



# UNIVERSITÀ DI PARMA

Dipartimento di Ingegneria e Architettura (DIA)

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile

## **Insegnamento di Geologia tecnica e stabilità dei pendii A**

### **QUADERNO DELLE ESERCITAZIONI**

Studente:

*Gabriele Simonetta*

*Matricola: 288832*

Anno Accademico 2018-2019

# Indice

Indice.....	2
1° Consegna.....	4
1.1    Dati di partenza .....	4
1.2    Richieste committente .....	4
1.3    Svolgimento .....	5
2° Consegna.....	7
2.1    Presentazione problematica .....	7
2.2    Richieste committente .....	7
2.3    Risoluzione.....	8
2.3.1    Direzione di immersione .....	8
2.3.2-3    Rappresentazione e determinazione piani tramite Dips .....	8
2.3.4    Angolo inclinazione sondaggi .....	9
2.3.5    Determinazione spaziature corrette .....	10
2.3.6    Numerosità campione.....	10
3° Consegna .....	11
3.1    Presentazione problematica .....	11
3.2    Risoluzione.....	11
3.2.1    Scivolamento planare .....	11
3.2.2    Scivolamento tridimensionale .....	13
3.2.3    Ribaltamento flessionale .....	14
3.2.4    Ribaltamento a blocchi .....	14
3.3    Conclusioni.....	15
4° Consegna.....	16
Determinazione fattori comuni.....	17
4.1    Fattore di sicurezza, criterio di Barton .....	18
4.2    Fattore di sicurezza, criterio di Mohr, coesione nulla .....	19
4.3    Fattore di sicurezza, criterio di Mohr, coesione non nulla .....	19
4.4    Determinazione parametrica del fattore di sicurezza .....	19
4.4.1    Variazione altezza pendio.....	20
4.4.2    Variazione tension crack .....	20
4.4.3    Variazione pendenza del fronte .....	21
4.4.4    Variazione distanza della frattura dal fronte.....	22
4.5    Conclusioni.....	23
5° Consegna.....	24
5.1    Risoluzione discontinuità tridimensionale semplice .....	24

5.1.1	Discontinuità F1-Q1 .....	26
5.1.2	Discontinuità F2-Q1 .....	27
5.2	Risoluzione discontinuità tridimensionale con tension crack.....	28
5.2.1	Discontinuità F1-Q1 .....	28
5.2.2	Discontinuità F2-Q1 .....	30
6°	Consegna.....	33
6.1	Importazione dei dati.....	33
6.2	Costituzione della barriera.....	36
7°	Consegna .....	39
7.1	Rielaborazione dati.....	39
7.1.1	Visualizzazione grafica .....	42
7.2	Conclusioni.....	43
8°	Consegna.....	44
8.1	Dati iniziali .....	44
8.2	Elaborazione dati.....	45
8.3	Simulazioni.....	46
8.3.1	Scenario 1 .....	46
8.3.2	Scenario 2 .....	47
8.3.3	Scenario 3 .....	49
8.4	Conclusioni.....	51
	Riferimenti e note.....	52

# 1 ° Consegna

## 1.1 Dati di partenza

Nell'area oggetto di studio si sono individuati i piani di discontinuità con le caratteristiche riportate in Tabella 1-1.

TABELLA 1-1 PIANI DI DISCONTINUITÀ

PIANO	INCLINAZIONE $\Psi$	DIREZIONE D'IMMERSIONE $\alpha$
<b>K1</b>	30	020
<b>K2</b>	88	250
<b>K3</b>	58	059
<b>K4</b>	29	032
<b>K5</b>	78	127

## 1.2 Richieste committente

È richiesto di:

- Determinare la giacitura della retta  $r$ , intersezione tra i piani K1 e K2, e della retta  $s$ , intersezione tra i piani K3 e K5;
- Determinare il valore dell'angolo compreso tra le rette  $r$  ed  $s$ ;
- Determinare il valore dell'angolo  $Y$  compreso tra i piani K2 e K3;
- Determinare il valore dell'angolo  $\theta$  compreso tra i piani K3 e K4;
- Determinare il valore dell'angolo  $\omega$  compreso tra i piani K1 e K4.
- A partire dall'intersezione fra sistemi di discontinuità K1-K2 e K3-K5, determinare l'orientazione di un foro di sondaggio che permetta di intersecare entrambi i piani con un angolo di  $45^\circ$  (misurato tra il sondaggio e le normali alle discontinuità). Questo sondaggio risulterà utile per le indagini meccaniche svolte sul sito in esame.

## 1.3 Svolgimento

Importati i piani di discontinuità, come trend/plunge, l'intersezione delle discontinuità K1/K2 e K3/K5 è di immediata risoluzione andando a misurare le posizioni dell'intersezioni dei 4 piani sulla rappresentazione grafica NSEW.

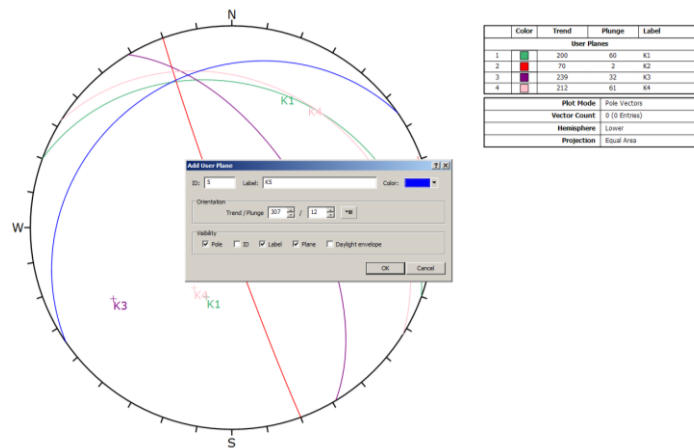


FIGURA 1-1 IMPORTAZIONE 5° PIANO DI DISCONTINUITÀ

Le rette d'intersezione sono collocate rispettivamente a:

- r 339/23
- s 056/57

Esse permetteranno di effettuare con soli due carotaggi l'identificazione del tipo di discontinuità e permettere una migliore determinazione del grado di resistenza dell'intero ammasso roccioso.

Altro fattore utile per l'individuazione dei fori di sondaggio è l'angolo comprensivo delle rette determinato con il programma (Figura 1-2), pari a: 67.65°.

La possibile discordanza fra risultati di altri progettisti è da ricercare nell'impossibilità del software di determinare univocamente le intersezioni delegando all'utente tale compito.

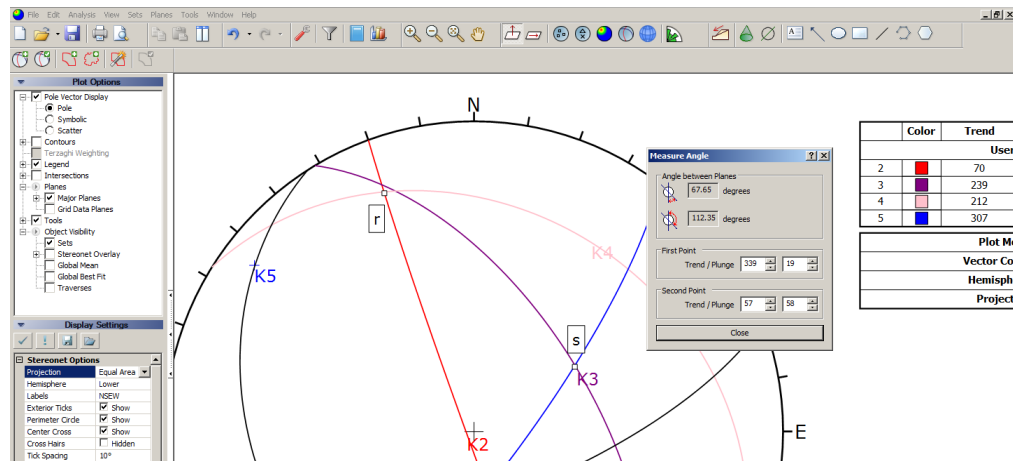


FIGURA 1-2 SCHERMATA MEASURE ANGLE

Le determinazioni dell'angolazioni dei piani di discontinuità permettono di definire, in linea di massima, la resistenza al moto dell'ammasso roccioso. Essi risultano pari a:

- $\gamma: 146.34^\circ$
- $\theta: 32.86^\circ$
- $\omega: 6.16^\circ$

Con essi è possibile determinare se il pendio può essere soggetto a cinatismi (3° Consegna tramite test di Markland) e nel caso tentare di determinare le forze in gioco del moto (4° Consegna) e con esse le eventuali resistenze in atto.

Il foro di sondaggio sarà possibile effettuarlo, considerando l'inclinazione di  $45^\circ$ , in due punti, come si evince dalla Figura 1-3:

- F 027/19
- G 312/65

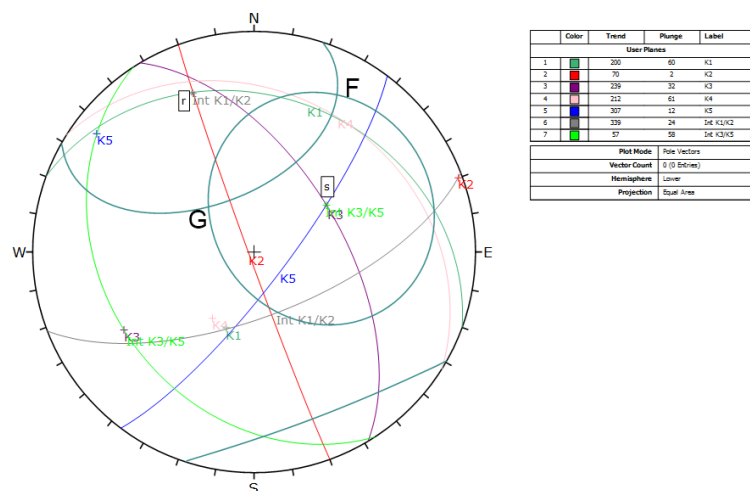


FIGURA 1-3 COSTRUZIONE GRAFICA DEI CONI

## 2 ° Consegna

### 2.1 Presentazione problematica

L'area in Figura 2-1 mostra il rilievo geo strutturale effettuato lungo quattro stendimenti con varie orientazioni; è stato inoltre fornito in .xls i dati dei piani di discontinuità dei vari stendimenti.

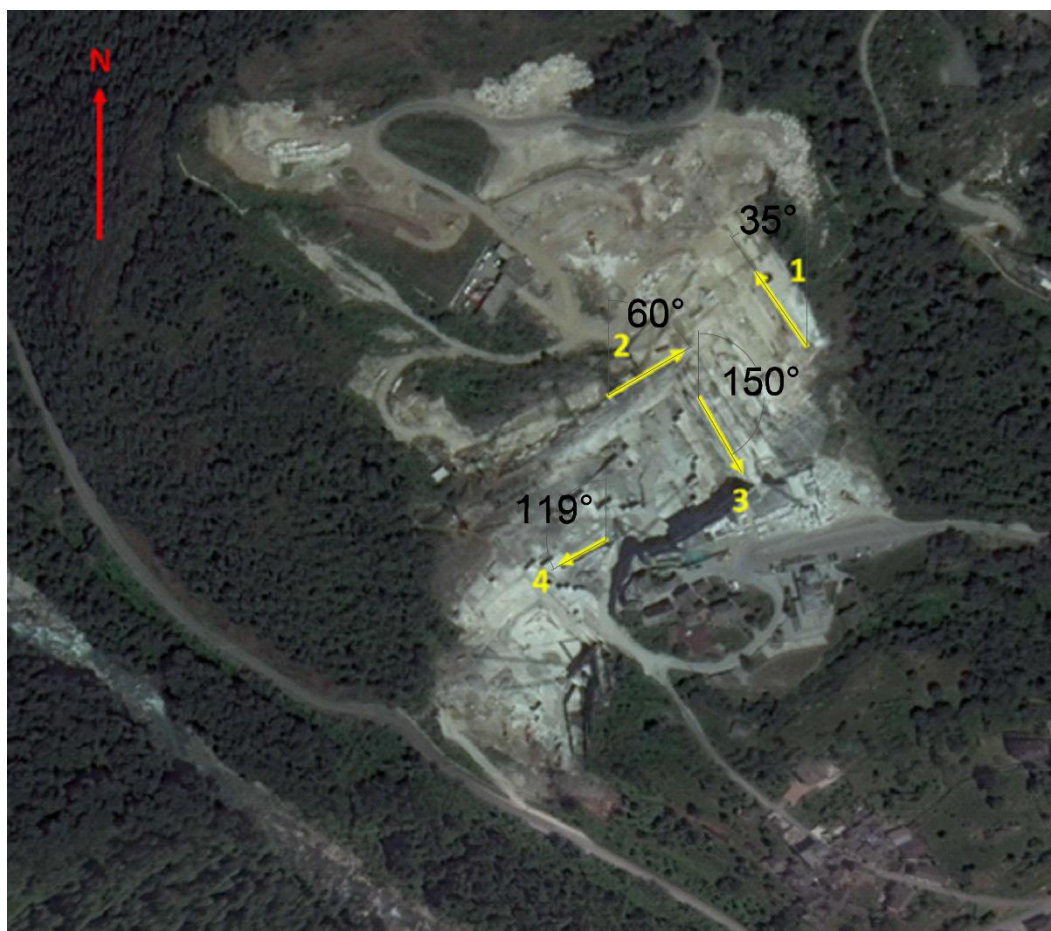


FIGURA 2-1 VISIONE PLANIMETRICA

### 2.2 Richieste committente

Si fa richiesta di:

1. Determinare, sulla base della planimetria, la direzione d'immersione dei singoli stendimenti.
2. Rappresentare mediante il software DIPS i poli relativi ai piani di discontinuità rilevati;
3. Determinare la giacitura dei piani rappresentativi delle famiglie di discontinuità individuate;
4. Partendo dall'orientazione dei sondaggi ricavate nella precedente Consegna, determinare l'angolo con il quale questi intercettano i piani rappresentativi delle famiglie di discontinuità individuate;
5. Determinare le spaziatore corrette delle famiglie di discontinuità di cui sono disponibili i dati.
6. Stabilire la numerosità del campione necessaria ad ottenere valori di spaziatore con errore pari a 0.2 per un livello di confidenza pari a 0.95.3

2.3 Risoluzione

2.3.1 Direzione di immersione

La direzione di immersione degli stendimenti si ricava graficamente misurando l’angolo sulla Figura 2-1.

TABELLA 2-1 DIREZIONE D’IMMERSIONE MEDIA

Stendimento	DIREZIONE D’IMMERSIONE [°] In senso orario
1	325
2	60
3	150
4	241

2.3.2 -3 Rappresentazione e determinazione piani tramite Dips

Nell’ipotesi che si tratti di un unico ammasso roccioso, si possono determinare due famiglie di discontinuità evidenziate dalle iso-densità di poli da cui è stato escluso, come si evince dalla Figura 2-2, il gruppo etichettato “A” poiché non caratterizzante l’ammasso.

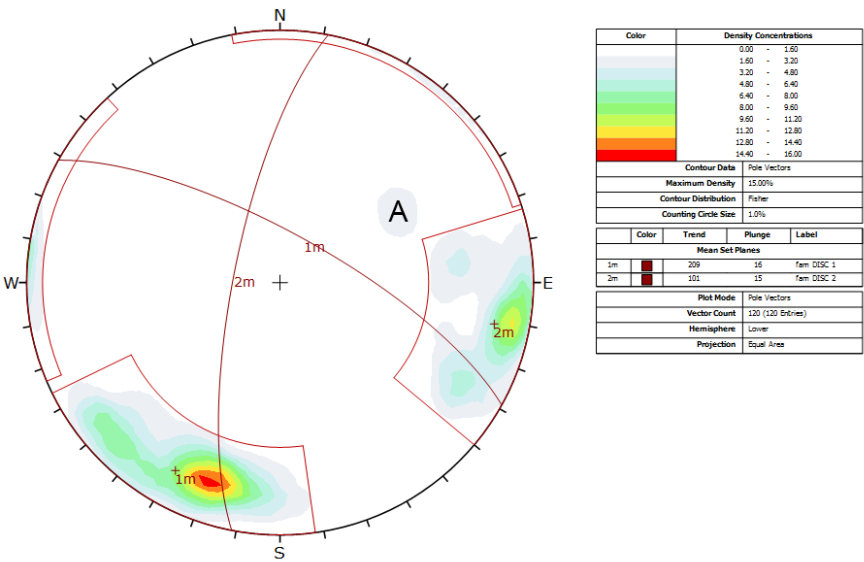


FIGURA 2-2 CURVE DI ISO-DENSITÀ DI POLI

La giacitura dei piani medi è quindi determinato tramite software e risulta pari a:

TABELLA 2-2 GIACITURA PIANI MEDI

	Trend	Plunge
Fam.1	209	16
Fam.2	101	15



Con le informazioni ad ora disponibili si può concludere che, in caso di rottura essa avverrà, molto probabilmente con medesima modalità fra le due famiglie, cioè per scivolamento su piano, che si verifica “in masse rocciose dove la giacitura delle discontinuità è parallela alla direzione del fronte; questo fenomeno è tipico delle rocce a lastre o scistose”. (Pag 135 Figura 6.7) (Giani, 1988).

