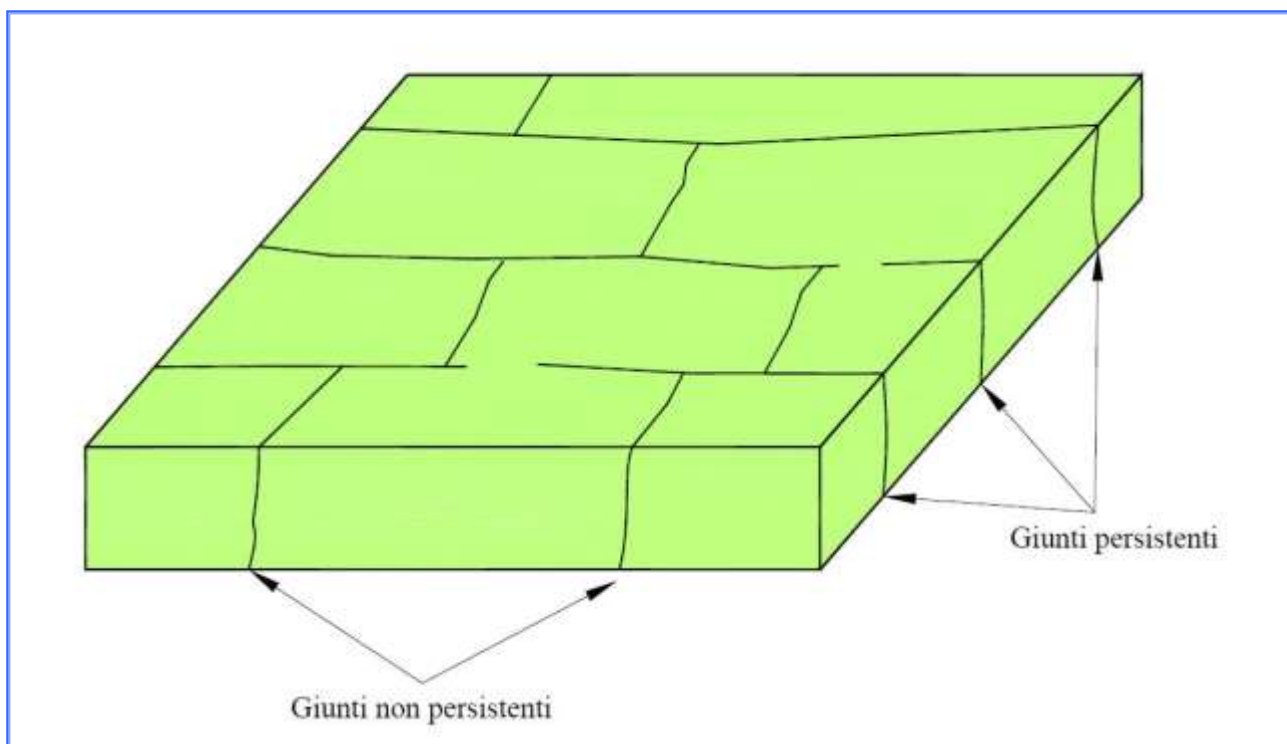
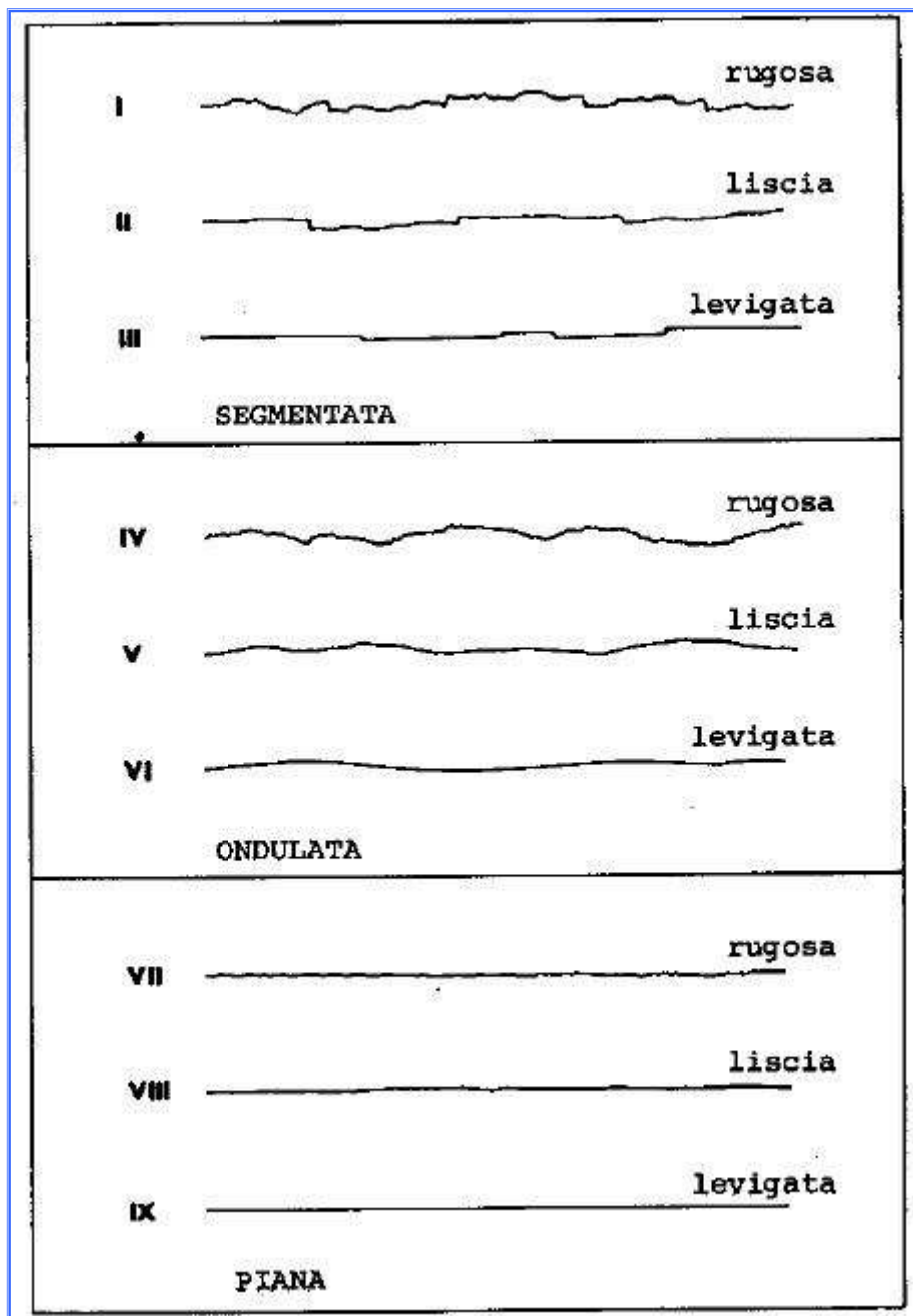