### 2.3.4 Angolo inclinazione sondaggi

Gli angoli di inclinazione necessari per intercettare le due famiglie di discontinuità risultano essere quattro, due per foro di sondaggio, inserendo i dati della precedente **relazione** si ottiene la seguente Figura 2-3.

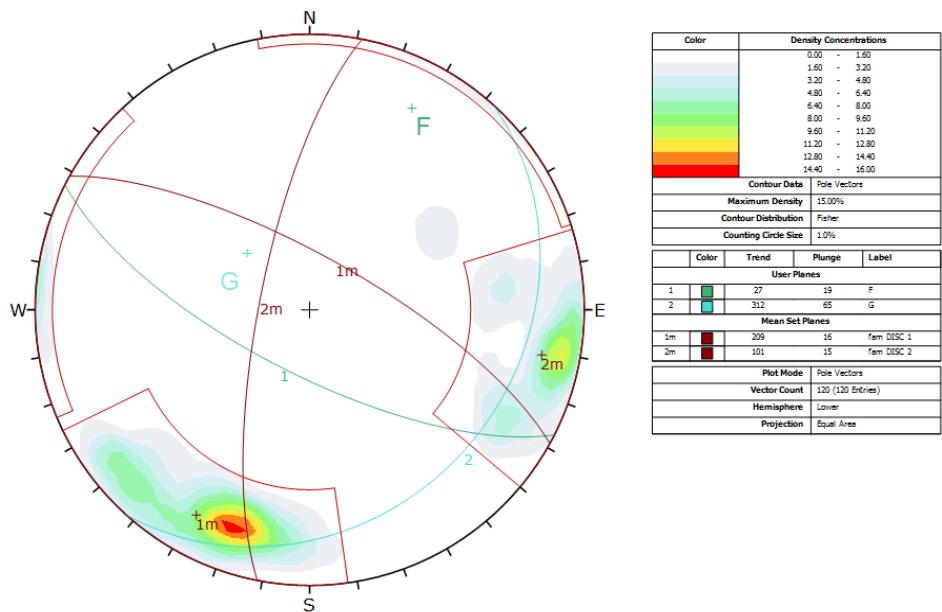


FIGURA 2-3 FORI DI SONDAGGIO

Tali angoli sono stati riportati in Tabella 2-3.

Risultano quindi necessarie tali inclinazioni per avere sulla medesima retta il foro di sondaggi e la famiglia di discontinuità.

TABELLA 2-3 ANGOLO DI INTERSEZIONE SONDAGGIO - DISCONTINUITÀ

Definizione angolo	[°]
F - 1	144.99
F - 2	71.57
G - 1	82.10
G - 2	97.81

### 2.3.5 Determinazione spaziature corrette

La spaziatura corretta è calcolata tramite semplice operazione goniometrica:

$$S_{corr,i} = S_i \cdot \cos(\theta_i)$$

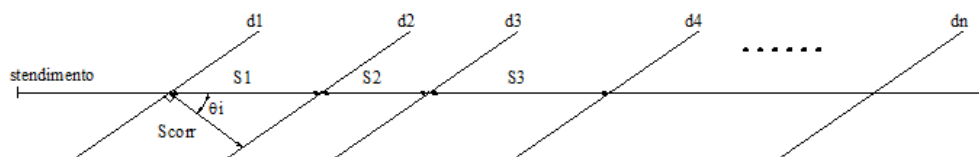


FIGURA 2-4 DISCONTINUITÀ

Il calcolo per una famiglia di giaciture sarebbe da effettuarsi per ogni singola discontinuità; tale operazione è però di difficile applicazione, quindi si preferisce mediare la spaziatura delle due famiglie e moltiplicarle per l'inclinazione media restituita da Dips sottratta a 90 gradi come si può determinare dalla Figura 2-4.

I risultati sono riportati in Tabella 2-4 Spaziatura corretta.

Le discontinuità appartenenti ad una particolare famiglia vengono automaticamente evidenziate una volta costruite le due aree di discontinuità principali, (Figura 2-2 curve di iso-densità di poli) è quindi facile determinare la media ordinando i risultati tramite semplice comando

TABELLA 2-4 SPAZIATURA CORRETTA

	Spaziatura media[mm]	Inclinazione[°]	Spaziatura corretta [mm]
<b>Fam.1</b>	3239	74	3114
<b>Fam.2</b>	2727	75	2634

### 2.3.6 Numerosità campione

La numerosità delle discontinuità da rivelare per mantenere un errore del 20% e una confidenza del 95% si determina tramite la seguente formula, sfruttando il teorema del limite centrale:

$$N \geq \frac{z^2}{\varepsilon^2}$$

Ove: N = numerosità campione

z = distribuzione normale della percentuale (se il livello di confidenza è pari al 95% z risulta essere 1.96)

ε= grado di errore 0.2

N risulta quindi essere pari a 96.

## 3 ° Consegna

### 3.1 Presentazione problematica

Eeguire il Test di Markland per verificare il potenziale scivolamento planare, scivolamento tridimensionale, ribaltamento flessionale e ribaltamento a blocchi di eventuali cunei individuati dai sistemi di discontinuità più numerosi ottenuti dall'Consegna 2 e dai due sistemi rappresentati nella tabella sottostante rilevati in un secondo tempo.

### 3.2 Risoluzione

In Tabella 3-1 sono riportate le due nuove famiglie (Q1 e Q2) insieme all'inclinazione delle due famiglie precedentemente determinate in Tabella 2-4.

Tabella 3-1 Famiglie discontinuità

Famiglia	Dip	Dip Direction
<b>F1</b>	74	29
<b>F2</b>	75	281
<b>Q1</b>	55	154
<b>Q2</b>	49	301
<b>Fronte</b>	80	150

L'angolo d'attrito è dato pari a  $\phi = 30^\circ$ .

Per il test di Markland sono necessari i dati qui sopra riportati trattandosi di sola verifica della geometria delle discontinuità.

Un determinato fenomeno (planare/tridimensionale/a blocchi/ flessionale) si potrebbe avverare quando si riscontrano tutti i parametri che ne caratterizzano il moto. Per quanto riguarda le verifiche numeriche a scivolamento planare (3.2.1) e tridimensionale (3.2.2), essendo di facile determinazione, viene di seguito riportata.

#### 3.2.1 Scivolamento planare

La verifica a scivolamento planare consiste nel verificare:

1. Nel verificare l'uguaglianza fra la direzione di immersione della discontinuità e quella del versante con un incertezza di  $20^\circ$   $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$
2. Un inclinazione della discontinuità minore del versante  $\psi_p < \psi_f$
3. Un angolo d'attrito dell'ammasso minore dell'inclinazione della discontinuità  $\psi_p > \phi_p$

Impostando su Dips tale verifica si ottiene il seguente risultato Figura 3-1.

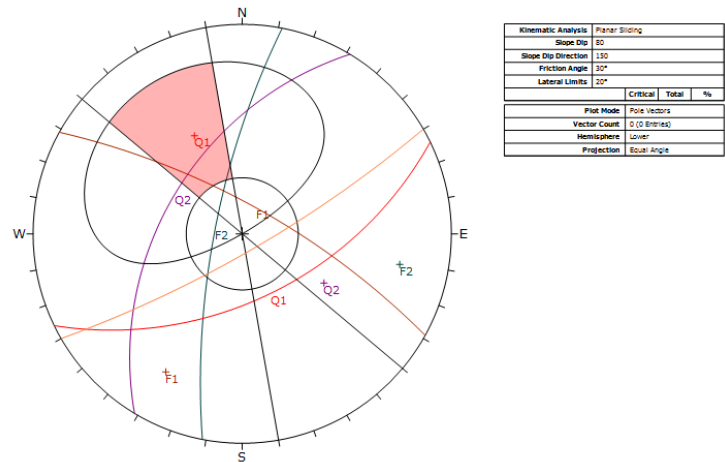


FIGURA 3-1 VERIFICA GRAFICA SCIVOLAMENTO PLANARE

L'angolo d'attrito determina il raggio della circonferenza centrale, la direzione d'immersione del versante determina l'angolazione del cono mentre l'inclinazione ne determina l'estremo superiore.

La verifica numerica delle condizioni 1,2,3 è riportata in Tabella 3-2

TABELLA 3-2 VERIFICA NUMERICA SCIVOLAMENTO PLANARE

	Condizione1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento planare
F1	$\alpha_A = \alpha_F \pm 20^\circ$	$\psi_A < \psi_F$	$\psi_A > \phi$	Si verifica?
	Non verificata	Verificata	Verificata	No
	Condizione1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento planare
F2	$\alpha_A = \alpha_F \pm 20^\circ$	$\psi_A < \psi_F$	$\psi_A > \phi$	Si verifica?
	Non verificata	Verificata	Verificata	No
	Condizione1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento planare
Q1	$\alpha_A = \alpha_F \pm 20^\circ$	$\psi_A < \psi_F$	$\psi_A > \phi$	Si verifica?
	Verificata	Verificata	Verificata	Si
	Condizione1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento planare
Q2	$\alpha_A = \alpha_F \pm 20^\circ$	$\psi_A < \psi_F$	$\psi_A > \phi$	Si verifica?
	Non verificata	Verificata	Verificata	No

La verifica matematica e grafica riportano, quindi, il medesimo risultato.

Lo scivolamento planare nelle condizioni precedentemente stabilite si verifica sulla discontinuità Q1, ove quindi vi potrà avvenire un cinematismo di questo tipo.

### 3.2.2 Scivolamento tridimensionale

Si verifica quando due sistemi di discontinuità si intersecano lungo una retta, in tal caso, si devono verificare le stesse condizioni dello scivolamento planare. Dovrà semplicemente variare solo il primo punto delle tre verifiche sopra definite (paragrafo 3.2.1), al cui posto è necessario accertare che la differenza in valore assoluto, del trend di inclinazione e dell'angolo di immersione del fronte, sia compresa entro  $90^\circ$ .

In formula  $|\alpha_i - \alpha_f| < 90^\circ$ .

La verifica numerica delle nuove condizioni è riportata in Tabella 3-3

TABELLA 3-3 VERIFICA NUMERICA SCIVOLAMENTO CUNEO

F1		F2		Intersezione I		Condizione 1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento 3D
$\psi_A$	$\alpha_A$	$\psi_B$	$\alpha_B$	$\psi_I$	$\alpha_I$	$ \alpha_I - \alpha_F  < 90^\circ$	$\psi_F > \psi_I$	$\psi_I > \phi$	Si verifica?
74	29	75	281	64	336	Non verificata	Verificata	Verificata	No
F1		Q1		Intersezione I		Condizione 1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento 3D
74	29	55	154	41	103	Verificata	Verificata	Verificata	Sì
F1		Q2		Intersezione I		Condizione 1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento 3D
74	29	49	301	47	317	Non verificata	Verificata	Verificata	No
F2		Q1		Intersezione I		Condizione 1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento 3D
75	281	55	154	42	205	Verificata	Verificata	Verificata	Sì
F2		Q2		Intersezione I		Condizione 1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento 3D
75	281	49	301	29	2	Non verificata	Verificata	Non verificata	No
Q1		Q2		Intersezione I		Condizione 1	Condizione 2	Condizione 3	Scivolamento 3D
55	154	49	301	20	229	Verificata	Verificata	Non verificata	No

La verifica su Dips rivela graficamente i medesimi risultati, Figura 3-2.

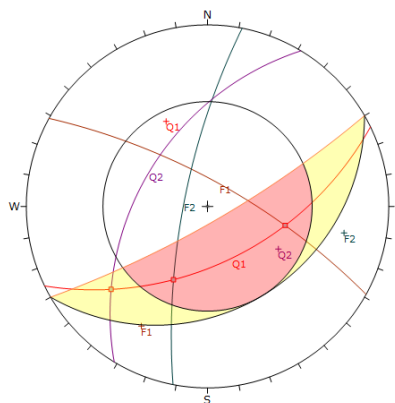


FIGURA 3-2 VERIFICA GRAFICA SCIVOLAMENTO A CUNEO

Le intersezioni Q1-F2 e Q1-F1 hanno un possibile cinematismo lungo l'intersezione, l'intersezione Q1-Q2 potrebbe sviluppare il cinematismo lungo una delle due discontinuità, come riportato in letteratura.

Il ribaltamento flessionale e il ribaltamento a blocchi sono determinati per semplice via grafica.

### 3.2.3 Ribaltamento flessionale

La verifica a ribaltamento flessionale non presenta alcuna discontinuità con tali caratteristiche, Figura 3-3

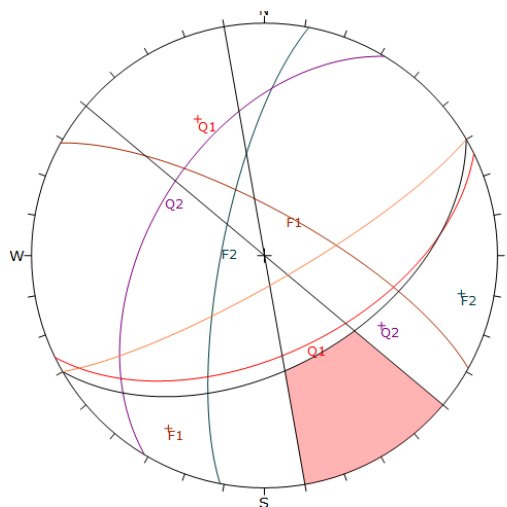


FIGURA 3-3 RIBALTAMENTO FLESSIONALE

### 3.2.4 Ribaltamento a blocchi

La verifica a ribaltamento a blocchi mostra un possibile cinematismo delle discontinuità F1-Q2, F1-F2 Figura 3-4

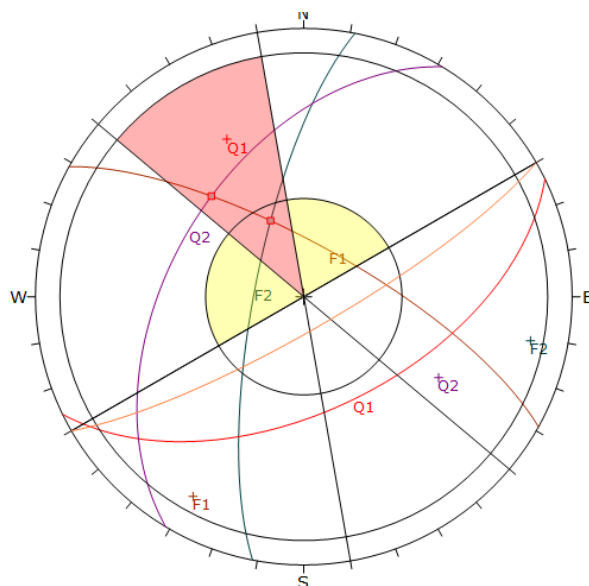


FIGURA 3-4 RIBALTAMENTO A BLOCCHI

### 3.3 Conclusioni

Non sono note le spaziature medie delle discontinuità Q1 e Q2 ma, trattandosi dello stesso ammasso roccioso, si può ipotizzare una spaziatura di circa 3 m, non molto distante dalle due determinate in Tabella 2-4. Secondo i test di Markland, si possono quindi determinare dei blocchi di dimensioni massime di 27 m<sup>3</sup>, ipotizzando i lati di 3x3x3 m, inoltre si potrebbero verificare dei cinematismi, riguardanti la sola famiglia di discontinuità Q1.

Sarà bene, se verificato da successivi test, effettuare degli interventi attivi quali tiranti, chiodi e reti a ridosso della parete in corrispondenza di tale discontinuità, così da scongiurare ogni possibile moto.

## 4 ° Consegna

In riferimento al fronte individuato nella 3° Consegna e alle famiglie che il test di Markland individua come potenzialmente instabili, calcolare i fattori di sicurezza:

1. Di picco utilizzando il criterio di resistenza di Barton;
2. Residuo utilizzando il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb nel caso di coesione nulla;
3. Residuo utilizzando il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb nel caso di coesione non nulla.

I dati del problema sono riassunti nella tabella seguente:

TABELLA 4-1 DATI DEL PROBLEMA

$H=17\text{ m}$	Altezza del pendio	$\beta = 55^\circ$	Inclinazione discontinuità
$X = 7\text{ m}$	Distanza discontinuità superiore	$\alpha = 80^\circ$	Inclinazione pendio
$JCR = 11$	Coefficiente di scabrezza	$\gamma = 2.6\text{ t/m}^3$	Peso specifico dell'ammasso roccioso
$JCS = 4470\text{ t/m}^2$	Resistenza alla compressione	$\gamma_w = 0.997\text{ t/m}^3$	Peso specifico dell'acqua

È inoltre fornita la prova di compressione triassiale (Tabella 4-2)

TABELLA 4-2 PROVA TRIASSIALE

$\sigma^3$ [kPa]	$\sigma^1$ [kPa]
5	208.736
10	222.805
15	236.875
20	250.945

È fatta richiesta, inoltre, di un'analisi parametrica che studi l'andamento del Fattore di Sicurezza al variare di:

1. Altezza del fronte  $H$  (tra 10 e 30 metri);
2. Inclinazione del fronte  $\beta$  ( $\beta \pm 10^\circ$ );
3. Posizione del tension crack,  $X$  ( $X \pm 7\text{ m}$ );
4. Altezza idrica all'interno del tension crack,  $h$  (tra 0 e  $h(x=7\text{ m})$ ) ipotizzando il pendio completamente saturo.