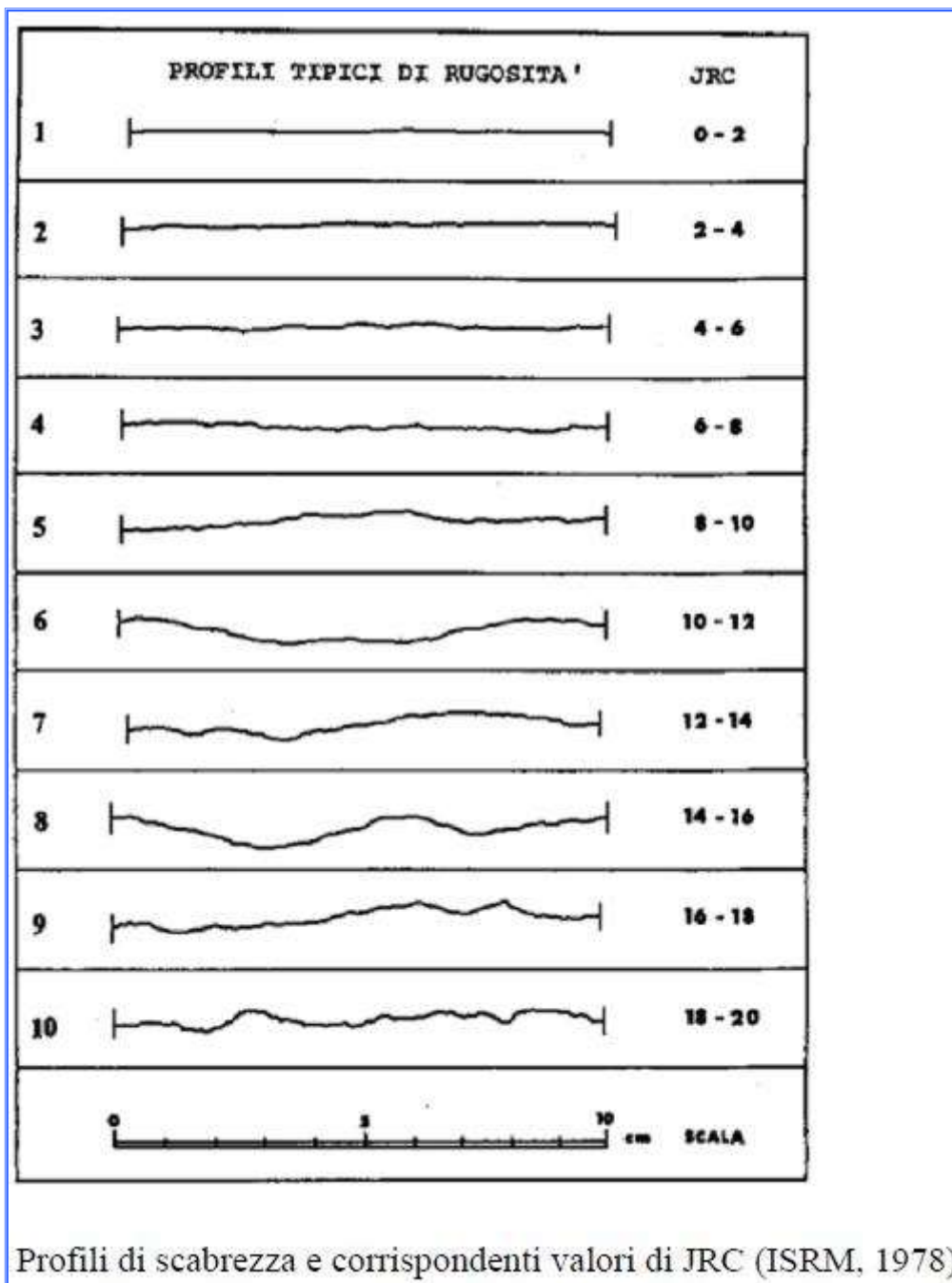
Fig. 8: Concetto di persistenza di una discontinuità

- **Rugosità o scabrezza:** scabrezza delle superfici affacciate di una discontinuità ed ondulazione relativamente al piano medio delle discontinuità. Sia la rugosità che il suo andamento morfologico contribuiscono alla resistenza di taglio.



Classificazione descrittiva delle discontinuità ondulate proposta dall'ISRM

- **Resistenza delle pareti:** resistenza a compressione dei lembi affacciati di una discontinuità. Può essere minore della resistenza della roccia massiccia per l'esposizione agli agenti atmosferici e quindi la conseguente alterazione delle pareti. Essa costituisce una componente rilevante della resistenza al taglio se le pareti sono a contatto.



- **Apertura:** distanza tra i lembi affacciati di una discontinuità. Lo spazio interposto può essere riempito da aria o acqua o da altro materiale.

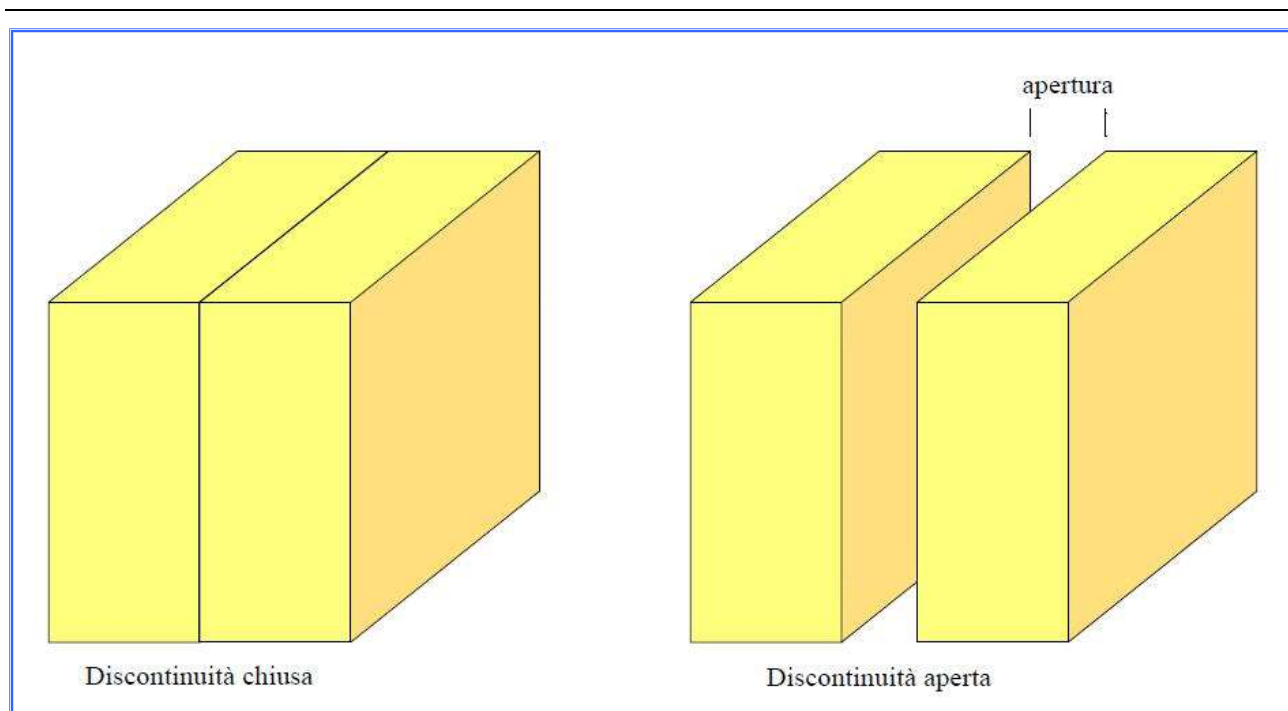


Fig. 9 : Apertura di una discontinuità

In base alle misure eseguite, le Raccomandazioni ISRM propongono la seguente classificazione:

<i>Apertura</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Discontinuità</i>
<0.1 mm	Molto stretta	Chiusa
0,1÷0,25 mm	Stretta	
0,25÷2,5 mm	Parzialmente aperta	
0,5÷2,5 mm	Aperta	Semi-aperte
2,5÷10 mm	Moderatamente larga	
>10 mm	Larga	
1÷10 cm	Molto larga	Aperte
10÷100 cm	Estremamente larga	

Classificazione ISRM in base all'apertura

- **Riempimento:** materiale che separa le pareti affacciate di una discontinuità e che è di solito meno resistente della roccia ospite. Tipici materiali di riempimento sono sabbia, limo, argilla, breccia più o meno fine, milonite.

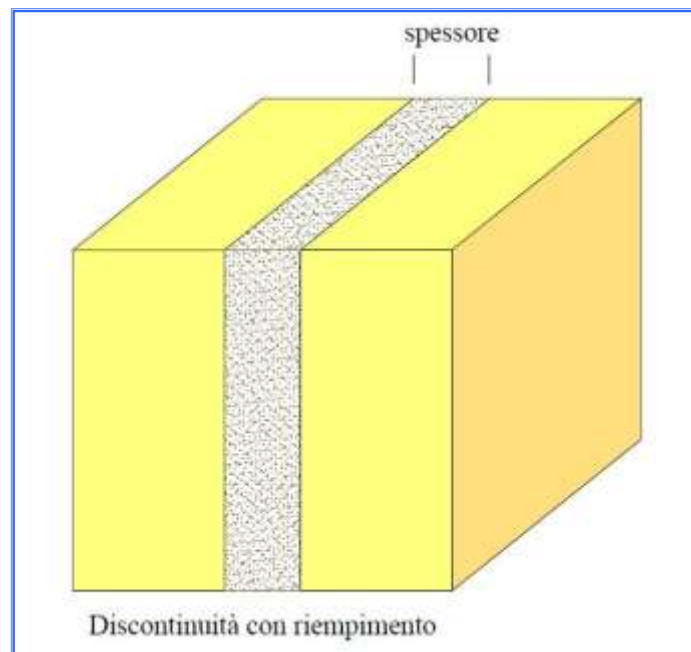


Fig. 10

- **Filtrazione:** flusso d'acqua e/o umidità visibile, ovvero, valutabile nelle singole discontinuità o nella massa rocciosa nel suo insieme. Le raccomandazioni ISRM forniscono degli schemi descrittivi per stimare la filtrazione attraverso discontinuità senza riempimento, discontinuità con riempimento e una massa rocciosa. Si riportano di seguito le tabelle utili per la descrizione della filtrazione:

<i>Grado di filtrazione</i>	<i>Descrizione</i>
1	La discontinuità è molto chiusa e asciutta; il flusso lungo di essa non appare possibile.
2	La discontinuità è asciutta senza alcun evidente flusso d'acqua.
3	La discontinuità è asciutta ma mostra segni evidenti di flusso d'acqua, come tracce di ossidazione, ecc.
4	La discontinuità è umida ma non vi è presenza di acqua libera.
5	La discontinuità mostra filtrazione, occasionali gocce d'acqua ma non flusso continuo.
6	La discontinuità mostra un flusso continuo di acqua, (stimare la portata in l/min e descrivere se la pressione è bassa, media, o alta).