## Determinazione fattori comuni

Il pendio è schematizzato secondo Figura 4-1.

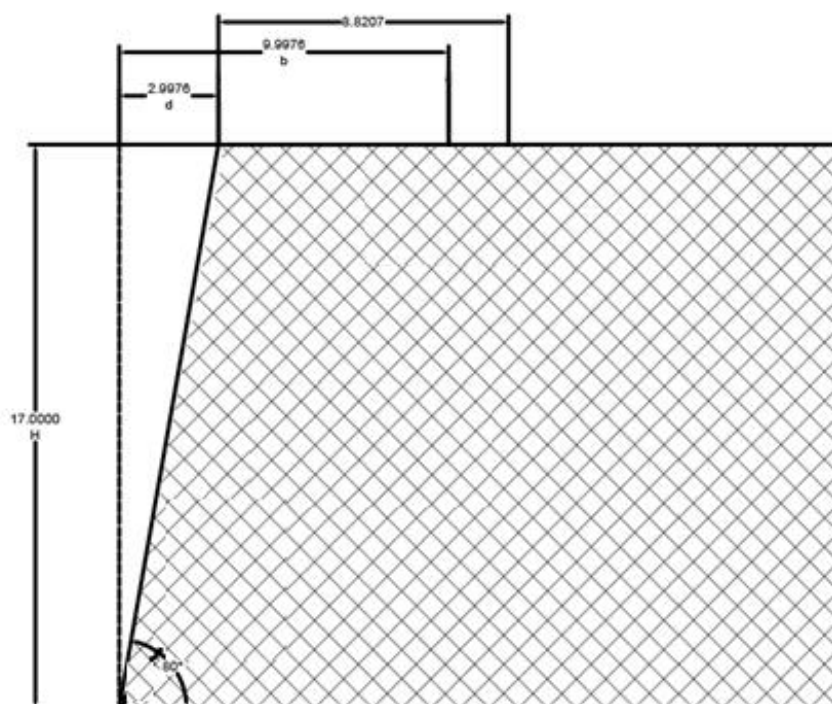


FIGURA 4-1 SCHEMA PENDIO

Il criterio di Mohr-Culomb e quello di Barton si basano sui fattori  $\phi$  e  $c$  determinabili tramite costruzione del grafico  $s/t$ , definiti in Tabella 4-3. Considerando che:

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Risultano quindi:

TABELLA 4-3 PARAMETRI S-T

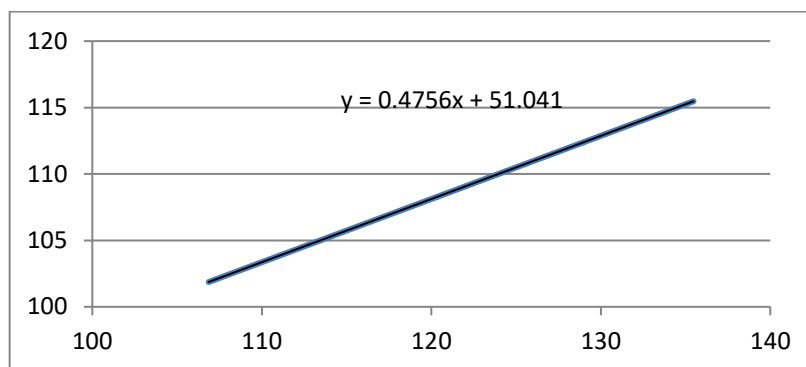
$s$ [KPa]	$t$ [KPa]
106.8679	101.8679
116.4027	106.4027
125.9375	110.9375
135.4724	115.4724

Da semplici considerazioni geometriche si evince che:

- $b$ , base del cuneo risulta pari a 9.99 m, somma della discontinuità superiore ( $x = 7.000$  m) e distanza dalla verticale dovuta all'inclinazione del fronte ( $d = 2.99$  m)
- $z$ , lunghezza sulla verticale della discontinuità superiore pari a 2.51 m

Plottati si determina l'intercetta e la pendenza presenti in Figura 4-2.

FIGURA 4-2 PLOT S-T



$\varphi_r$  e  $c$  si possono definire tramite formula :

$$\varphi_r = \arcsen(\tan \alpha) = 0.541 \text{ [rad]}$$

$$c = a/\cos(\phi) = 59.54611 \text{ [kPa]}$$

Ove:

a intercetta della retta = 51.04

$\alpha$  pendenza della retta = 0.47

## 4.1 Fattore di sicurezza, criterio di Barton

Il criterio di Barton consiste nel sommare all'angolo di attrito dei coefficienti legati alla scabrezza dell'ammasso roccioso e all'attrito che si forma nella discontinuità, in formula:

$$\varphi_p = \varphi_r + JRC \cdot \text{Log} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)$$

Ove:

- $\varphi_r$  angolo di resistenza al taglio pari a 0.54 [rad]
- JRC coef. di scabrezza pari a 11
- JCS resistenza alla compressione pari a 4470 t/m<sup>2</sup>
- $\sigma_n$  sforzo normale alla discontinuità

Lo sforzo normale è considerabile pari al rapporto del peso del cuneo in scivolamento sull'area interessata dal

$$\text{moto: } \sigma_n = \frac{W \cdot \cos \alpha}{A} = \frac{W \cdot \cos \alpha}{1 \cdot b / \cos \alpha} = \frac{W \cdot \cos^2 \alpha}{1 \cdot b} = 190.08 \text{ t}$$

Risulta, quindi:  $\varphi_p = 62.39^\circ$

- $\tau_{stab} = \sigma_n \tan \varphi_p$
- $\tau_{dest} = \sigma_n \tan \alpha$

Secondo l'ultima normativa il pendio è definito stabile quando il rapporto fra le forze stabilizzanti e destabilizzanti è maggiore dell'unità, data l'incertezza intrinseca delle misure viene qui, e nei capitoli successivi, considerato stabile ove il rapporto è almeno pari a 1.3.

$$FS = \frac{\sigma_n \tan \varphi_p}{\sigma_n \tan \alpha} = \frac{\tan \varphi_p}{\tan \alpha} = 1.34$$

Il pendio per il criterio di Barton risulta stabile.

## 4.2 Fattore di sicurezza, criterio di Mohr, coesione nulla

Il criterio di Mohr confronta in modo diretto il rapporto fra le tangenti degli angoli d'attrito e l'inclinazione del pendio, esso risulta pari a:

$$FS = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} = 0.42$$

Il pendio, non considerando la coesione, secondo il criterio di Mohr, risulta instabile.

## 4.3 Fattore di sicurezza, criterio di Mohr, coesione non nulla

Il valore della coesione è stato determinato al capitolo "Determinazione fattori comuni".

$$c = 59.55 \text{ [kPa]}$$

La determinazione del fattore di sicurezza è quindi determinabile grazie alla formula:

$$FS = \frac{cA + W \cos \alpha \cdot \tan \varphi}{W \sin \alpha} = 1.09$$

Secondo quanto sopra riportato il pendio risulta instabile.

Confrontando i due criteri, si può notare come il considerare o meno la coesione comporta un aumento (o riduzione) di circa il doppio del fattore di sicurezza.

## 4.4 Determinazione parametrica del fattore di sicurezza

Nella determinazione parametrica del fattore FS, è stata aggiunta la presenza di un tension crack, di una fessura sub-verticale e di una secante il piede del pendio, secondo Figura 4-3.

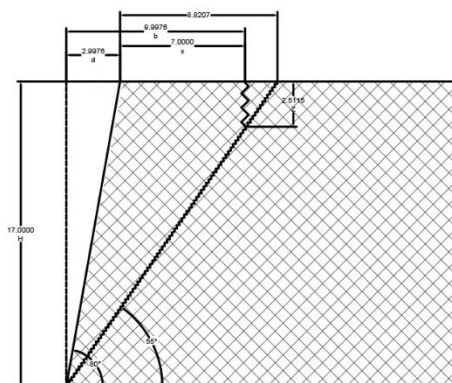


FIGURA 4-3 SCHEMA PENDIO CON TENSION CRACK

La presenza del tension crack comporta una riscrittura dei parametri di sicurezza, per il criterio di Mohr; il criterio di Barton non prevede la possibilità di aggiungere tale variabile.

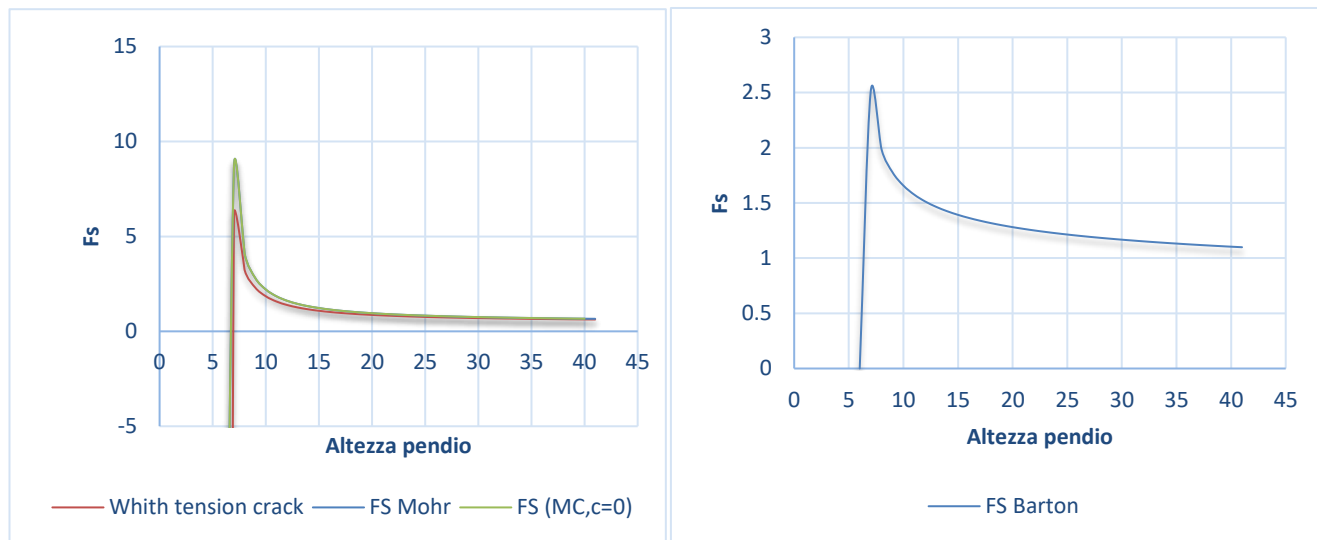
$$FS = \frac{cA + [W \cos \alpha - U - V \cdot \sin \alpha] \tan \varphi}{W \sin \alpha + V \cdot \cos \alpha}$$

Ove non è fattore variabile il tension crack è considerato di dimensioni pari a:

- $z = 2.51$  m altezza della fessura verticale
- $x = 7$  m distanza dal fronte del pendio
- $\beta = 55^\circ$  angolo inclinazione discontinuità

#### 4.4.1 Variazione altezza pendio

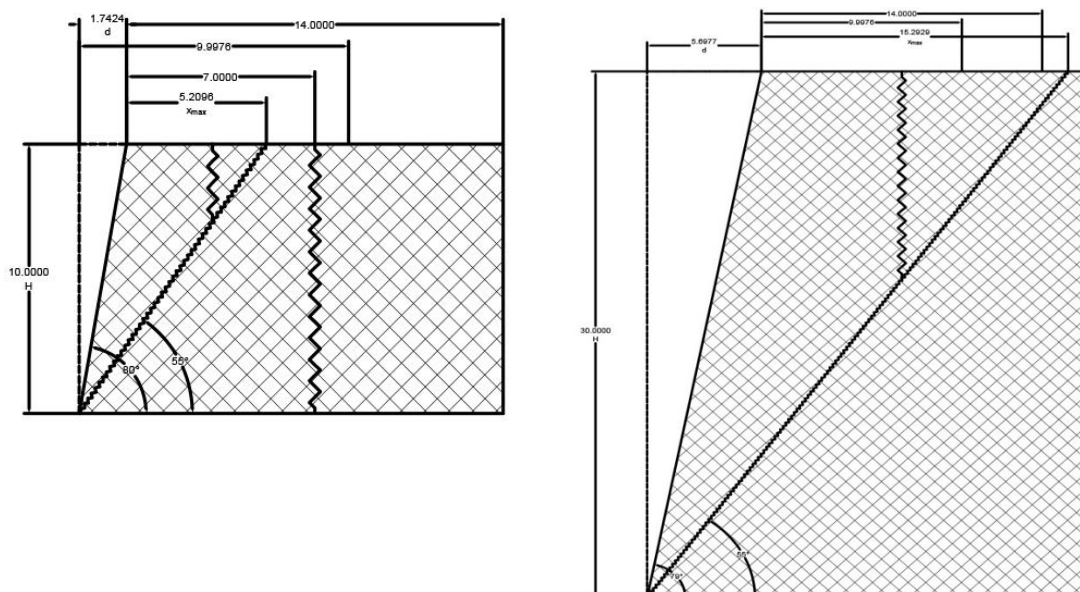
Considerando costanti le altre variabili, il criterio di Barton definisce stabile il pendio sino ad una altezza di 18 m. Per il criterio di Mohr, invece, fino a 12 m.

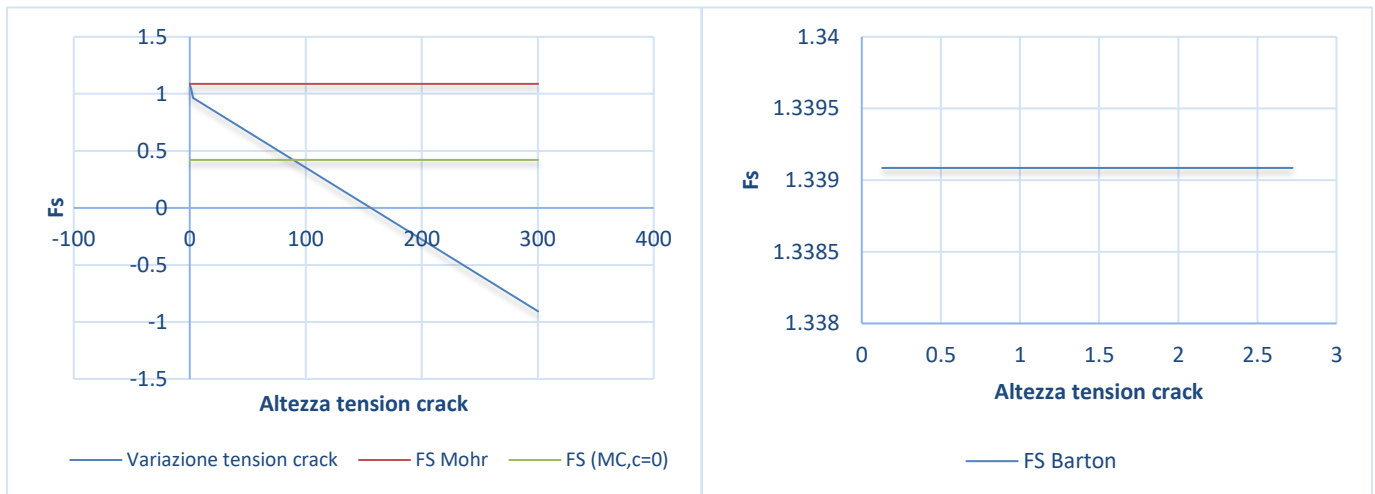


Variando l'altezza del pendio non si giunge mai ad un minimo, il fattore di sicurezza tende a zero per il criterio di Mohr mentre per il criterio di Barton, tende a meno infinito.

#### 4.4.2 Variazione altezza tension crack

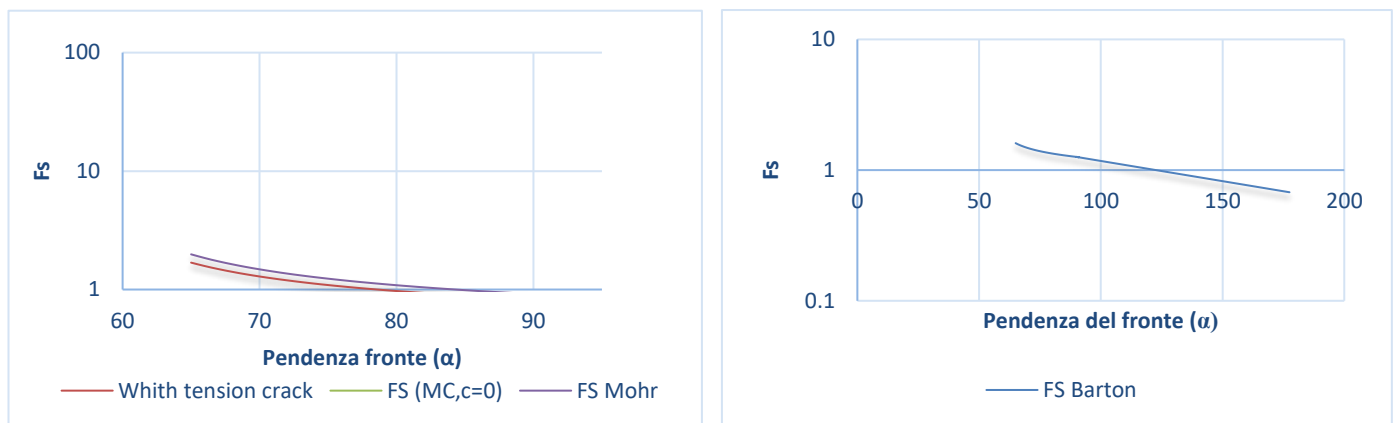
L'altezza del tension crack è la quota del livello d'acqua all'interno della frattura.





Il pendio non risulta mai stabile, variando l'altezza del tension crack secondo il criterio di Mohr.

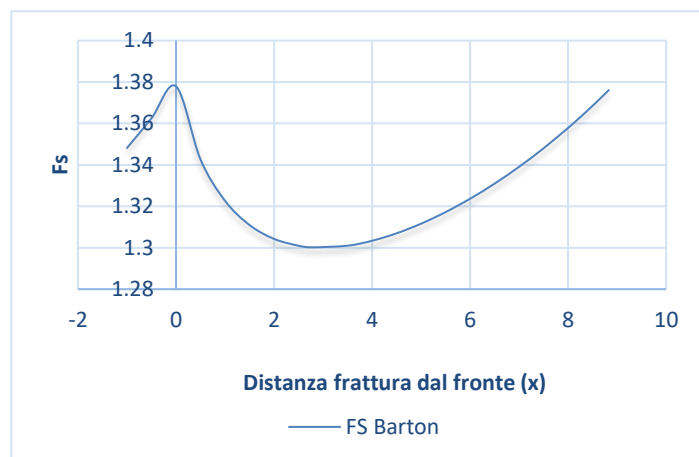
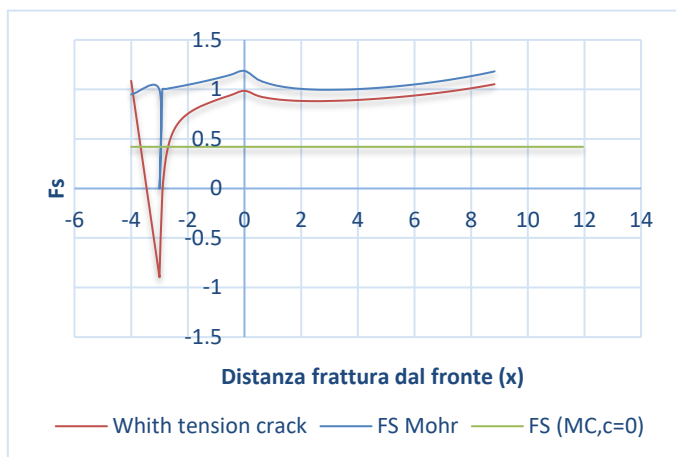
#### 4.4.3 Variazione pendenza del fronte



Per il criterio di Mohr il pendio ha fattore superiore a 1.30 fra i  $65^\circ$  e i  $69^\circ$ .

Per il criterio di Barton si può raggiungere anche gli  $84^\circ$ .

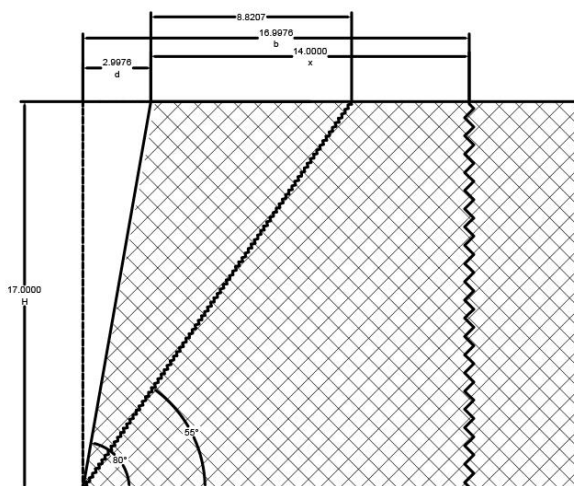
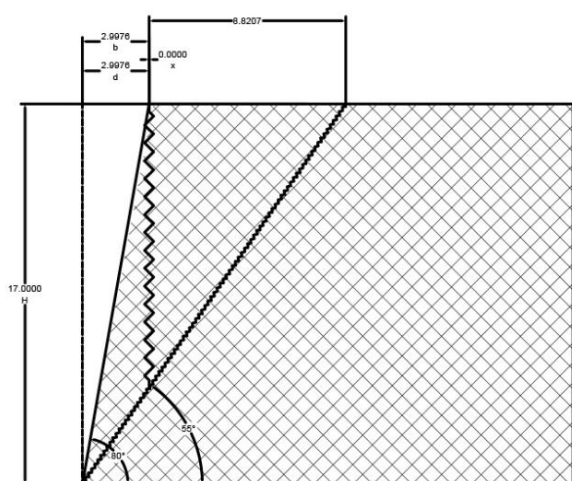
#### 4.4.4 Variazione distanza della frattura dal fronte



I valori minimi successivi al valore zero (prima, anche se fisicamente possibile, il terreno risulta fortemente al di sotto del fattore di sicurezza secondo il criterio di Mohr) risultano: per il criterio di Mohr pari a  $x=2.5$  con  $F_s = 0.88$ ; per il criterio di Barton il minimo si trova a  $x= 2.77$  con  $F_s= 1.30$ .

Per il criterio di Barton il pendio è sempre stabile per qualunque valore di  $x$  compreso fra 0 e 8.8 [m]

Per il criterio di Mohr il pendio risulta stabile solo quando  $x$  è maggiore o uguale a 11.95 m (il che significherebbe avere il tension crack non secante la discontinuità, condizione non prevista nelle ipotesi iniziali).



## 4.5 Conclusioni

Il criterio di Barton non considera la presenza del tension crack, come già sopra accennato. Nei grafici sono stati riportati comunque sempre entrambi i grafici per confermare tale affermazione e avere comunque un possibile confronto.

Si noti invece che per il punto 4.4.4 il fattore varia fra i valori 1.3 e 1.38, quindi si può approssimare costante. Tale fluttuazione, per precisare, è dovuta alla determinazione geometrica del valore di  $b$  (distanza fra il piede del pendio e il punto della frattura) quest'ultimo punto variando, modifica il parametro  $b$  e quindi con esso il peso e l'area della discontinuità e indefinitiva il valore di  $\sigma_n$ . Essendo sotto logaritmo, secondo il criterio di Barton (Fattore di sicurezza, criterio di Barton) tale valore viene smorzato, da cui la bassa fluttuazione.

In Tabella 4-4 è riportato un riassunto delle possibili combinazioni delle variabili oggetto di studio.

TABELLA 4-4 VERIFICA FATTORE DI SICUREZZA

<i>Fattore variabile</i>	<i>Range verificato</i>			
	<b>Criterio di Mohr [coesione nulla]</b>	<b>Criterio di Mohr [coesione non nulla]</b>	<b>Criterio di Mohr [Tension crack]</b>	<b>Criterio di Barton</b>
<b>Altezza del pendio [m]</b>	Mai verificato	7-14	7-12	7-18
<b>Altezza tension crack [m]</b>	Mai verificato	Mai verificato	Mai verificato	Sempre verificato
<b>Pendenza del fronte [°]</b>	Mai verificato	65-73	65-69	65/84
<b>Distanza frattura dal fronte [m]</b>	Mai verificato	Oltre gli 11.95	Oltre gli 11.95	-2.9/14

Nelle condizioni standard il pendio risulta instabile per il criterio di Mohr mentre per il criterio di Barton risulta stabile.

## 5 ° Consegna

In riferimento al fronte individuato nell'Consegna 3 e alle famiglie che il test di Markland individua come potenzialmente instabili, determinare i fattori di sicurezza di tutti i possibili cinematismi tridimensionali.

Considerare inoltre la posizione di due possibili tension crack, rispettivamente di coordinate 40/026 e 42/275 e una tensione normale media agente sui piani di 0.68 MPa.

Valutare il fattore di sicurezza, con il criterio di Barton e con il criterio di Mohr-Coulomb, delle famiglie di discontinuità considerando per ciascun caso il tension crack che maggiormente influenza la stabilità del versante.

### 5.1 Risoluzione discontinuità tridimensionale semplice

Si ipotizzino la disposizione delle discontinuità come da Figura 5-1.

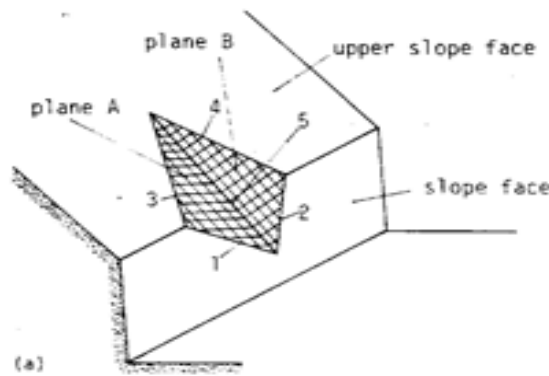


FIGURA 5-1 RAPPRESENTAZIONE DELLA ROTTURA TRIDIMENSIONALE

La verifica del fattore di sicurezza si basa sulla determinazione della massa del cuneo in movimento. Tale verifica è determinabile a partire dalla proiezione stereografica delle discontinuità e alla definizione degli angoli che intercorrono fra le varie intersezioni.

Angoli d'intersezione, peso specifico e altezza massima del cuneo (Tabella 5-1 e Tabella 5-2) sono i valori necessari a determinare il fattore di sicurezza, riportato nella seguente formula:

$$F_s = \frac{3}{\gamma H} (c_A X + c_B Y) + \left( A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X \right) \tan \phi_A + \left( B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y \right) \tan \phi_B$$

I valori X,Y,A,B risultano pari a:

$$X = \frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cdot \cos \theta_{2na}}$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} \cdot \cos \theta_{1nb}}$$

$$A = \frac{\cos \Psi_a - \cos \Psi_b \cos \theta_{na-nb}}{\sin \Psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na-nb}}$$

$$B = \frac{\cos \Psi_b - \cos \Psi_a \cos \theta_{na-nb}}{\sin \Psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na-nb}}$$



Le famiglie di discontinuità da controllare risultano essere: F1-Q1 e F2-Q1 le cui coordinate sono riportate in Tabella 5-1.

TABELLA 5-1 RIASSUNTO DISCONTINUITÀ IN ESAME

	$\psi$ (gradi)	$\alpha$ (gradi)
<b>fronte F</b>	80	150
<b>piano sup S</b>	0	150
<b>F1</b>	74	29
<b>F2</b>	75	281
<b>Q1</b>	55	154

Altri fattori in comune alle varie verifiche sono riportati in Tabella 5-2.

TABELLA 5-2 FATTORI COMUNI

$\phi_A$	30	gradi
$\phi_B$	30	gradi
$\gamma$	26	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	10	kN/m <sup>3</sup>
<b>H</b>	17	m
<b>c<sub>A</sub></b>	60.7	kPa
<b>c<sub>B</sub></b>	60.7	kPa

La determinazione del fattore di sicurezza si basa su due criteri, quello di Mohr e quello di Barton, in entrambi i casi si è effettuato il calcolo sia in presenza che in assenza di acqua.

Se il criterio di Mohr consiste nella semplice risoluzione dell'equazione sopra riportata, per il criterio di Barton si dovrà effettuare una correzione per quanto riguarda l'angolo di resistenza, secondo la seguente formula:

$$\varphi_p = \varphi_r + JRC \cdot \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)$$

Ove:

- $\varphi_r$  angolo di resistenza al taglio pari a 30°
- $\sigma_n$  da testo pari a 0.68 MPa
- JRC e JCS sono riportati in Tabella 4-1

$\varphi_p$  è quindi pari a 46.44°.

### 5.1.1 Discontinuità F1-Q1

Dalla rappresentazione stereografica riportata in Figura 5-2 si determina la serie di angoli riportati in Tabella 5-3.

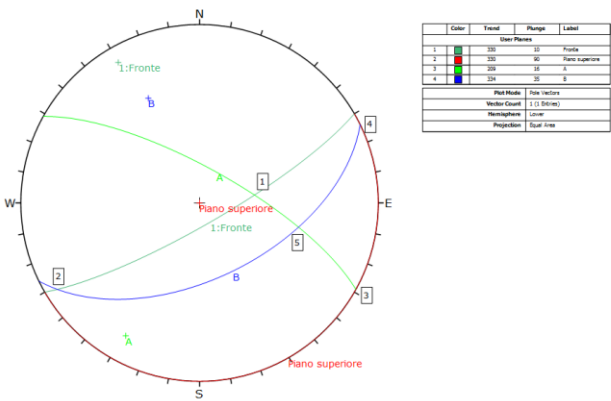


FIGURA 5-2 STEREOGRAFIA DELLE DISCONTINUITÀ F1-Q1

TABELLA 5-3 ANGOLI DI INTERSEZIONE DISCONTINUITÀ F1- Q1

	gradi [°]
$\theta_{2nA}$	30.7
$\theta_{45}$	55.3
$\theta_{24}$	170.79
$\theta_{13}$	69.51
$\theta_{35}$	44.12
$\theta_{1nB}$	66.14
$\theta_{nAnB}$	108.32
$\psi_A$	74
$\psi_B$	55
$\psi_5$	47

I valori X,Y,A,B risultano, seguendo le formule riportate al capitolo 5.1, pari a:

TABELLA 5-4 VALORI PER DETERMINAZIONE FS

X	Y	A	B
0.226	3.326	0.692	1.002

#### Risultati

Nella tabella seguente sono riportati i risultati numerici dei vari criteri in presenza o assenza d'acqua.

Criterio di Mohr	
FS	2.44
FS con H2O	2.04
Criterio di Barton	
FS	3.24
FS con H2O	2.53

In presenza di acqua, per tutti e due i criteri sussiste una riduzione del fattore di sicurezza circa pari a 1.3 il rapporto fra i due casi.

In ambo le casistiche il fattore è verificato.

### 5.1.2 Discontinuità F2-Q1

Dalla rappresentazione stereografica riportata in Figura 5-3 si determina la serie di angoli riportati in Tabella 5-5.

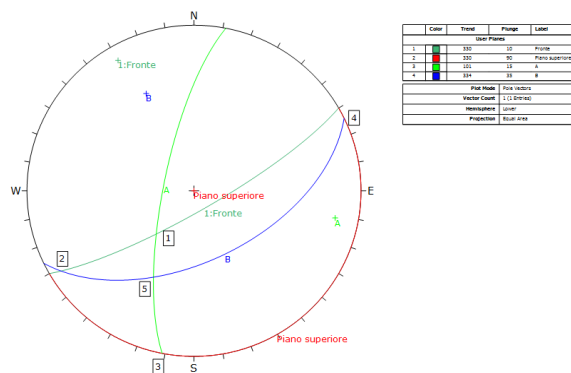


FIGURA 5-3 STEREOGRAFIA DELLE DISCONTINUITÀ F2-Q1

TABELLA 5-5 ANGOLI DI INTERSEZIONE DISCONTINUITÀ F2- Q1

	gradi [°]
$\theta_{2nA}$	132.44
$\theta_{45}$	125.32
$\theta_{24}$	170.79
$\theta_{13}$	65.45
$\theta_{35}$	43.2
$\theta_{1nB}$	70.61
$\theta_{nAnB}$	111.1
$\psi_A$	75
$\psi_B$	55
$\psi_5$	48

I valori X,Y,A,B risultano, seguendo le formule riportate al capitolo 5.1, pari a:

TABELLA 5-6 VALORI PER DETERMINAZIONE FS

X	Y	A	B
-0.291	4.002	0.719	1.031

#### Risultati

Nella tabella seguente sono riportati i risultati numerici dei vari criteri in presenza o assenza d'acqua.

Criterio di Mohr	
FS	2.54
FS <sub>con H2O</sub>	2.13
Criterio di Barton	
FS	3.37
FS <sub>con H2O</sub>	2.62

In presenza di acqua, per tutti e due i criteri sussiste una riduzione del fattore di sicurezza circa pari a 1.3 il rapporto fra i due casi.

In ambo le casistiche il fattore è verificato.

## 5.2 Risoluzione discontinuità tridimensionale con tension crack

Si ipotizza i piani e la disposizione delle discontinuità disposte come in Figura 5-4.

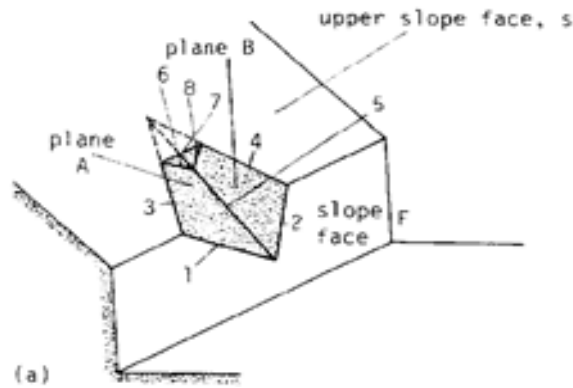


FIGURA 5-4 RAPPRESENTAZIONE DELLA ROTTURA TRIDIMENSIONALE CON FESSURA VERTICALE

Il fattore di sicurezza in presenza di tension crack ha la seguente equazione:

$$F_s = \frac{3}{\gamma H} (c_A X + c_B Y) + \left( A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X \right) \tan \phi_A + \left( B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y \right) \tan \phi_B - \frac{3}{\gamma z} (c_A X_1 + c_B Y_1)$$

$$X = \frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cdot \cos \theta_{2na}}$$

$$B = \frac{\cos \Psi_b - \cos \Psi_a \cos \theta_{na-nb}}{\sin \Psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na-nb}}$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} \cdot \cos \theta_{1nb}}$$

$$X_1 = \frac{\sin \theta_{48}}{\sin \theta_{45} \cdot \cos \theta_{2na}}$$

$$A = \frac{\cos \Psi_a - \cos \Psi_b \cos \theta_{na-nb}}{\sin \Psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na-nb}}$$

$$Y_1 = \frac{\sin \theta_{36}}{\sin \theta_{35} \cdot \cos \theta_{1nb}}$$

### 5.2.1 Discontinuità F1-Q1

Dalla rappresentazione stereografica riportata in Figura 5-2 si determina la serie di angoli riportati in Tabella 5-3.