Discontinuità senza riempimento

<i>Grado di filtrazione</i>	<i>Descrizione</i>
1	I materiali di riempimento sono decisamente consolidati e asciutti; un flusso significativo appare improbabile per via della permeabilità molto bassa.
2	I materiali di riempimento sono umidi ma non c'è presenza di acqua libera
3	I materiali di riempimento sono bagnati; occasionali gocce d'acqua
4	I materiali di riempimento mostrano segni di dilavamento; flusso continuo di acqua, (valutare la portata in l/min.).
5	I materiali di riempimento sono localmente dilavati; considerevole flusso di acqua lungo i canali di dilavamento (stimare la portata in l/min. e descrivere la pressione, se bassa, media o alta).
6	I materiali di riempimento sono completamente dilavati; si osservano alte pressioni dell' acqua specialmente al momento dell'esposizione (stimare la pressione in l/min. e descrivere la pressione)

Discontinuità con riempimento

<i>Grado di filtrazione</i>	<i>Descrizione</i>
1	Pareti e corona asciutti; nessuna filtrazione rilevabile
2	Piccola filtrazione; specificare le discontinuità gocciolanti
3	Flusso medio; specificare le discontinuità con flusso continuo, (stimare la portata in l/min su una lunghezza di scavo di 10 m)
4	Flusso alto; specificare le discontinuità con flusso intenso, (stimare la portata in l/min su 10 m di lunghezza di scavo)
5	Flusso eccezionalmente alto; specificare la sorgente di tale flusso, (stimare la portata in l/min su 10 m di lunghezza di scavo).

Massa rocciosa (es.: contorno galleria)

- **Sistemi di discontinuità:** definisce l'insieme dei sistemi presenti. La massa rocciosa può essere ulteriormente divisa da discontinuità di carattere singolare o random. Parametro utile per la classificazione dell'ammasso roccioso è il **Jn ("Joint Set Number")** che dipende dal numero di sistemi di giunti presenti nell'ammasso roccioso; i valori sono riassunti nella seguente tabella:

<i>Class.</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Jn</i>
A	Roccia compatta o poche discontinuità	0÷1
B	un sistema di discontinuità	2
C	un sistema più discontinuità casuali	3
D	due sistemi di discontinuità	4
E	due sistemi più discontinuità casuali	9
F	tre sistemi di discontinuità	6
G	tre sistemi più discontinuità casuali	12
H	quattro o più sistemi di discontinuità	15
I	roccia fratturata simile a un terreno	20

- **Dimensione dei blocchi:** dimensione del blocco roccioso risultante dalla reciproca orientazione dei sistemi di discontinuità che si intersecano e dalla loro relativa spaziatura. Discontinuità singolari o random possono ulteriormente influenzare il volume roccioso unitario e la sua forma.

<i>Grado</i>	<i>Descrizione</i>
1	massa continua; discontinuità occasionali e casuali
2	un sistema di discontinuità
3	un sistema più discontinuità casuali
4	due sistemi di discontinuità
5	due sistemi più discontinuità casuali
6	tre sistemi di discontinuità
7	tre sistemi più discontinuità casuali
8	quattro o più sistemi di discontinuità
9	roccia fratturata simile a un terreno

Classificazione ISRM in base ai sistemi di discontinuità

L'indice della dimensione dei blocchi (I_b) rappresenta le dimensioni medie dei blocchi di roccia tipici. Nel caso di due di sistemi di discontinuità perpendicolari tra di loro e la stratificazione danno origine a una forma dei blocchi cubica o prismatica, in tal caso il valore di I_b è:

$$I_b = S_1 + S_2 + S_3 / 3$$

dove S_1 , S_2 e S_3 rappresentano le medie dei valori modali delle singole spaziature.

Le prime tre grandezze, nonché il numero di famiglia di discontinuità e le dimensioni dei massi in cui risulta suddiviso l'ammasso, definiscono la configurazione geometrica della struttura; le altre caratteristiche forniscono, unitamente alle precedenti, elementi per la caratterizzazione meccanica.

La cinematica degli spostamenti dei blocchi di un ammasso roccioso dipende dalla orientazione delle discontinuità che li delimitano, descritta dall'angolo di inclinazione α e dall'azimut di inclinazione β , definiti in fig. 11. misurati in sito i valori di α e β rappresentativi della giacitura di ciascuna superficie di discontinuità presente sul fronte di esposizione, questi vengono restituiti in forma grafica sui **diagrammi circolari di Schmidt**. Alla costruzione di tali diagrammi si perviene utilizzando la tecnica grafica della proiezione sferica.

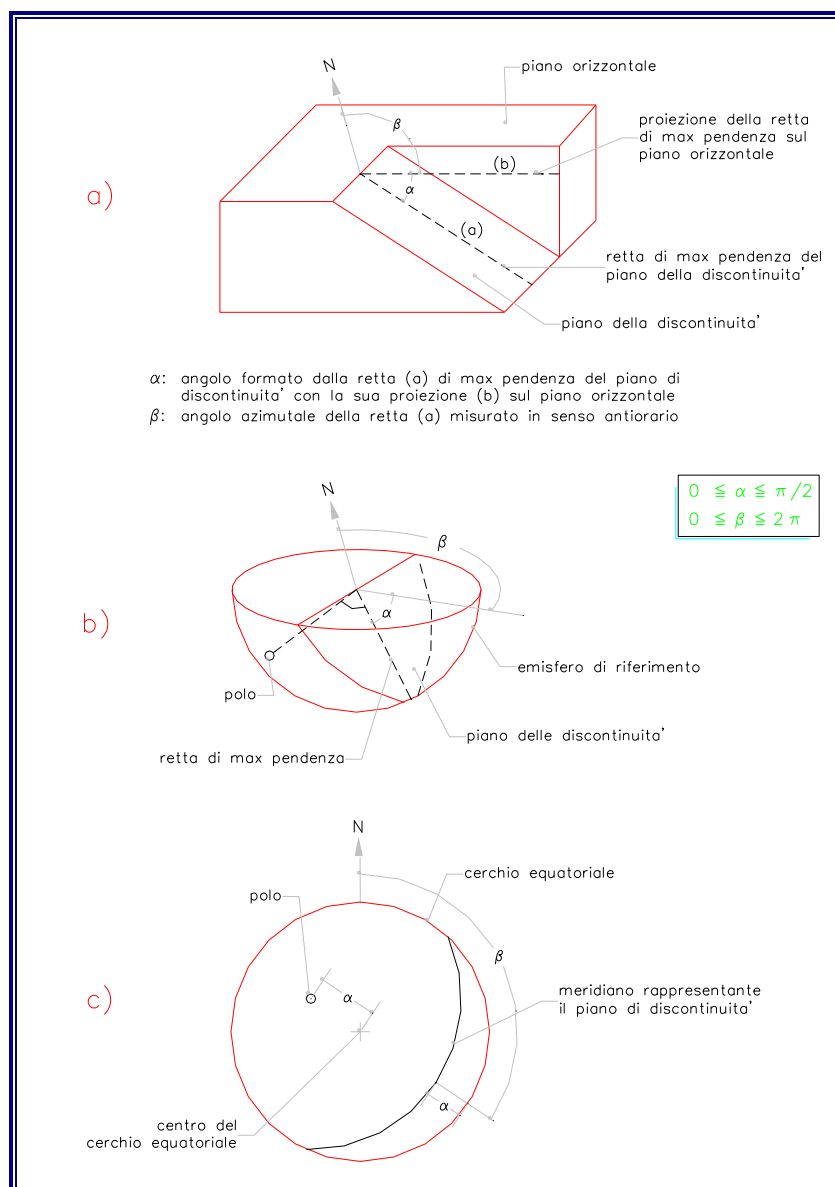


Fig. 11: definizione del sistema di riferimento per la rappresentazione grafica delle superfici di discontinuità e significato degli angoli di orientazione α e β .

4. METODOLOGIE DI RILIEVO ED ELABORAZIONE DEI DATI RACCOLTI

4.1. RILIEVI TOPOGRAFICI TRIDIMENSIONALI

L'intervento di rilievo è stato progettato per ottenere un modello tridimensionale di tutta l'area oggetto di studio rappresentata da curve di livello 3D e piano quotato sul quale riportare ogni indicazione relativa allo stato di fatto.

Il rilievo, in particolare, è stato eseguito con metodologia APR (Aeromobile a pilotaggio remoto) cioè velivoli senza presenza umana a bordo, pilotati da remoto da una stazione a terra, per l'acquisizione di strisciate fotografiche con camera ad alta risoluzione e di cui si esporrà di seguito.