Il tension crack costituente la stereografia come quella teorica ha coordinate 42/275.

TABELLA 5-7 DATI NECESSARI ALLA RISOLUZIONE DEL PROBLEMA

	$\psi$ (gradi)	$\alpha$ (gradi)
<b>fronte F</b>	80	150
<b>piano sup S</b>	0	150
<b>piano A</b>	74	29
<b>piano B</b>	55	154
<b>tension crack</b>	42	275

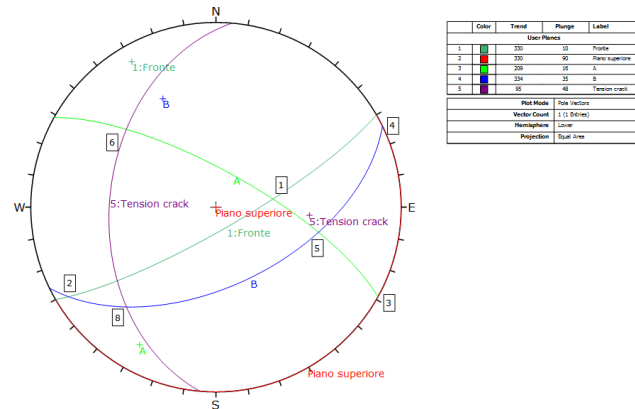


FIGURA 5-5 STEREOGRAFIA DELLE DISCONTINUITÀ F1-Q1

TABELLA 5-8 ANGOLI DI INTERSEZIONE DELLE DISCONTINUITÀ F1- Q1

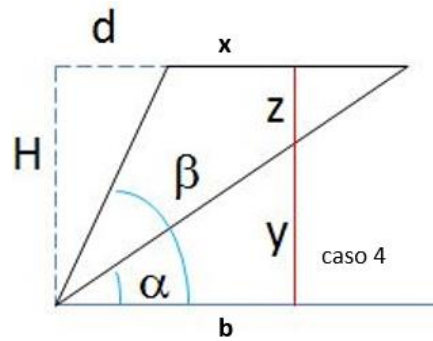
	gradi [°]
$\theta_{2nA}$	30.7
$\theta_{45}$	55.3
$\theta_{24}$	170.79
$\theta_{13}$	69.51
$\theta_{35}$	44.12
$\theta_{36}$	143.31
$\theta_{48}$	144.37
$\theta_{1nB}$	66.14
$\theta_{nAnB}$	108.32
$\psi_A$	74
$\psi_B$	55
$\psi_5$	47

I valori X,Y,A,B,X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub> risultano, seguendo le formule riportate al capitolo 5.2, pari a:

TABELLA 5-9 VALORI PER DETERMINAZIONE FS

X	Y	A	B	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>
0.226	3.326	0.692	1.002	0.824	2.122

Infine per la determinazione del fattore di sicurezza in presenza di tension crack è necessario determinare l'altezza della frattura. Essa è facilmente risolvibile applicando semplici leggi trigonometriche secondo tale figura:



$$z = H - \left[ x - \frac{H}{\tan(80^\circ)} \right] * \tan(42^\circ) = 8.00 \text{ m}$$

Risultato

Nella tabella seguente è riportato il valore del fattore di sicurezza residuo, cioè dopo l'applicazione del tension crack in presenza e assenza di acqua

Criterio di Mohr	
FS residuo	1.67
FS residuo con H <sub>2</sub> O	0.95

Per il criterio di Mohr in presenza di acqua il pendio risulta instabile, è bene applicare dei dreni.

### 5.2.2 Discontinuità F2-Q1

DALLA RAPPRESENTAZIONE STEREOGRAFICA RIPORTATA IN

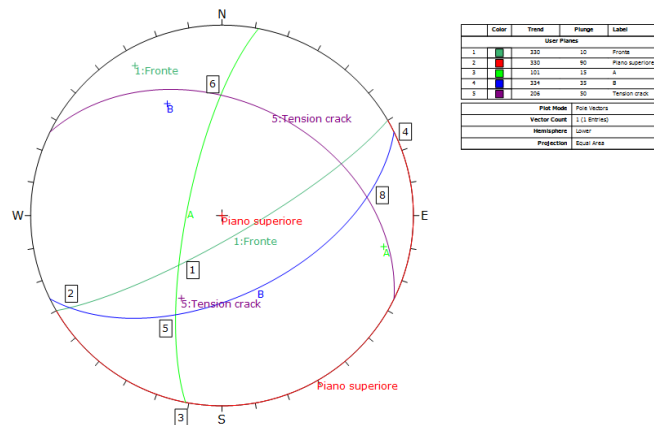


FIGURA 5-6 SI DETERMINA LA SERIE DI ANGOLI RIPORTATI IN

Tabella 5-11. Il tension crack costituente la stereografia come quella teorica ha coordinate 40/026.

TABELLA 5-10 DATI NECESSARI ALLA RISOLUZIONE DEL PROBLEMA

	$\psi$ (gradi)	$\alpha$ (gradi)
fronte F	80	150
piano sup S	0	150
piano A	74	29
piano B	55	154
tension crack	40	26

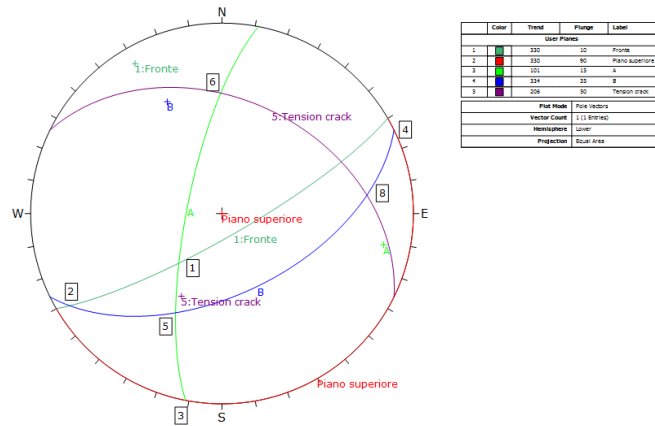


FIGURA 5-6 STEREOGRAFIA DELLE DISCONTINUITÀ F2-Q1

TABELLA 5-11 ANGOLI DI INTERSEZIONE DELLE DISCONTINUITÀ F2- Q1

	gradi [°]
$\theta_{2nA}$	132.44
$\theta_{45}$	125.32
$\theta_{24}$	170.79
$\theta_{13}$	65.45
$\theta_{35}$	43.2
$\theta_{36}$	141.37
$\theta_{48}$	150.32
$\theta_{1nB}$	70.61
$\theta_{nAnB}$	111.1
$\psi/A$	75
$\psi/B$	55
$\psi/5$	48

I valori X,Y,A,B,X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub> risultano, seguendo le formule riportate al capitolo 5.2, pari a:

TABELLA 5-12 VALORI PER DETERMINAZIONE FS

X	Y	A	B	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>
-0.291	4.002	0.719	1.031	-0.899	2.747

$$z = 8.30 \text{ m}$$

### Risultati

Nella tabella seguente è riportato il valore del fattore di sicurezza residuo, cioè dopo l'applicazione del tension crack in presenza e assenza di acqua

Criterio di Mohr	
FS residuo	1.84
FS residuo con H <sub>2</sub> O	1.09

Per il criterio di Mohr in presenza di acqua il pendio risulta instabile, è bene, quindi, applicare dei dreni.

## 5.3 Conclusioni

TABELLA 5-13 TABELLA RIASSUNTIVA

Tipo di discontinuità	Famiglie	Criterio di Mohr		Criterio di Barton	
		Senza acqua	Con acqua	Senza acqua	Con acqua
Semplice	F1-Q1	2.44	2.04	3.24	2.53
	F2-Q1	2.54	2.13	3.37	2.62
Con tension crack	F1-Q1	1.67	0.95		
	F2-Q1	1.84	1.09		

Si nota immediatamente come per il criterio di Barton le intersezioni fra le discontinuità sono sempre in condizioni di sicurezza.

Il criterio di Mohr d'altro canto evidenzia delle criticità in presenza d'acqua con il tension crack.

È quindi bene costituire dei dreni in modo da allontanare l'acqua o in alternativa applicare dei rinforzi così da ridurre l'effetto del tension crack.



## 6 ° Consegna

Da un rilievo topografico sono state individuate le coordinate dei punti che determinano la sezione di massima pendenza di un versante roccioso instabile, schematizzato in Figura 6-1.

Su tale sezione sono stati effettuate indagini al fine di individuare i materiali presenti e le caratteristiche degli stessi che sono sintetizzate in Tabella 6-1.

Effettuare l'analisi di caduta massi attraverso il software Rocfall e individuare una o più barriere paramassi a protezione della zona individuata nel disegno dalla freccia rossa e coincidente con il vertice 36.

Numero di blocchi: 1000

Condizioni iniziali:

- Velocità orizzontale: 2.5 m/s (std dev 0.2 m/s)
- Velocità verticale: 2 m/s (std dev 0.2 m/s)
- Massa blocchi: 2700 kg (std dev 540 kg)
- Velocità angolare: 0 rad/s (std dev 0 rad/s)

Point Seeder coincidente con il vertice 1.

### 6.1 Importazione dei dati

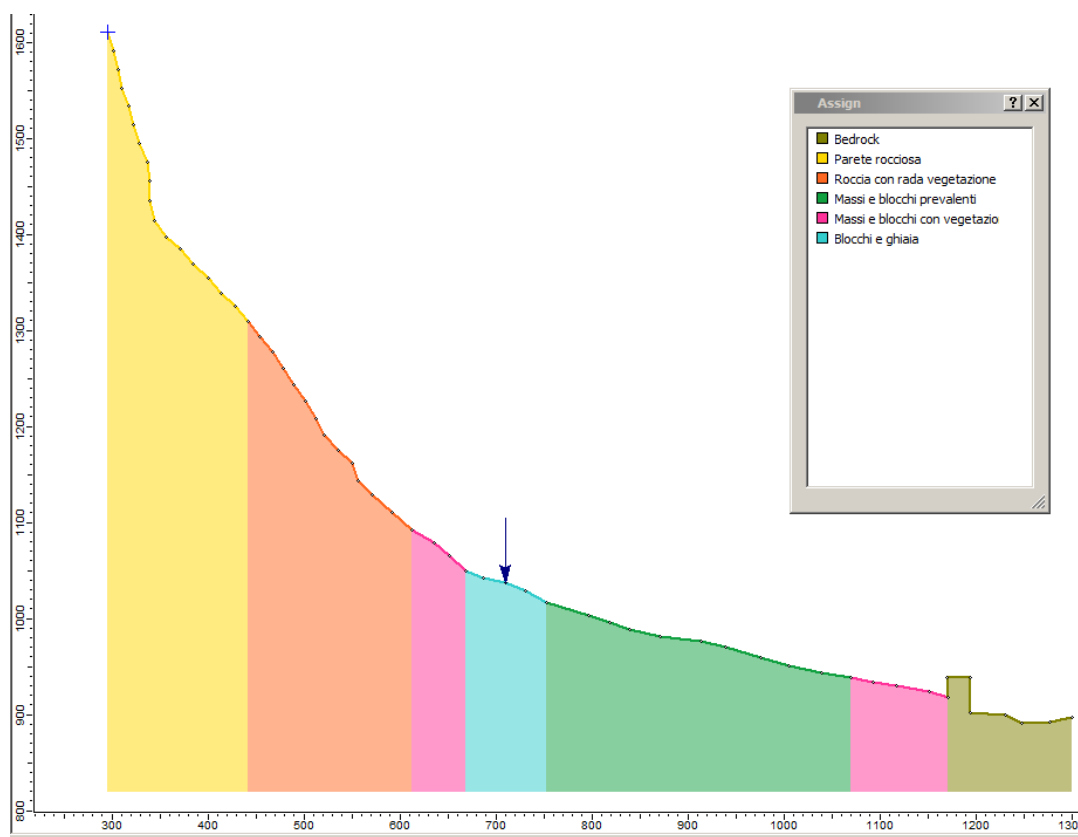








FIGURA 6-1 SCHEMATIZZAZIONE VERSANTE

TABELLA 6-1 DATI ESSENZIALI PER LA COSTITUZIONE DEL VERSANTE

Material Name	Color	Normal Restitution	Tangential Restitution	Friction Angle	Slope Roughness (deg)
Bedrock		Normal Mean: 0.53 Std Dev: 0.04 Rel. Min: 0.12 Rel. Max: 0.12	Normal Mean: 0.99 Std Dev: 0.003 Rel. Min: 0.009 Rel. Max: 0.009	Normal Mean: 30 Std Dev: 2 Rel. Min: 6 Rel. Max: 6	0
Parete rocciosa		Normal Mean: 0.5 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 0.8 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 38.66 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	0
Roccia con rada vegetazione arborea		Normal Mean: 0.35 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 0.65 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 33.02 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	0
Massi e blocchi prevalenti		Normal Mean: 0.32 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 0.65 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 34.99 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	0
Massi e blocchi con vegetazione arborea		Normal Mean: 0.2 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 0.4 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 38.66 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	0
Blocchi e ghiaia		Normal Mean: 0.3 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 0.6 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	Normal Mean: 28.81 Std Dev: 0.03 Rel. Min: 0.09 Rel. Max: 0.09	0

Il programma Rocfall, come qualsiasi altro programma di stabilità dei pendii, si basa sulla creazione di n scenari, definibili dall'utente, al cui interno i parametri variano leggermente l'uno dall'altro secondo le deviazioni standard impostate ad inizio simulazione. Oltre ai materiali costituenti il pendio, le "incertezze" sono anche da attribuire al peso del blocco lanciato e alla sua velocità, così da creare un fascio di possibili lanci e considerare ogni probabile scenario.

In Figura 6-2 e in Figura 6-3 sono riportati rispettivamente l'energia cinetica totale che si può realizzare a seguito di 1000 blocchi (in altrettanti scenari) e le altezze massime raggiunte globalmente dai blocchi.

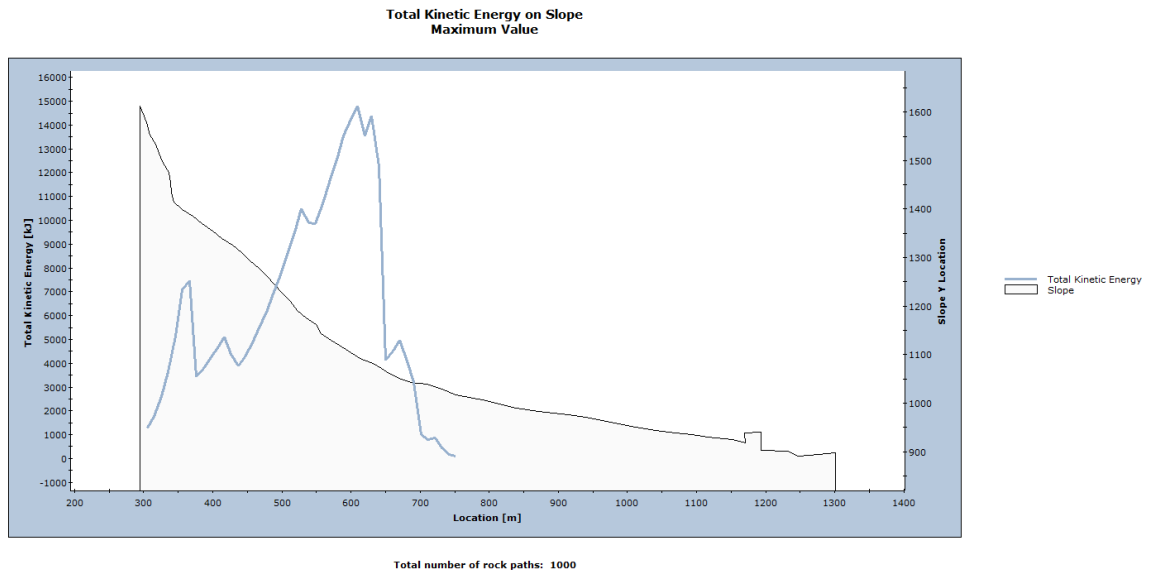


FIGURA 6-2 ENERGIA CINETICA TOTALE

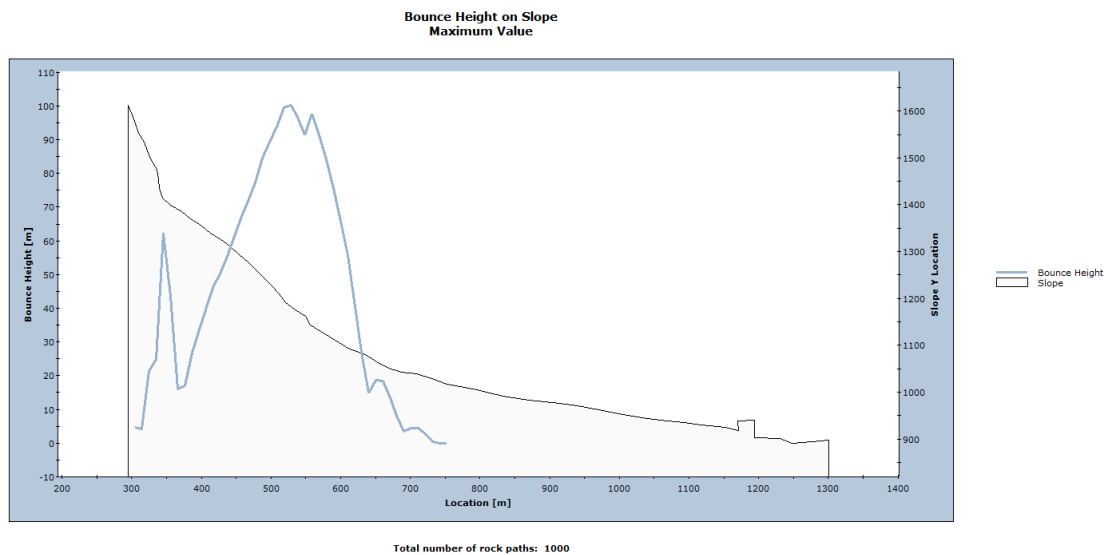


FIGURA 6-3 ALTEZZA MASSIMA DI RIMBALZO

Il punto da proteggere è circa a 710 m, nel sistema di riferimento locale.