Il drone in nostra dotazione è un drone quadricottero della DJI modello Phantom 4 Pro, con camera avente risoluzione 20 Mp, interamente in composito di carbonio, materiale che permette di ottenere la massima robustezza e leggerezza.

Acquisizione dei fotogrammi da APR

Sono stati effettuati due voli che hanno permesso di acquisire molteplici foto sia zenitali e sia frontali dell'area, finalizzate alla produzione di cartografia frontale dei costoni investigati sia in formato digitale sia vettoriale.

Elaborazione per il calcolo del modello digitale tridimensionale

In questa prima elaborazione si è eseguita una modellazione 3D basata su una recente tecnologia di ricostruzione 3D multi - vista che opera con le immagini.

Le foto devono essere scattate seguendo un determinato criterio che tenga conto della loro sovrapposizione sia laterale che orizzontale. Ciò ha permesso di acquisire il medesimo punto in due fotogrammi distinti e quindi di ricostruirne la corrispondenza e la posizione (coord. x,y,z) rispetto alla fotocamera montata sul drone.

Sia l'allineamento immagine e sia la ricostruzione del modello 3D sono completamente automatizzate.

In generale l'obiettivo finale è quello di costruire un modello 3D con texture tramite l'utilizzo di software dedicati. Primo output ottenuto dall'elaborazione dei fotogrammi è la nuvola di punti sulla quale sono state calcolate le superfici 3D.

Le nuvole di punti ottenute dall'elaborazione fotogrammetrica hanno permesso di generare una mesh texturizzata dalla quale sono state elaborate le ortofoto sia zenitale e sia frontale.

4.2. ISPEZIONI, RILIEVI GEOLOGICI E GEOMECCANICI

La seconda fase di acquisizione dati ha riguardato l'esecuzione di rilevamenti geologici, delle ispezioni e dei rilievi geomeccanici, eseguiti direttamente sui fronti rocciosi (Figura 6) attraverso la coordinazione di squadre composte da geologi rocciatori certificati e geologi a terra, in costante collegamento radio. I rilevamenti hanno riguardato le porzioni rocciose affioranti e sono stati finalizzati alla definizione dell'assetto geologico delle porzioni corticali dell'ammasso roccioso. I rilievi condotti hanno interessato l'intero sviluppo del fronte verticale e delle aree di ciglio e di piede. In alcuni casi, tuttavia, la presenza di coperture vegetali molto fitte, hanno localmente impedito l'acquisizione di dati geologici e geomeccanici e la valutazione completa delle condizioni di stabilità. Di seguito sono descritte le modalità con cui si è svolto questa fase di rilevamento.



Fase di esecuzione delle stazioni geomeccaniche

5. MODELLAZIONE GEOTECNICA DEL PENDIO AI SENSI DELLE NTC 2018

Lo studio della stabilità dei pendii naturali richiede osservazioni e rilievi di superficie, raccolta di notizie storiche sull'evoluzione dello stato del pendio e su eventuali danni subiti dalle strutture o infrastrutture esistenti, la constatazione di movimenti eventualmente in atto e dei loro caratteri geometrici e cinematici, la raccolta dei dati sulle precipitazioni meteoriche, sui caratteri idrogeologici della zona e sui precedenti interventi di consolidamento. Le verifiche di sicurezza, anche in relazione alle opere da eseguire, devono essere basate su dati acquisiti con specifiche indagini geotecniche.

Tenendo conto del modello geologico ed evolutivo del versante, devono essere programmate specifiche indagini per la caratterizzazione geotecnica dei terreni e dell'ammasso roccioso, finalizzate alla definizione del **modello geotecnico** sulla base del quale effettuare lo studio delle condizioni di stabilità nonché il progetto di eventuali interventi di stabilizzazione. Le indagini devono effettuarsi secondo i seguenti criteri:

- la superficie del pendio deve essere definita attraverso un rilievo plano-altimetrico in scala adeguata ed esteso ad una zona sufficientemente ampia a monte e valle del pendio stesso;
- lo studio geotecnico deve definire la successione stratigrafica e le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi, l'entità e la distribuzione delle pressioni interstiziali nel terreno e nelle discontinuità, degli eventuali spostamenti plano-altimetrici di punti in superficie e in profondità.

La scelta delle tipologie di indagini e misura, dell'ubicazione del numero di verticali da esplorare, della posizione e del numero dei campioni di terreno da prelevare e sottoporre a prove di laboratorio dipende dall'estensione dell'area, dalla disponibilità di informazioni provenienti da precedenti indagini e dalla complessità delle condizioni idrogeologiche e stratigrafiche del sito in esame. Il numero minimo di verticali di indagine e misura deve essere tale da permettere una descrizione accurata della successione stratigrafica dei terreni interessati da cinematismi di collasso effettivi e potenziali e, in caso di pendii in frana, deve consentire di accertare forma e posizione della superficie o delle superfici di scorrimento esistenti e definire i caratteri cinematici della frana.

La profondità e l'estensione delle indagini devono essere fissate in relazione alle caratteristiche geometriche del pendio, ai risultati dei rilievi di superficie nonché alla più probabile posizione della eventuale superficie di scorrimento. Tutti gli elementi raccolti devono permettere la definizione di un **modello geotecnico di sottosuolo** che tenga conto della complessità della situazione stratigrafica e geotecnica, della presenza di discontinuità e dell'evidenza di movimenti pregressi e al quale fare riferimento per le verifiche di stabilità e per il progetto degli eventuali interventi di stabilizzazione.

5.1. MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO

Per la caratterizzazione geotecnica del substrato roccioso si è fatto riferimento alle risultanze del rilievo geologico strutturale eseguito nell'area attraverso l'analisi del quadro fessurativo locale, confrontando i risultati ottenuti con quelli presenti nella letteratura scientifica.

ZONE GEOMECCANICHE

Durante il rilievo geostrutturale eseguito sul fronte roccioso anche mediante accesso diretto in cordata, si è proceduto all'ispezione del fronte stesso. L'ispezione del fronte è stata rivolta principalmente all'individuazione degli elementi geomorfologici significativi per la stabilità, con particolare attenzione agli elementi strutturali, ai caratteri morfologici delle forme del rilievo in relazione al quadro geologico e strutturale.

Le risultanze di tale ispezione sono state fondamentali per elaborare le cartografie tematiche di prospetto, carta prospetto geomorfologico e carta prospetto geostrutturale in scala 1:100 (Tavola 5 – elaborato 8 redatta dal dott. Geol. Umberto Del Vecchio).

La carta in oggetto riporta gli elementi geomorfologici significativi al fine di individuare le emergenze e le criticità per la stabilità del costone roccioso.

Settore di versante a pendenza sub-verticale con elevato grado di fratturazione; presenza di fasce milonitiche; distacchi di volumi generalmente < 0.5 mc

In questa voce rientra prevalentemente l'area dello scavernamento, laddove l'elevato grado di fratturazione, associato alla presenza di faglie e fratture persistenti ha determinato uno stato critico dove sono frequenti distacchi di masse instabili generalmente con volume inferiore a 0.5 mc. In tale area rientrano anche delle fasce milonitiche associate alle faglie presenti e cartografate.

Settore di versante a pendenza sub-verticale con alto grado di fratturazione; distacchi di volumi generalmente 0.5-1 mc; presenza di blocchi isolati di dimensioni > 1 mc

In questa voce rientra prevalentemente l'area ad est dello scavernamento, laddove la presenza di un alto grado di fratturazione determina la presenza di blocchi isolati e frequenti distacchi di masse instabili generalmente con volume compreso tra 0.5 e 1 mc. Sono segnalati anche blocchi isolati di dimensioni superiori a 1 mc..

Cumulo di frana al piede della parete con volumetria dei clasti < 0.2 mc

Al piede del costone, in massima parte nel settore caratterizzato da un elevato grado di fratturazione e presenza di faglie, è presente un cumulo di frana costituito dai blocchi caduti dal costone, principalmente dallo scavernamento e accumulatisi al piede; il volume è molto

variabile ma generalmente inferiore a 0.2 mc, anche se sono presenti blocchi di volume maggiore.



- 1) settore di versante con elevato grado di fratturazione
- 2) settore di versante con alto grado di fratturazione
- 3) cumulo di frana al piede della parete

Liscione di faglia con giacitura

In questa voce rientrano i piani e liscioni di faglia individuati e cartografati; è riportata la giacitura presa in campo.