La barriera è stata posta a 701 m così da evitare anche a seguito dell'impatto che parte di essa tocchi il punto d'interesse, a tale distanza si riscontrano i seguenti valori di energia ed altezza:

TABELLA 6-2 ENERGIA CINETICA E ALTEZZA DI RIMBALZO A 701 M

Distanza	Energia cinetica [kJ]	Rimbalzo massimo [m]
701.274	994.119	4.4

## 6.2 Costituzione della barriera

Dati i parametri appena determinati, la barriera più indicata è la TS-1500-ZD.

La scelta di un'unica barriera è stata ponderata secondo due parametri:

- Facilità di manutenzione, due barriere avrebbero bisogno se non il doppio della manutenzione di certo il doppio della supervisione.
- Accessibilità, posizionare la barriera quasi a ridosso del punto da proteggere, permette di aver il minor valore di energia cinetica e di altezza di rimbalzo e di essere più agilmente mantenuta.

La barriera scelta ha le seguenti caratteristiche, già implementate nel programma di simulazione:

TABELLA 6-3 CARATTERISTICHE BARRIERA

<b>Nome barriera</b>	TS-1500-ZD
<b>Altezza [m]</b>	5
<b>Capacità [kJ]</b>	1667
<b>Inclinazione di posa [°]</b>	75
<b>Elongazione massima [m]</b>	6.18

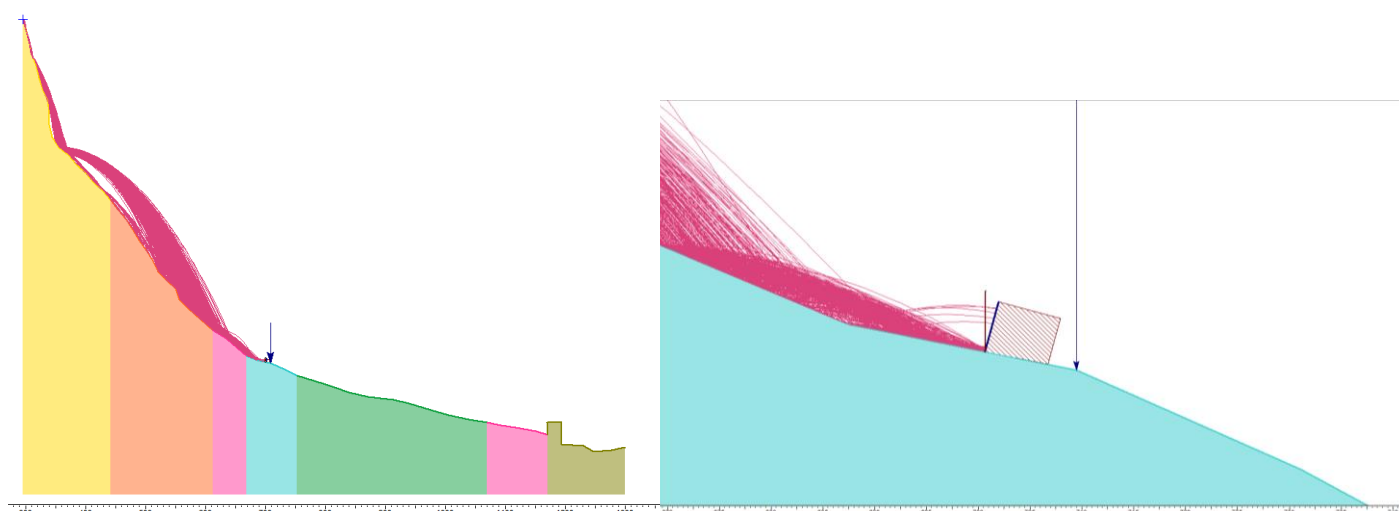


FIGURE 6-4.5 SIMULAZIONE GRAFICA, LANCIO 1000 BLOCCHI CON BARRIERA

Dopo l'applicazione della barriera si ottengono i seguenti grafici (pagina 37), relativi all'intero pendio.

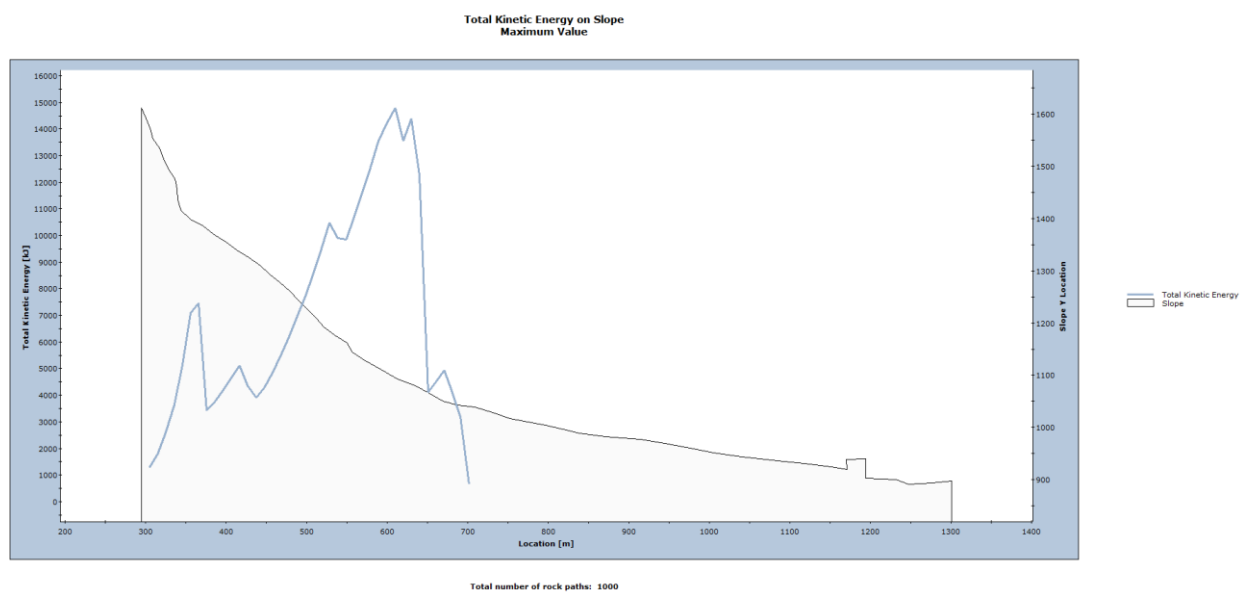


FIGURA 6-5 ENERGIA CINETICA TOTALE

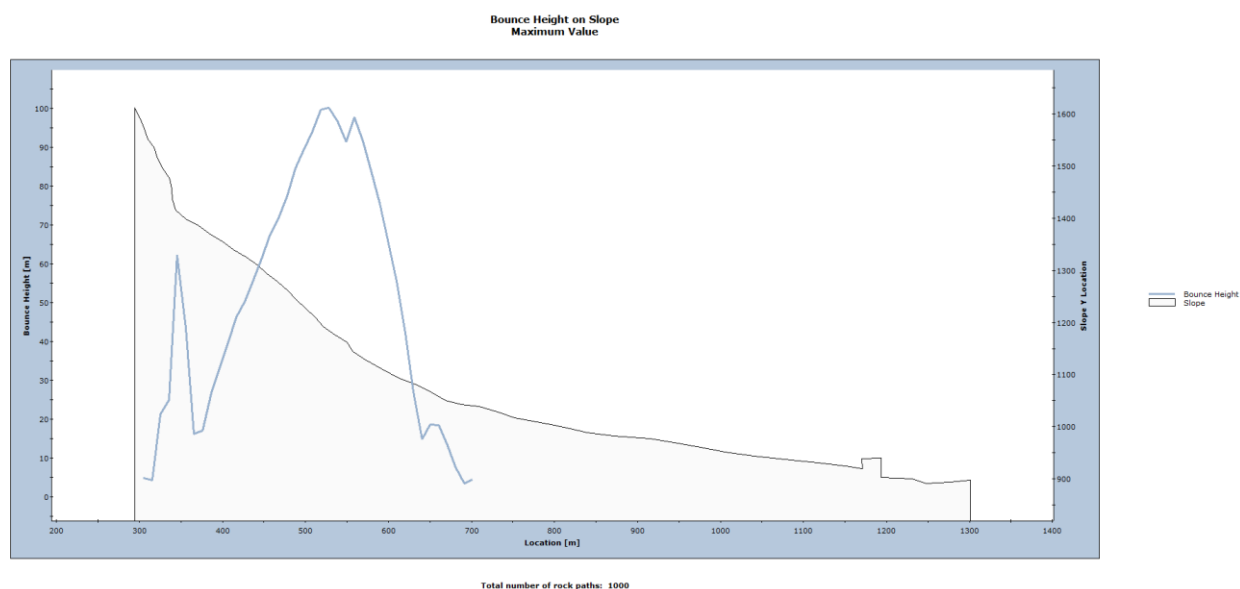


FIGURA 6-6 ALTEZZA MASSIMA DI RIMBALZO

Si nota quindi la completa raccolta di tutti i blocchi simulati.

## 6.3 Conclusioni

Dati i parametri del pendio in esame e le relative deviazioni standard si è optato, per mantenere un'elevata sicurezza, alla barriera TS-1500-ZD (Figura 6-7).

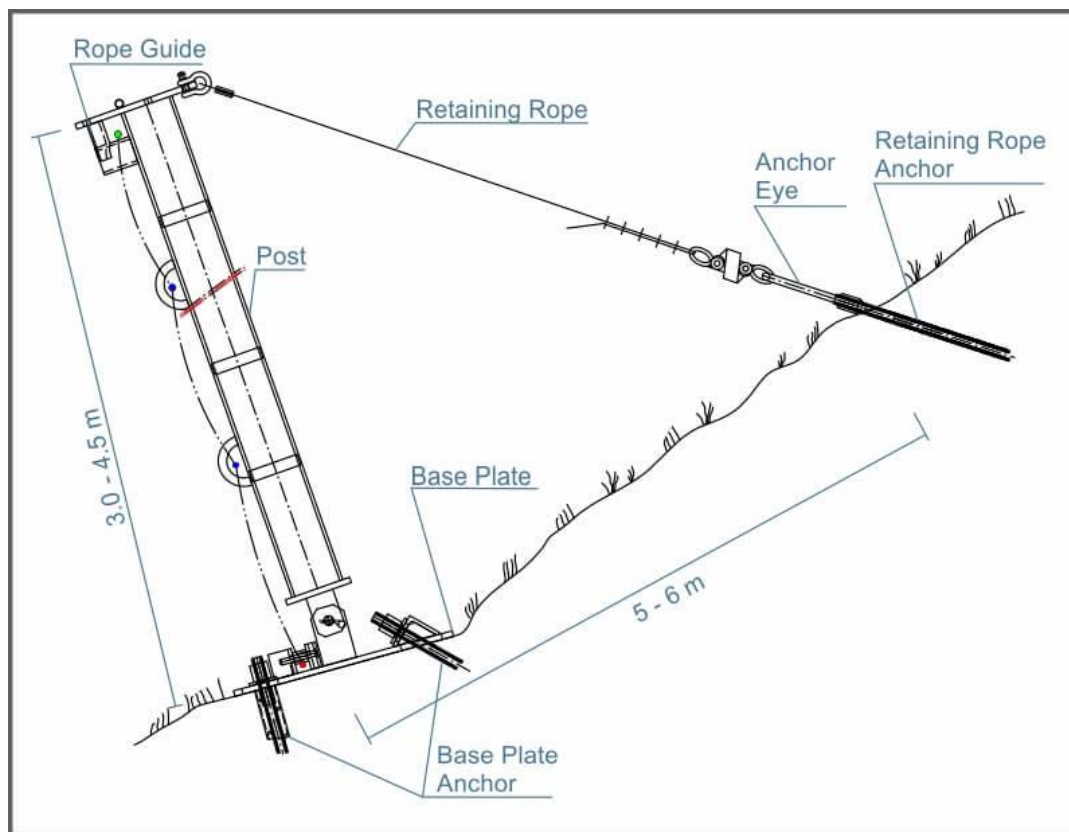


FIGURA 6-7 SEZIONE TRASVERSALE DELLA BARRIERA

Trattandosi di una simulazione, basata su calcolo probabilistico, affermare che la barriera reale fermi il 100% delle rocce che si staccheranno dal seeder è, oltre che non a favore di sicurezza, inverosimile.

L'uso di un'unica barriera è stata determinata seguendo i parametri riportati a pagina 36.

Come si evince dalle Figure 6-4.5 con la massima deformazione la barriera non tocca il punto da proteggere.

## 7 ° Consegna

Sulla base delle sezioni del versante allegate, analizzare il fenomeno di caduta massi facendo uso del software RocFall e creare la zonazione della pericolosità in funzione delle distanze di arresto dei massi.

- Numero di blocchi: 1500
- Peso specifico: 26.5 kN/m<sup>3</sup>
- Volume medio dei blocchi: 1 m<sup>3</sup> - STD: 0.2 m<sup>3</sup>
- Point seeder: coincidente con punto sommitale della sezione.

	Velocità orizzontale [m/s]	Deviazione Standard velocità orizzontale	Velocità verticale [m/s]	Deviazione Standard velocità verticale
<b>Sezione 1</b>	2.5	0.2	1.5	0.2
<b>Sezione 2</b>	2	0.2	2.5	0.2
<b>Sezione 3</b>	2	0.2	2.5	0.2
<b>Sezione 4</b>	1	0.2	1.5	0.2
<b>Sezione 5</b>	2.5	0.2	3	0.2

Il pendio in esame è riportato in visione satellitare nella Figura 7-1 con già riportate le linee di pendenza in esame.

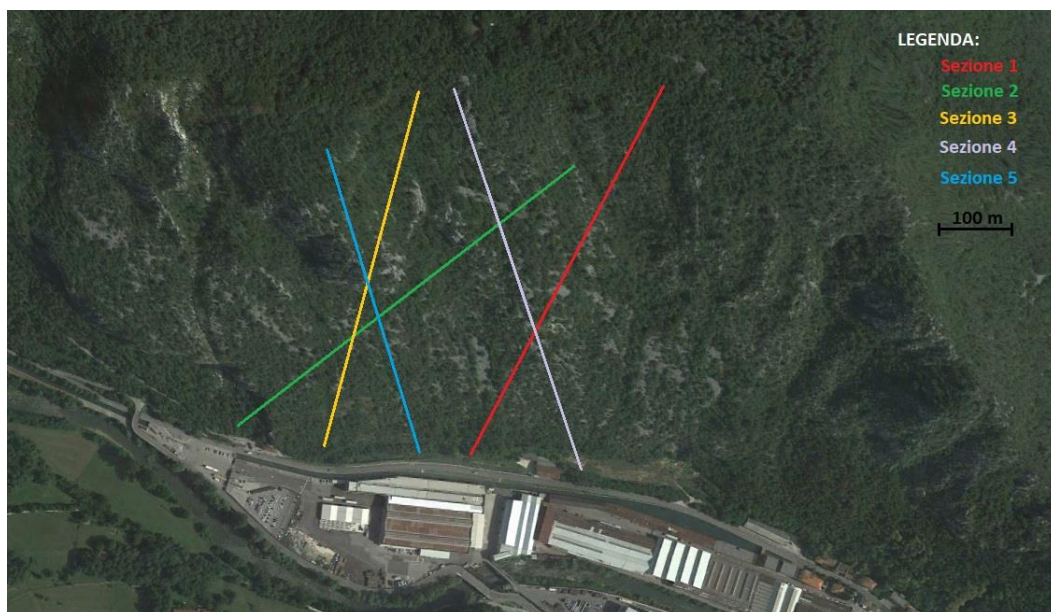


FIGURA 7-1 VISIONE SATELLITARE DEL PENDIO

### 7.1 Rielaborazione dati

Dal programma RocFall è possibile, oltre a ricavare l'energia cinetica e l'altezza di rimbalzo usate nella precedente Consegna (6 ° Consegna), anche determinare il punto in cui progressivamente si fermano le rocce definiti "end location". Effettuando le simulazioni su tutti i versanti si sono ottenuti i seguenti grafici, riportati in Figura 7-2, Figura 7-3 e Figura 7-4.

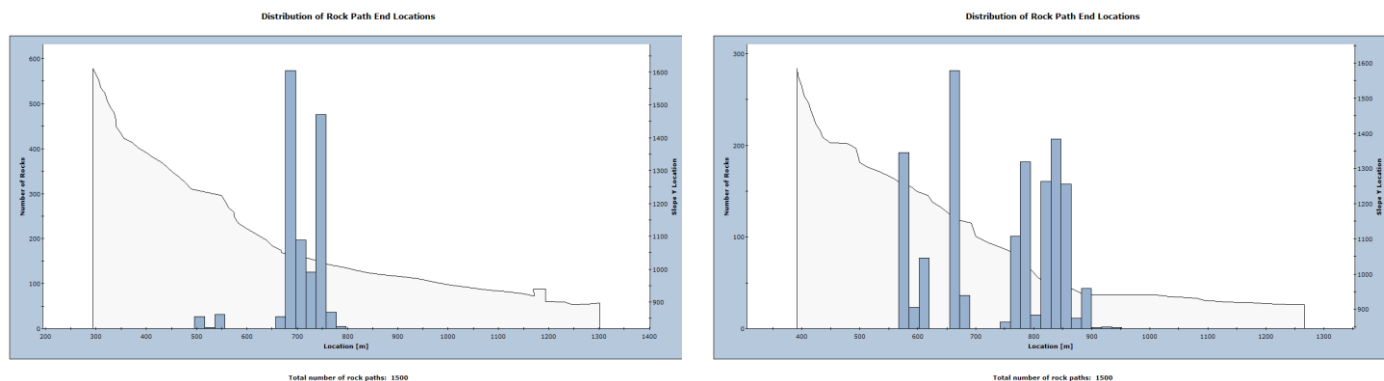


FIGURA 7-2 SEZIONI 1 E 2

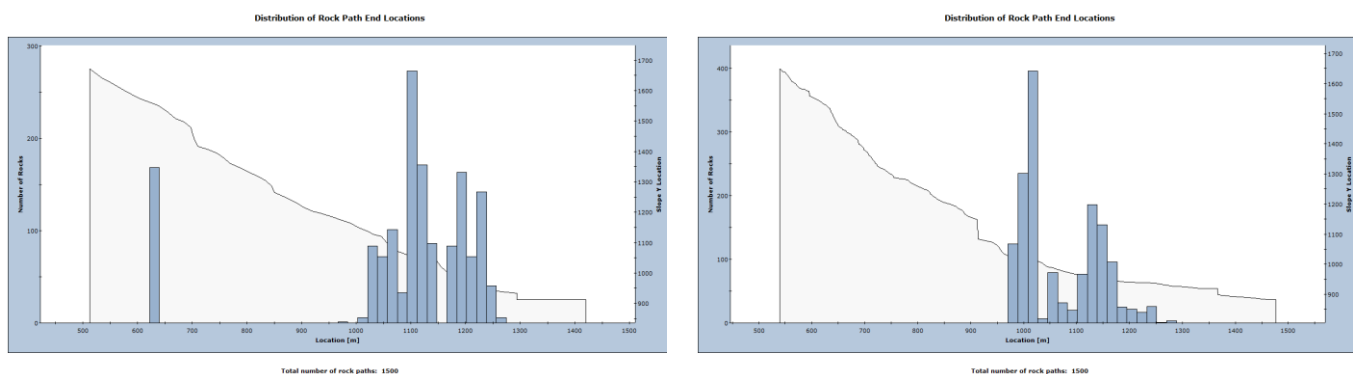


FIGURA 7-3 SEZIONI 3 E 4

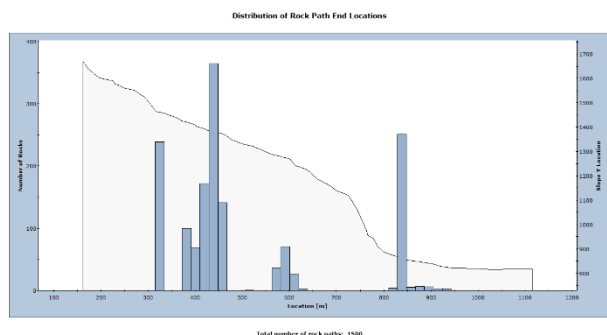


FIGURA 7-4 SEZIONE 5

Oltre che essere in grafico, tali dati è possibile estrarli in tabella per rielaborarli, come da richiesta.

È necessario determinare la percentuale progressiva dei punti in cui le rocce si fermano. In altre parole ove il rischio caduta massi è elevato (75%), moderato (90%), quasi nullo (95%).

Il programma restituisce una tabella simile a quella sotto riportata, per ogni singola sezione, contenente per posizioni progressive il numero di rocce che in quei punti si fermano.

TABELLA 7-1 ESEMPIO DATI POS-SIMULAZIONE

Location [m]	Number of Rocks
667.026	26
687.148	574
707.27	197
727.392	126



In Tabella 7-2 sono riportati:

- Distanza corretta, per shiftare i dati secondo l'inizio del pendio in esame
- Percentuale dei massi, considerando la somma totale dei massi simulati (1500)
- Percentuale progressiva, la somma progressiva della percentuale massi

TABELLA 7-2 RIELABORAZIONE DATI

**Distanza corretta [m]    Percentuale massi [%]    Percentuale progressiva**

372.251	1.73%	5.73%
392.373	38.27%	44.00%
412.495	13.13%	57.13%
432.617	8.40%	65.53%

La determinazione dei punti al 70%, al 90% e al 95%, si effettua tramite interpolazione lineare dei dati dell'ultima colonna nell'intorno del 70%.

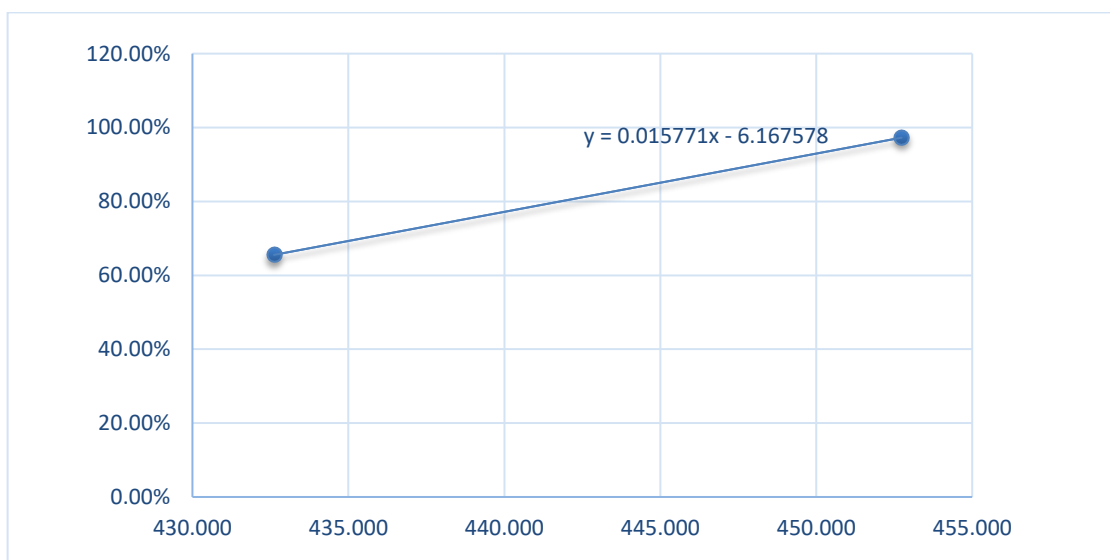


FIGURA 7-5 INTERPOLAZIONE PER SEZIONE 1

Si è riprodotto per tutte le sezioni la determinazione della pendenza e dell'intercetta e da esse si è determinato, tramite interpolazione, la distanza corretta dei vari livelli. In Tabella 7-3 sono riportati i valori descritti.

TABELLA 7-3 DISTANZE DI SICUREZZA PER CIASCUNA SEZIONE

	<b>Pendenza</b>	<b>Intercetta</b>	<b>Distanza rischio alto</b>	<b>Distanza rischio moderato</b>	<b>Distanza rischio quasi nullo</b>
<b>Sezione 1</b>	0.016	-6.168	435.449	448.131	451.301
<b>Sezione 2</b>	0.006	-1.912	425.220	457.774	465.913
<b>Sezione 3</b>	0.003	-1.302	655.937	721.467	737.850
<b>Sezione 4</b>	0.007	-3.136	579.044	609.237	616.786
<b>Sezione 5</b>	0.006	-3.323	654.896	687.450	695.589

### 7.1.1 Visualizzazione grafica

In conclusione sono stati riportati i valori delle distanze di sicurezza sull'immagine del versante,

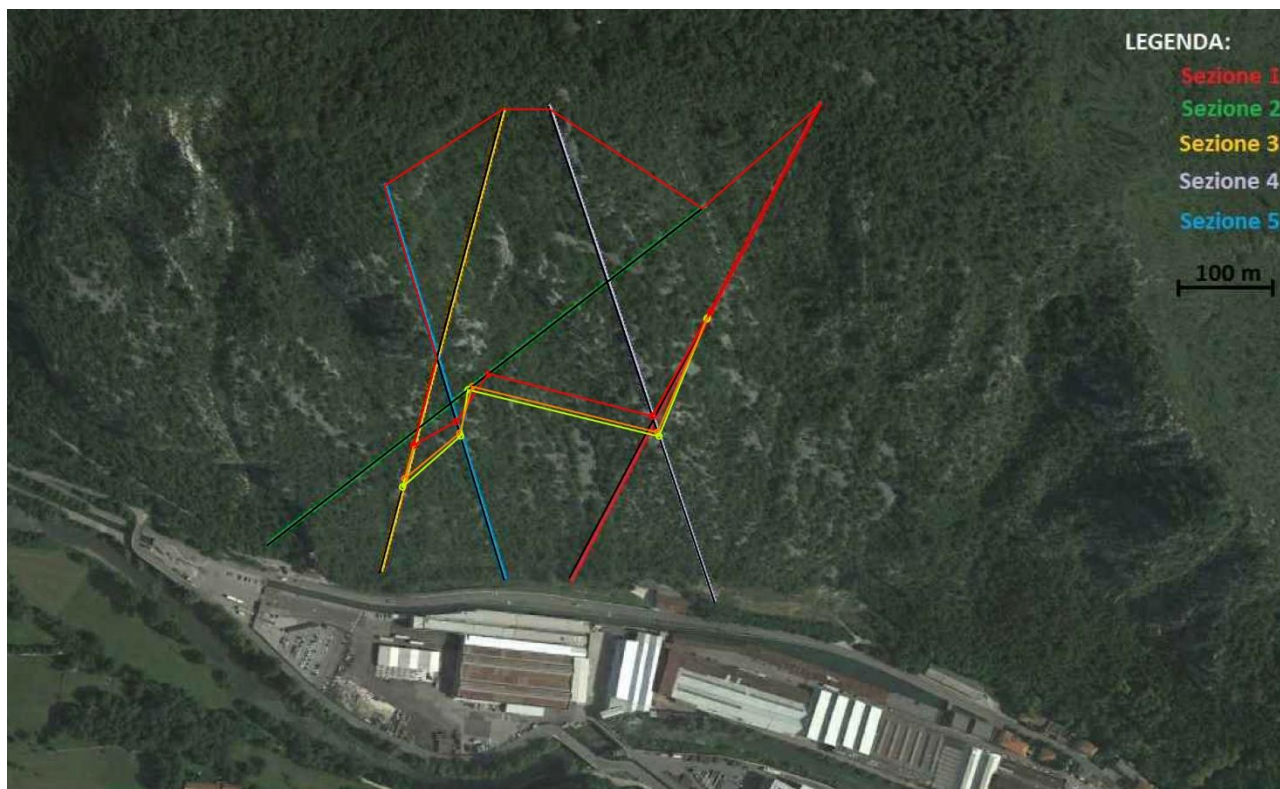


FIGURA 7-6 RISCHIO CADUTA MASSI

Come si può notare vi è un'incongruenza fra la sezione 2 e la 5, messa in maggiore evidenza nella Figura 7-7.

Essa è dovuta allo studio singolare effettuato su ogni sezione che quindi non ha permesso la visione globale del versante.

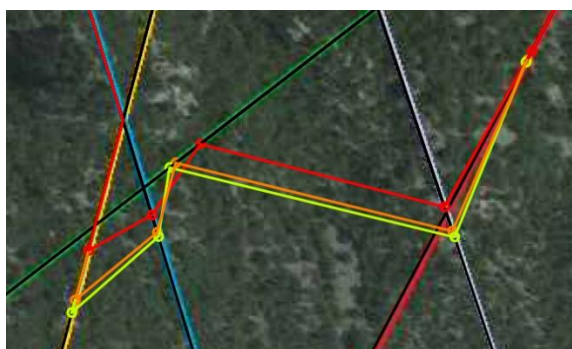


FIGURA 7-7 DETTAGLIO ZONE A RISCHIO

Per ovviare a tale problema, e per essere a favore di sicurezza, si è deciso di dare priorità alla linea che delimita l'alta pericolosità.

Fra una sezione e l'altra, essendo la litologia del versante similmente uniforme, si è ipotizzato un collegamento, fra i vari punti a ugual pericolosità, lineare.

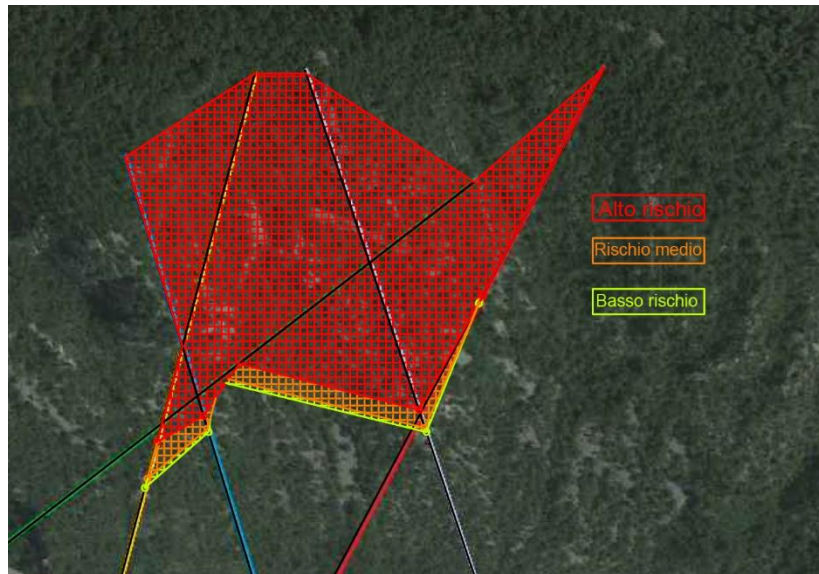


FIGURA 7-8 DEFINIZIONE AREE DI PERICOLOSITÀ

## 7.2 Conclusioni

È quindi bene evitare la realizzazione di qualsiasi opera all'interno della zona rossa e, nel caso si volesse compiere una qualsiasi costruzione, effettuarla in zona gialla o più a tergo e, indipendentemente dalla zona, proteggerla con una rete para massi, poiché le simulazioni si basano su un calcolo probabilistico.

## 8 °Consegna

### 8.1 Dati iniziali

Si consideri il pendio in Figura 8-1. Si vuole analizzare la stabilità globale dello stesso, considerando anche le interazioni con le strutture, e prevedere eventuali opere aggiuntive (case, strade, etc.).

Mediante prove di laboratorio su campioni di terreno prelevati da 4 sondaggi a carotaggio continuo, si sono ottenuti i seguenti parametri di resistenza meccanica, riportati in Tabella 8-1.

TABELLA 8-1 PARAMETRI DI RESISTENZA MECCANICA

Strato	Tipologia	Sondaggio 1			Sondaggio 2			Sondaggio 3			Sondaggio 4		
		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]
1	Argilla Scagliettata	18.5	16.0	5.2	18.3	14.7	4.8	17.9	15.7	5.6	18.0	15.1	4.4
2	Argilla	18.9	16.3	7.4	19.3	17.0	6.6	19.5	17.4	6.9	19.0	15.9	7.9
3	Argillite	20.1	29.7	24.8	20.4	31.4	27.3	21.1	30.3	26.5	21.5	31.2	26.1
4	Flysch	24.2	42.4	51.5	22.9	40.8	53.4	24.8	41.9	50.8	23.8	38.9	56.6

Si consideri inoltre la costruzione di un complesso residenziale di almeno tre edifici che, considerando tutti i carichi previsti nella condizione più gravosa, trasferiranno un massimo di 120 KPa ciascuno sull'area occupata, estendendosi per 30 metri di lunghezza.