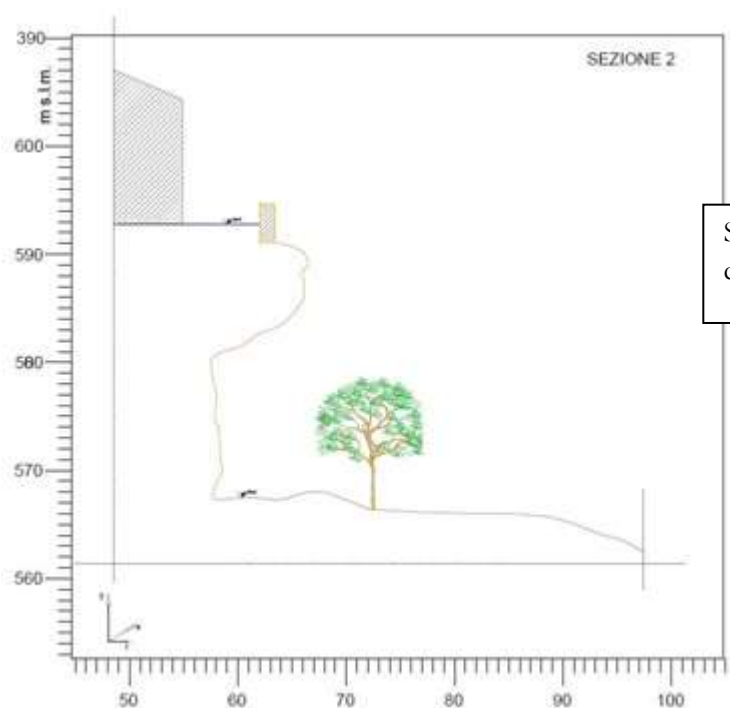
Vista del liscione di faglia che sovrasta lo scavernamento, durante la fase di ispezione in parete

Scavernamento impostato su allineamenti strutturali

Il costone è caratterizzato dalla presenza di uno scavernamento impostato su allineamenti strutturali tra cui la faglia illustrata nella foto precedente. La morfologia dello scavernamento rende aggettante il costone nella porzione interessata e rende difficoltoso un intervento di mitigazione. Lo scavernamento rientra nel settore di versante a pendenza sub-verticale con elevato grado di fratturazione



Porzione di costone caratterizzato dalla presenza dello scavernamento; visibile in sommità il liscione di faglia su cui si imposta lo scavernamento



Sezione morfologica con andamento dello scavernamento

Nicchia recente da fenomeni di crollo

In questa voce rientrano tutte le nicchie associate a distacchi recenti, sia se questi interessano solo la roccia sia se interessano anche strutture antropiche e/o fabbricati



Nicchia di distacco che ha interessato struttura antropica (solaio esterno)



Nicchia di distacco che ha interessato il costone roccioso sotto le strutture

Blocchi rocciosi isolati e/o instabili con riferimento

Sul fronte roccioso sono stati individuati alcuni blocchi dislocati e/o isolati in condizioni di precario equilibrio il cui volume è compreso tra 5 e 0.5 mc.

Nella tavola è riportato anche il volume calcolato sulla base del rilievo tridimensionale eseguito; la tabella dei volumi viene riportata anche di seguito:

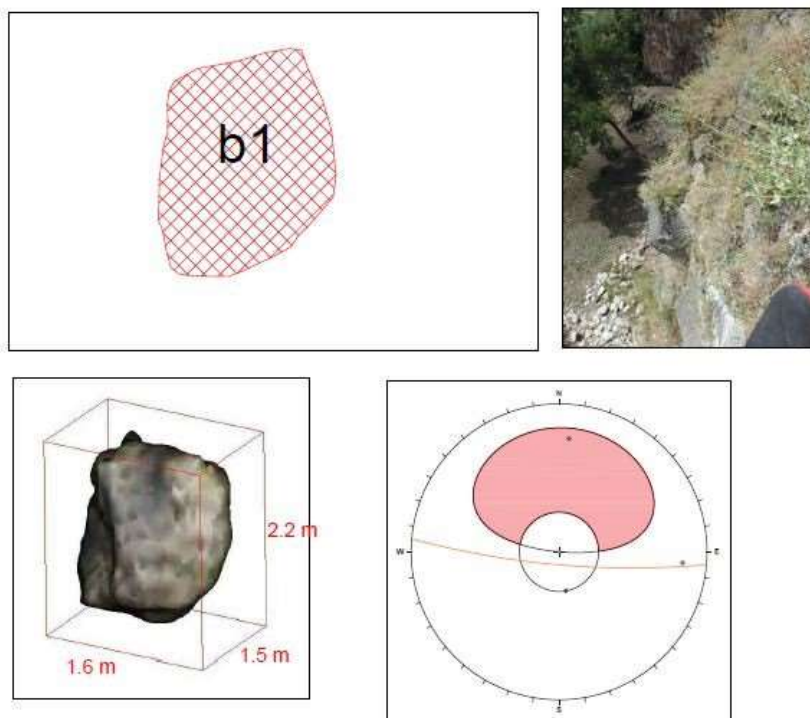
Blocco

Volume (MC)

B1	5.2
B2	4
B3	1.3
B4	1
B5	1.4
B6	0.5
B7	0.5
B8	1.6
B9	5.9
B10	0.6
B11	0.4

Di seguito sono descritti singolarmente con particolare riferimento al quadro fessurativo, le dimensioni, il cinematismo più probabile di instabilità.

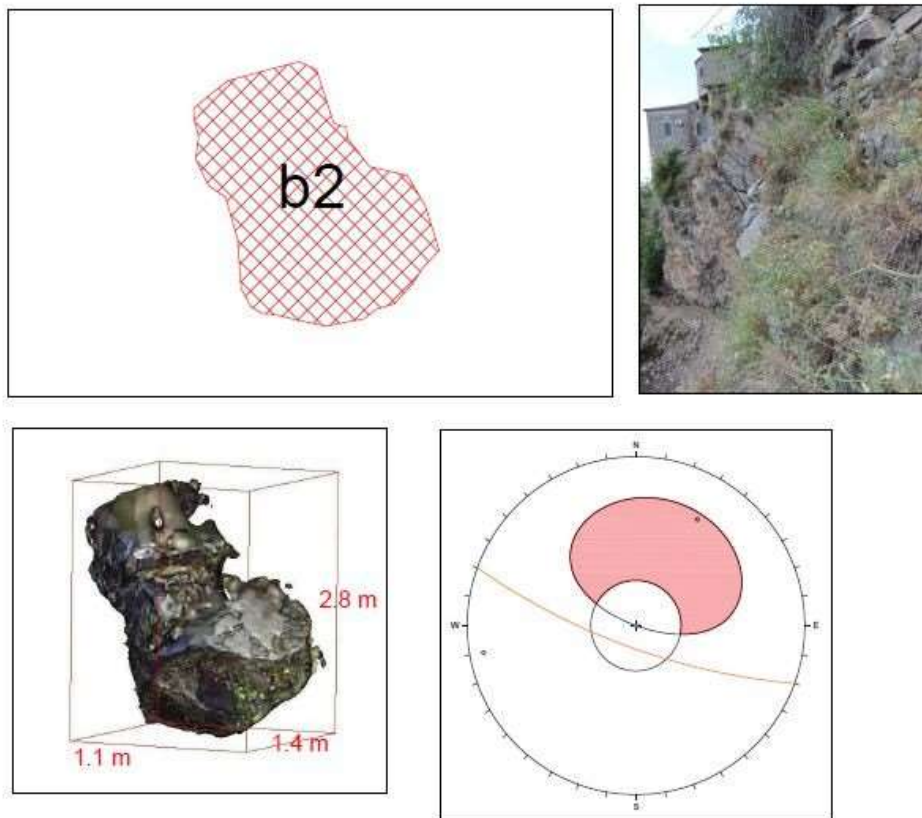
Blocco B1 – 5.2 mc



Descrizione del cinematismo:

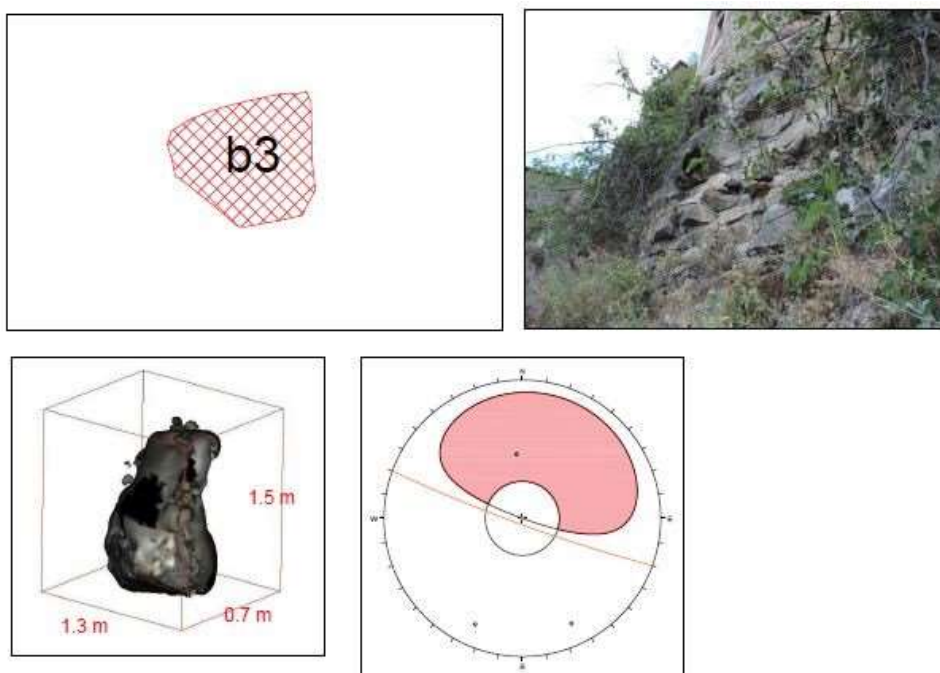
Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare.

Blocco B2 – 4 mc



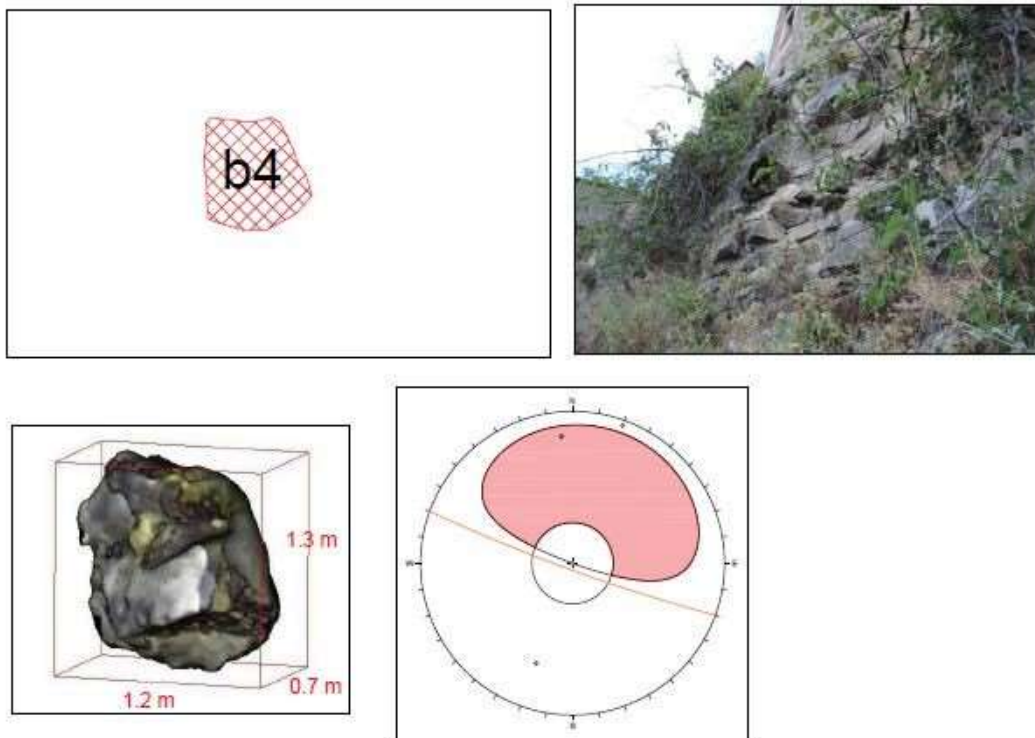
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare.

Blocco B3 – 1.3 mc



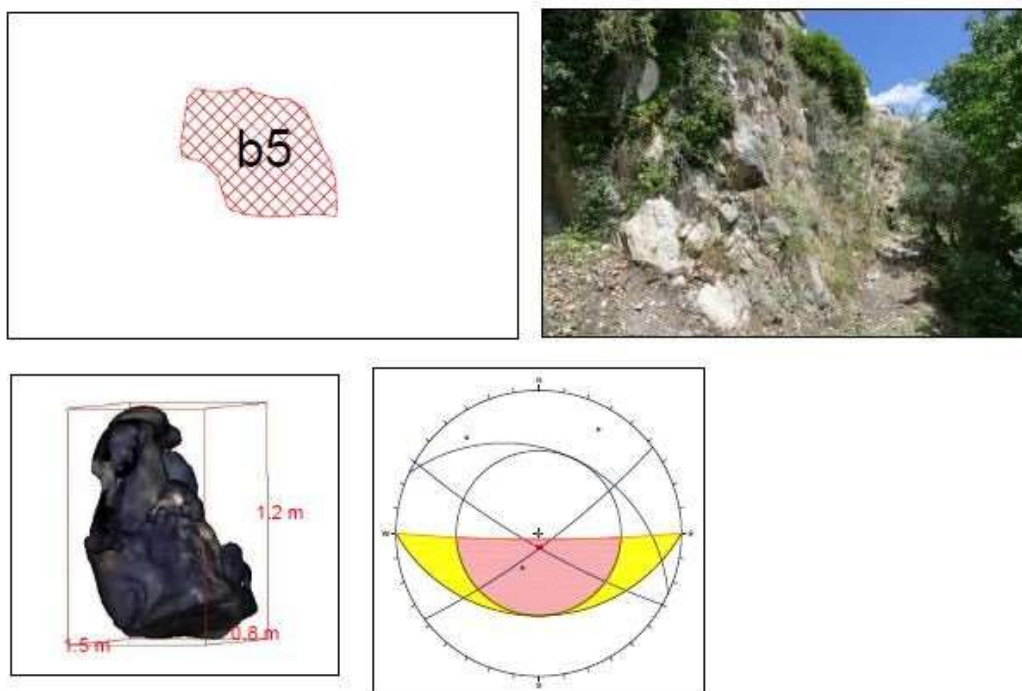
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare.

Blocco B4 – 1 mc



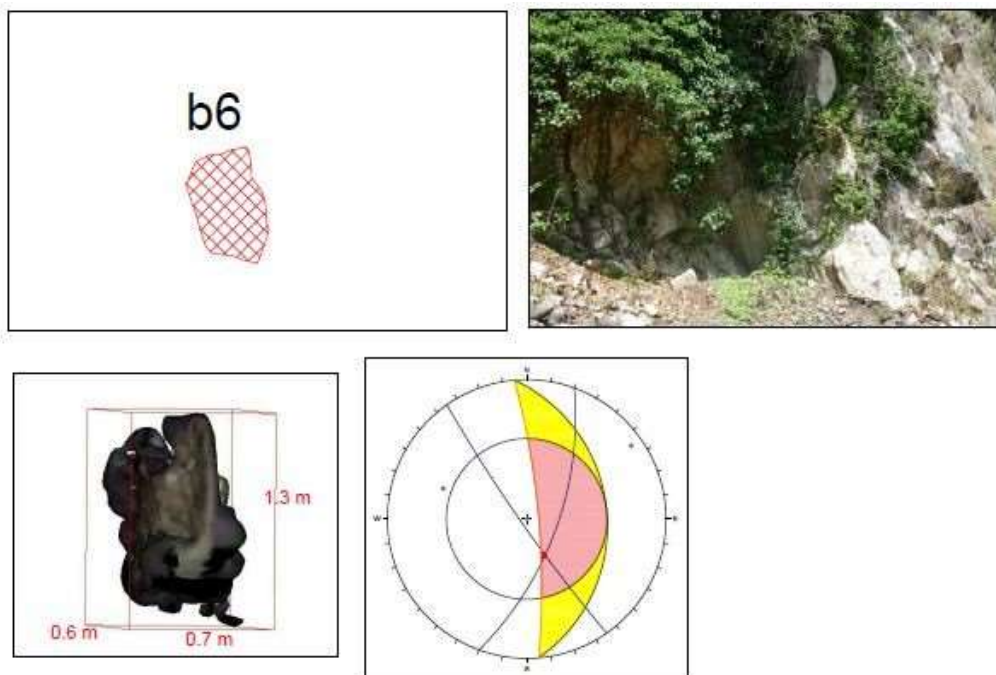
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare

Blocco B5 – 1.4 mc



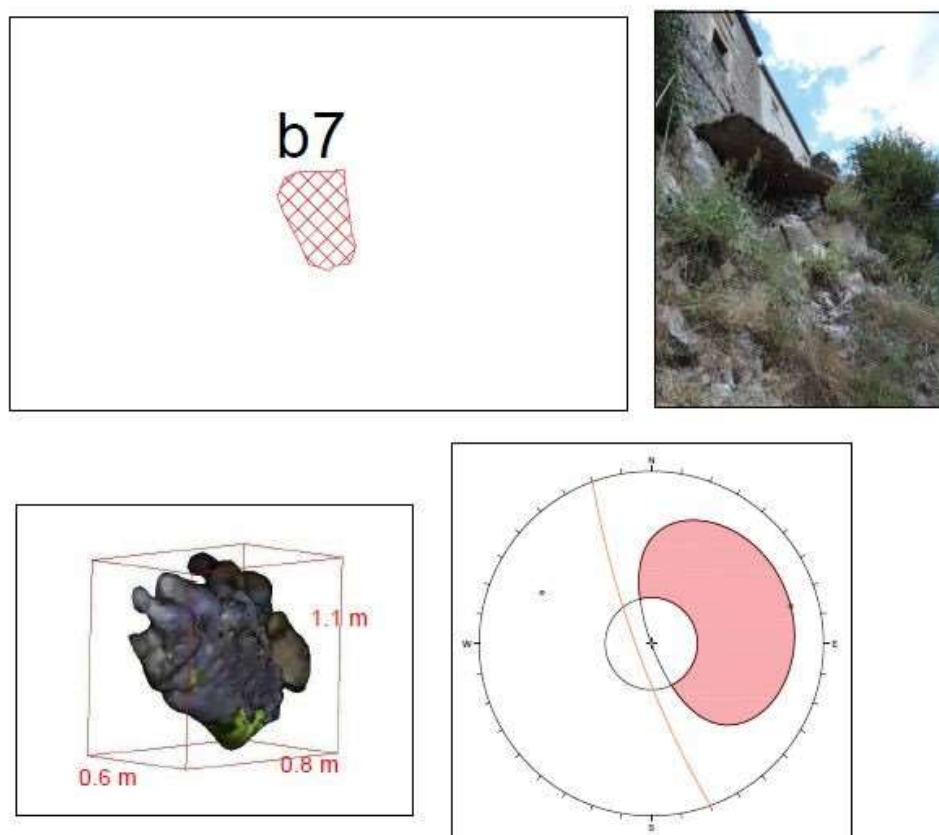
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte che ne determinano l'isolamento; possibile scivolamento a cuneo.

Blocco B6 – 0.5 mc



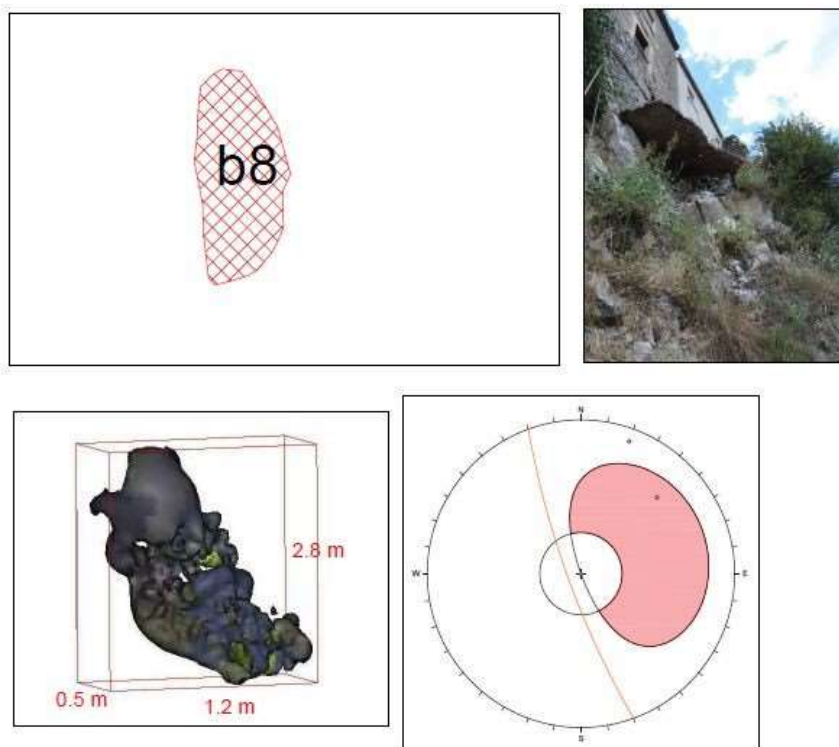
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte che ne determinano l'isolamento; possibile scivolamento a cuneo.

Blocco B7 – 0.5 mc



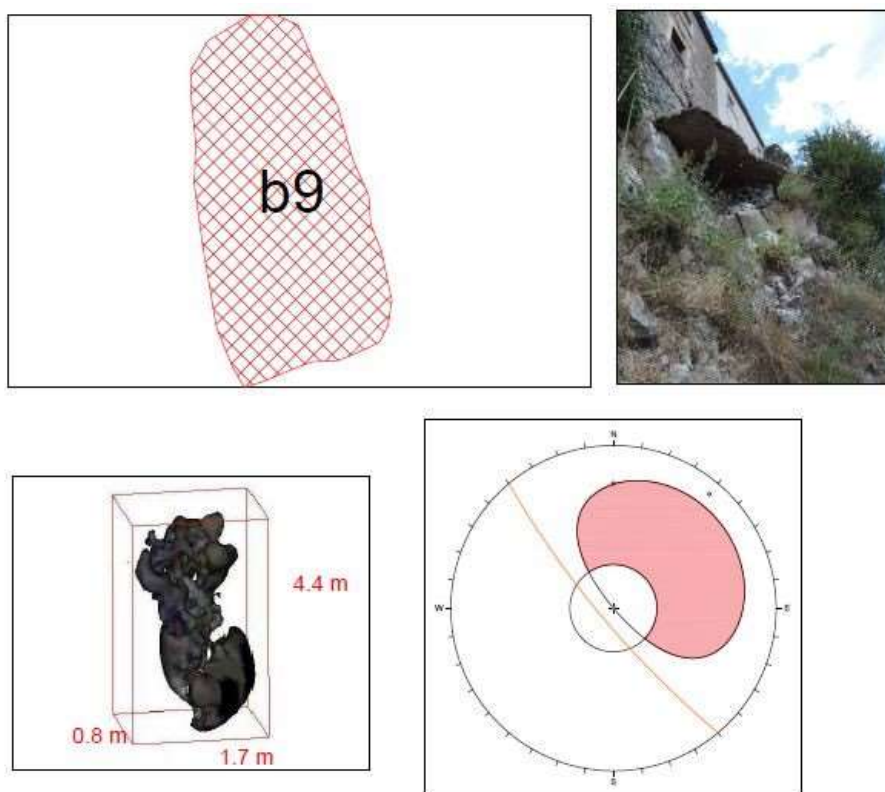
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare.

Blocco B8 – 1.6 mc



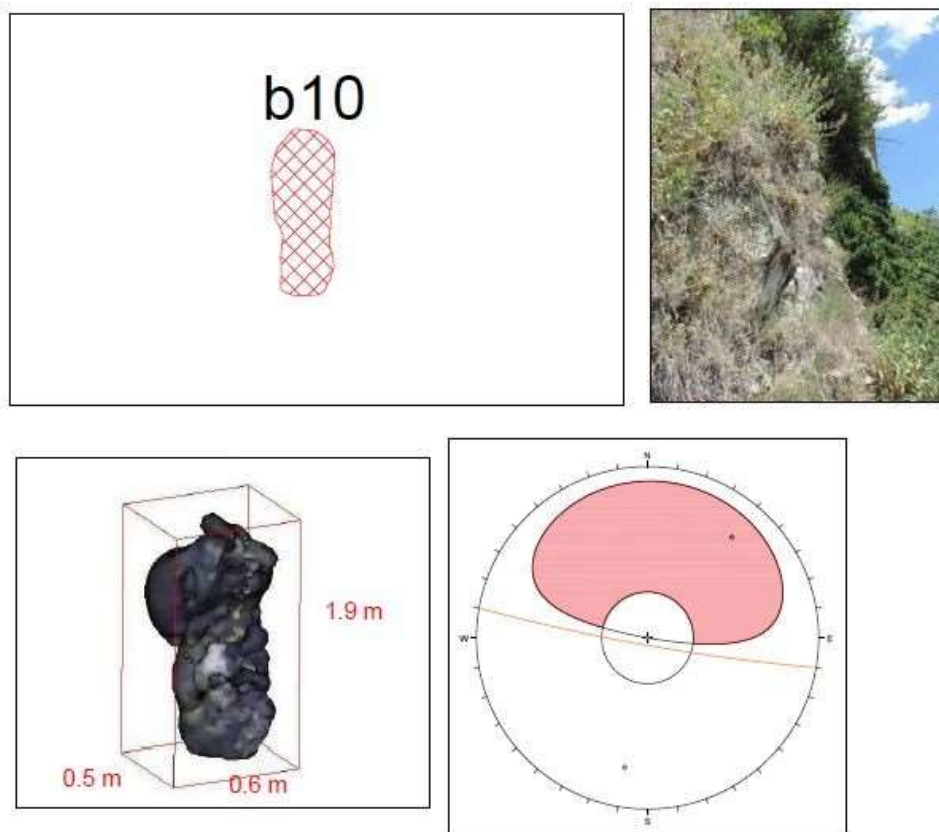
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare.

Blocco B9 – 5.9 mc



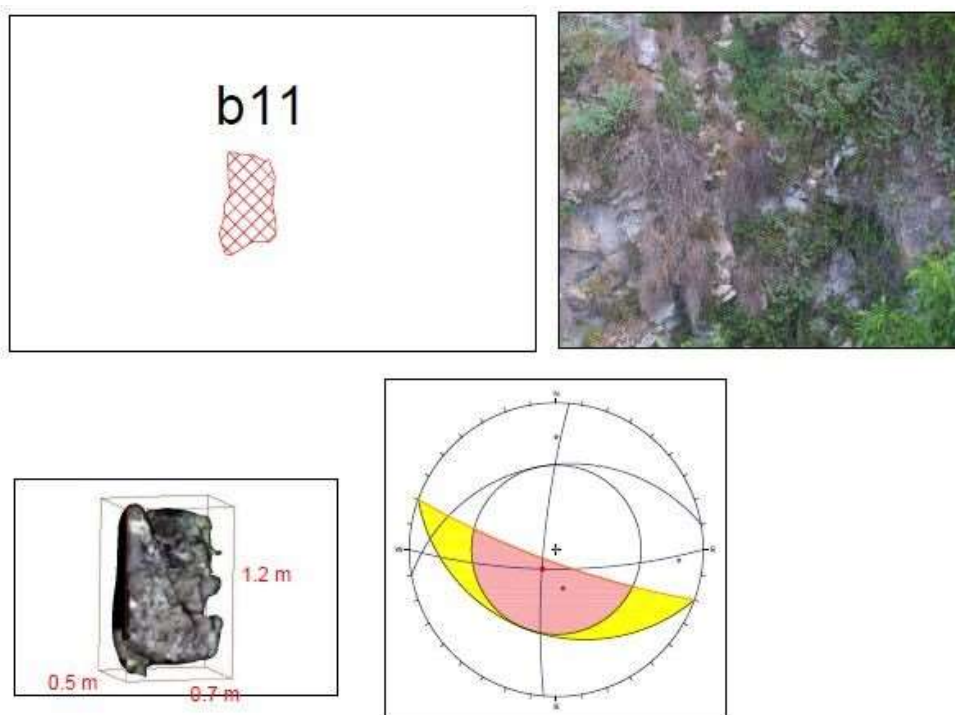
Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare.

Blocco B10 – 0.6 mc



Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte e al piede; possibile scivolamento planare.

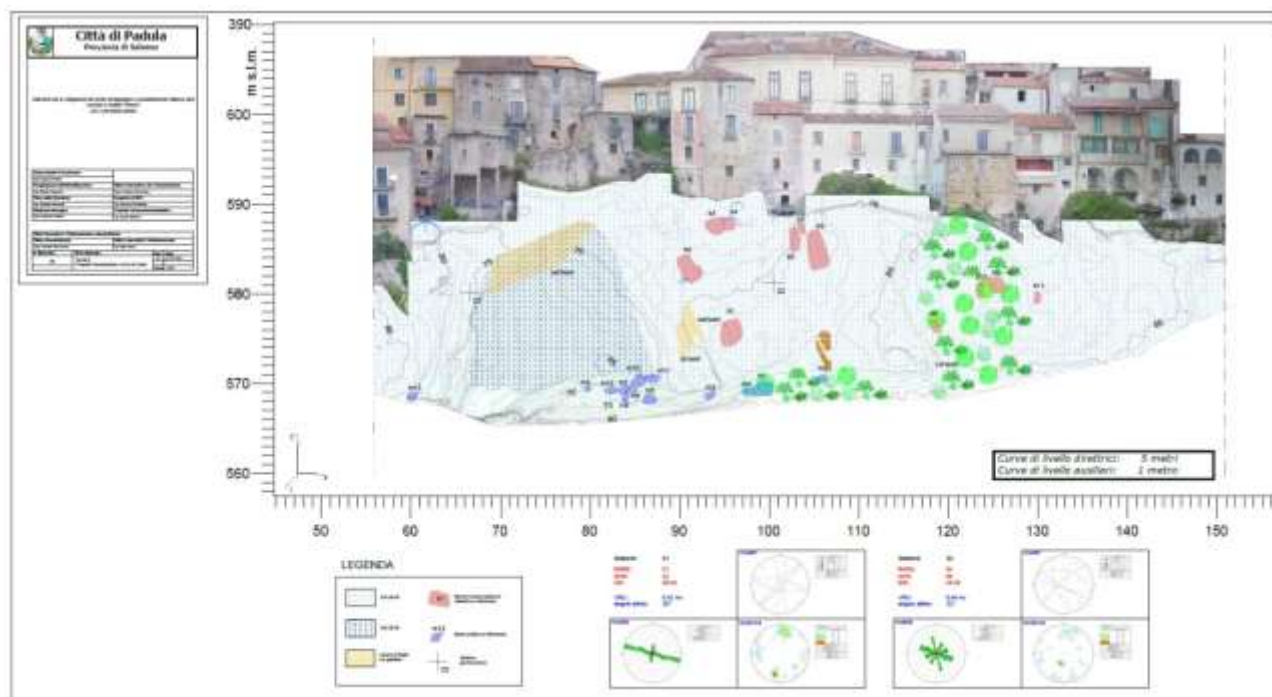
Blocco B11 – 0.4 mc



Descrizione del cinematismo: Blocco isolato lateralmente da fratture sub-parallele al fronte che ne determinano l'isolamento; possibile scivolamento a cuneo.

Carta prospetto geostrutturale (Tavola 6 – elaborato 9)

La carta in oggetto riporta alcuni degli elementi individuati nella tavola precedente e riporta i risultati del rilievo geomeccanico e della qualità dell'ammasso roccioso nella forma del valore di RMRb di Beniaowski e SMR di Romana, calcolato per le due stazioni geomeccaniche eseguite in parete, e nella classificazione completa di tutto il costone roccioso sulla base del GSI di Hoek, calcolato per la porzione interessata dal rilievo geomeccanico, stimato con tabelle di riferimento per le restanti parti del costone roccioso.



Carta prospettica geostrutturale con risultati della classificazione geomeccanica

Qualità dell'ammasso roccioso

I risultati della classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso sono riassunti nella tabella successiva, con indicazione dell'indice RMRb (Beniaowski, 1989), l'indice SMR (Romana, 1985), da cui si ricava la classe e il GSI (Hoek e Marinos 2000):

Staz.	RMRb	SMR	Classe	Descrizione	Stabilizzazione	GSI
S1	51	42	III	Mediocre	Sistematica	40-45
S2	54	60	II	Buona	Occasionale	40-45

Nella tabella successiva sono riportati i parametri indicati dal rilevatore (i parametri calcolati con diverse formulazioni sono comunque indicati per ogni singola stazione):

Staz.	Modulo deform. (GPa)	Coesione (kPa)	Angolo attrito (°)	Resistenza compr. (MPa)	RQD	JRC	VRU (m ³)
S1	2	255	30	65	53	4	0.42
S2	9	274	32	59	58	6	0.46

Il Volume Roccioso Unitario (VRU), calcolato a seguito del clustering e all'individuazione delle famiglie principali, risulta essere compreso tra 0,4 m³.

Sulle stazioni geomeccaniche sono stati eseguiti una serie di test al fine di individuare i potenziali cinematismi che possono verificarsi lungo le discontinuità presenti nell'ammasso roccioso. L'analisi ha riguardato i principali cinematismi di rottura in roccia (scivolamento planare, ribaltamento e rottura a cuneo) che stanno alla base del calcolo dell'indice SMR. Chiaramente, dato che questi test dipendono fortemente dall'esposizione del fronte, variazioni di esposizione del fronte possono determinare significativi cambiamenti dei risultati.

Il software utilizzato per l'analisi ha permesso di ricavare per ogni cinematismo e per ogni stazione geomeccanica, un valore di criticità espresso come percentuale che ogni frattura o intersezione di fratture ricada nell'area di instabilità. Tale criticità viene riepilogata nella tabella successiva.

Cinematismo	Criticità (%)	
	S1	S2
Scivolamento planare (limite 30°)	7,89 %	15,15 %
Scivolamento planare (senza limite)	26,32 %	30,30 %
Ribaltamento flessurale	7,89 %	09,09 %
Ribaltamento diretto e obliquo (piani che possono rappresentare piano di scivolamento)	13,66 %	19,92 %
	7,89 %	18,18 %
Scivolamento a cuneo	22,22 %	27,01 %

Per la caratterizzazione sismica del sito sono state utilizzate le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) D.M. del 17 gennaio 2018.

All'ammasso roccioso è stato attribuito un profilo stratigrafico di tipo **B** ("ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi"), il pendio avendo una pendenza sicuramente maggiore di 15° è stato classificato come **T2**.