Si preveda inoltre la realizzazione di un rilevato stradale da posizionarsi nella zona più opportuna, per una larghezza almeno pari a 7 m, con un peso di 50 KPa per uno spessore di 40 cm.

Si studi la condizione preliminare del pendio, l'effetto della struttura sulla stabilità dello stesso, e si prevedano le opportune opere geotecniche necessarie alla sua stabilizzazione, considerando i parametri in TABELLA 8-2.

Tabella 8-2: Tipologia di supporti

	Tipologia	Spaziatura [m]	Forza di Taglio [kN]	Tensione ammissibile [MN/m <sup>2</sup> ]	Tensile Strength [kN/m]	Estensione [m da P.C.]
Supporto 1	Micro Palo	1	-	0.283	-	fino a 30
Supporto 2	Tirante	1	100-1000	-	100	fino a 50
Supporto 3	Geotessile	-	-	-	40	-
Supporto 4	Grouted Tieback	1	100-1000	-	50	fino a 50
Muro di sostegno	Muro di sostegno	1				

TABELLA 8-3: CARATTERISTICHE EVENTUALE MURO DI SOSTEGNO E TERRENO DI RIPORTO

	Angolo di attrito	Coesione efficace	Peso specifico
Muro di sostegno	40°	100 kPa	24 kN/m <sup>3</sup>
Materiale di riporto	35°	0 kPa	15 kN/m <sup>3</sup>
Prati armati	26.7°	5 kPa	18.3 kN/m <sup>3</sup>

Suggerire infine un adeguato sistema di monitoraggio e/o allertamento adatto al pendio oggetto di studio.

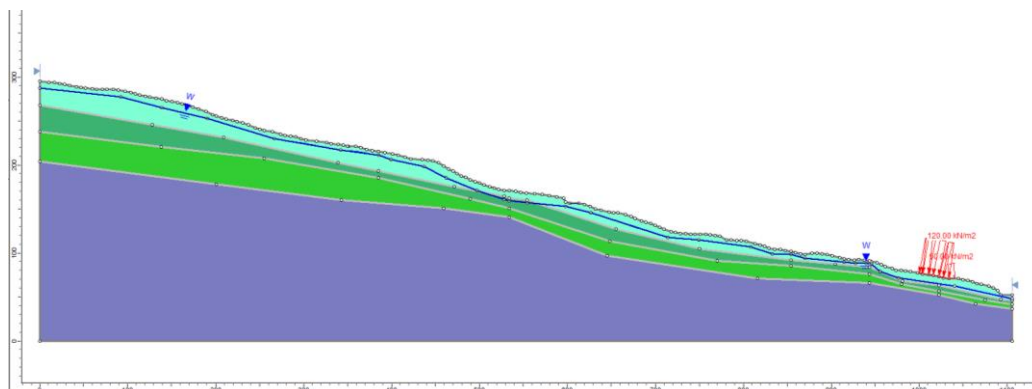


FIGURA 8-1 VERSANTE IN STUDIO

## 8.2 Elaborazione dati

I carichi sono stati posti in zona pianeggiante al piede del versante, così da risultare fattori stabilizzanti del pendio stesso, secondo la teoria della zona di influenza sviluppata da Hutchinson. I metodi usati per la verifica sono stati:

- Bishop simplified
- Morgenstern-price
- Janbu simplified
- Janbu correct
- Fellenius
- Spencer
- Sarma

Di questi, il software automaticamente determina quale porta al fattore di sicurezza più basso è quindi la ricerca da parte dell'utente di un  $F_s > 1.30$  porta a considerare il pendio stabile per tutti i metodi considerati.

Di fondamentale importanza è la scelta dei limiti del pendio, per il software i limiti imposti sono perfettamente rigidi è quindi bene considerare una aliquota di pendio maggiore dei punti considerati instabili.

Le varie prove effettuate in condizioni iniziali, anche applicando tutti i supporti di TABELLA 8-2, non portano ad alcuna verifica di stabilità, tale risultato è dettato dalla presenza di acqua nel pendio. Per ovviare a tale problematica si è deciso di abbassare la falda di 3 m ponendo a monte, al di fuori della zona instabile, dei dreni.

Le prove di stabilità, avendo quattro differenti valori per ogni parametro, come riportato in Tabella 8-1, si sono suddivise in 3 scenari:

1. Scenario 1: scelta dei parametri migliori disponibili, il minor  $\gamma$  e i massimi di  $\phi$  e  $c$ .
2. Scenario 2: scelta dei parametri peggiori disponibili, il massimi  $\gamma$  e i minor di  $\phi$  e  $c$ .
3. Scenario 3: semplice media dei parametri disponibili.

TABELLA 8-4 VALORI IMPIEGATI NELLE TRE SIMULAZIONI

Strato	Tipologia	Scenario 1			Scenario 2			Scenario 3		
		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]
1	Argilla Scagliettata	17.90	16	5.6	18.50	14.7	4.4	18.18	15.37	5
2	Argilla	18.90	17.4	7.9	19.50	15.9	6.6	19.18	16.65	7.2
3	Argillite	20.10	31.4	27.3	21.50	29.7	24.8	20.78	30.65	26.17
4	Flysch	22.90	42.4	56.6	24.80	38.9	50.8	23.93	41	53.07

## 8.3 Simulazioni

L'uso di micropali in qualunque dei tre scenari, a meno di usarne un quantitativo spropositato, risulta poco applicabile, data la loro bassa resistenza (20 kN massimi).

Si è optato per l'uso di pali che possono raggiungere il metro di diametro con conseguente incremento di forza 222.27 kN massimi.

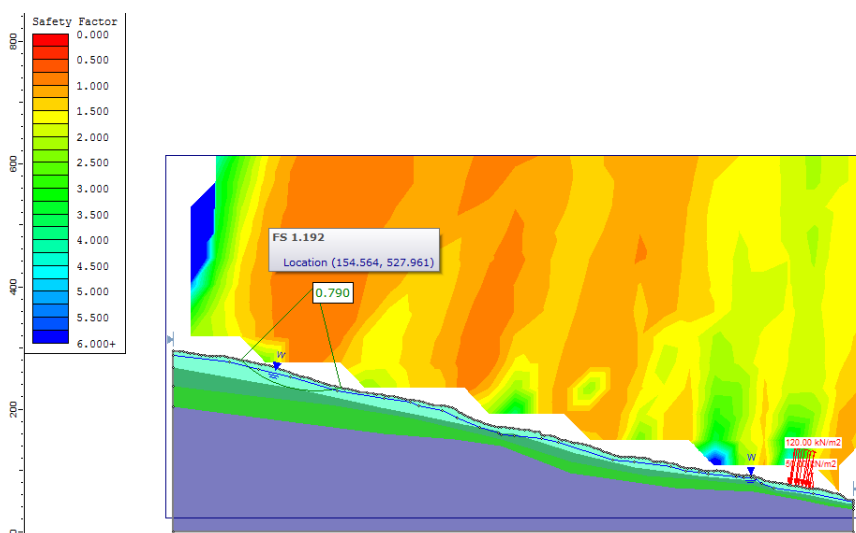
### 8.3.1 Scenario 1

Sono riportati di seguito le simulazioni effettuate dopo l'applicazione:

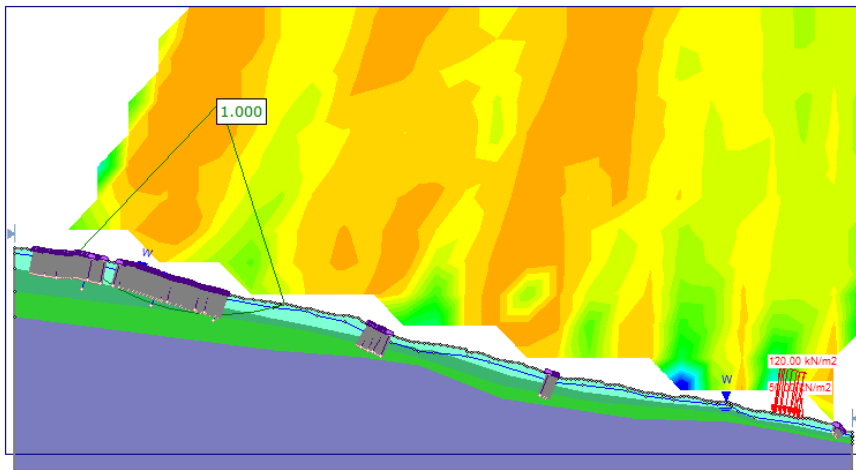
1. Dell'abbassamento del piano di falda
2. Dell'applicazione dei micropali [20 kN considerati]
3. Dell'applicazione dei pali [222.27 kN considerati].

FIGURE 8-1 SCENARIO 1

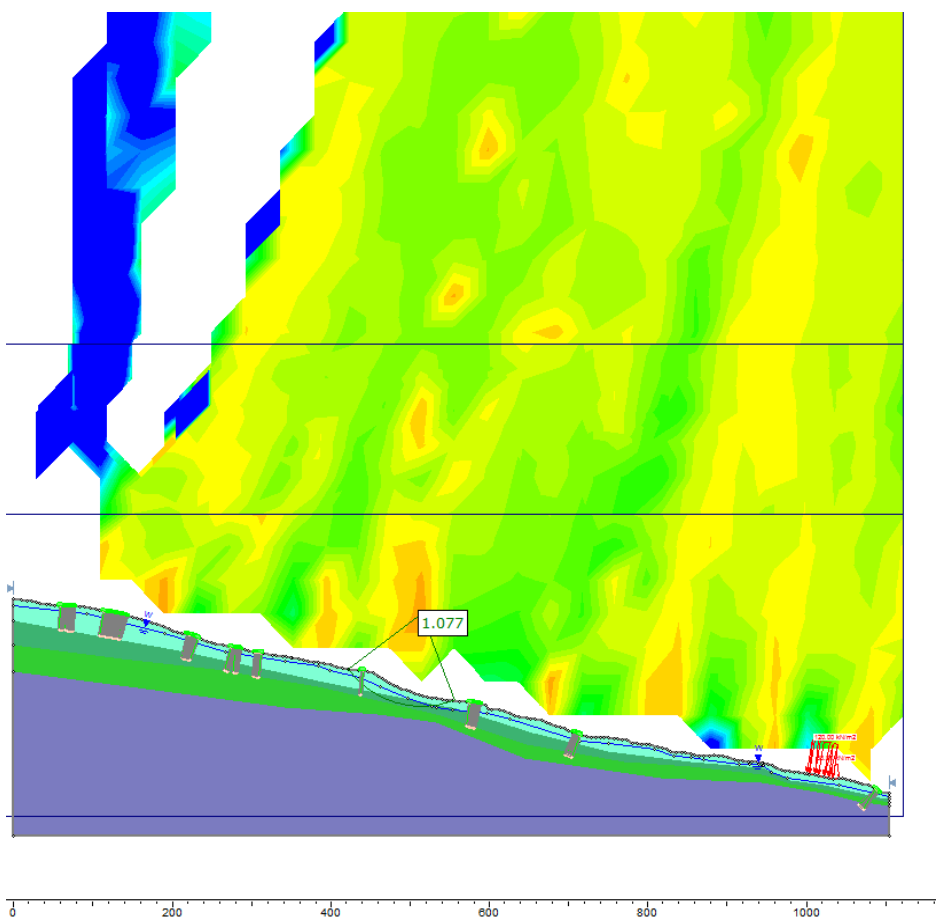
Figure fra loro in diversa scala.



1. ABBASSAMENTO PIANO DI FALDA



2. APPLICAZIONE MICROPALI



3. APPLICAZIONE PALI

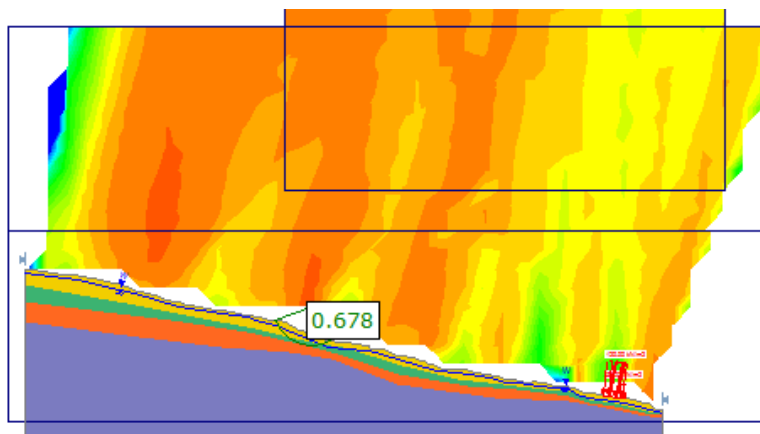
### 8.3.2 Scenario 2

Sono riportati di seguito le simulazioni effettuate dopo l'applicazione:

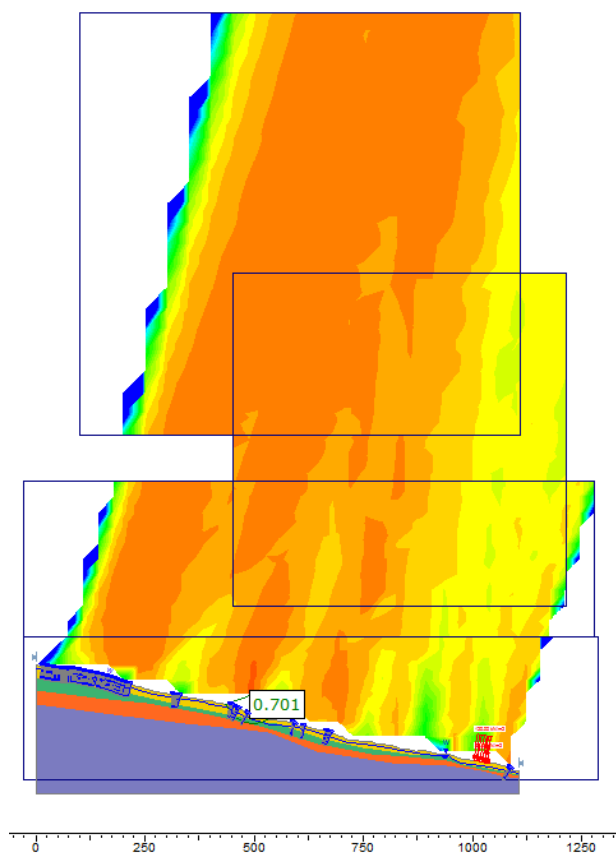
1. Dell'abbassamento del piano di falda
2. Dell'applicazione dei micropali [20 kN considerati]
3. Dell'applicazione dei pali [200 kN considerati].

FIGURE 8-2 SCENARIO 2

Figure fra loro in diversa scala.

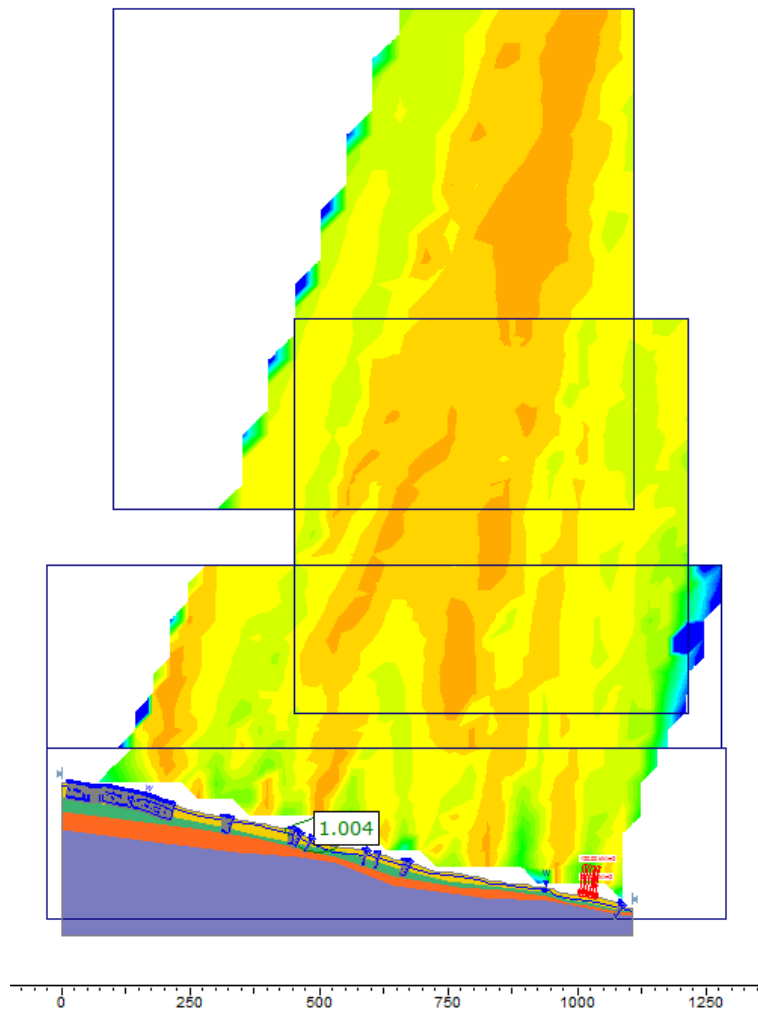


1. ABBASSAMENTO FALDA



2. APPLICAZIONE MICROPALI





## 3. APPLICAZIONE PALI

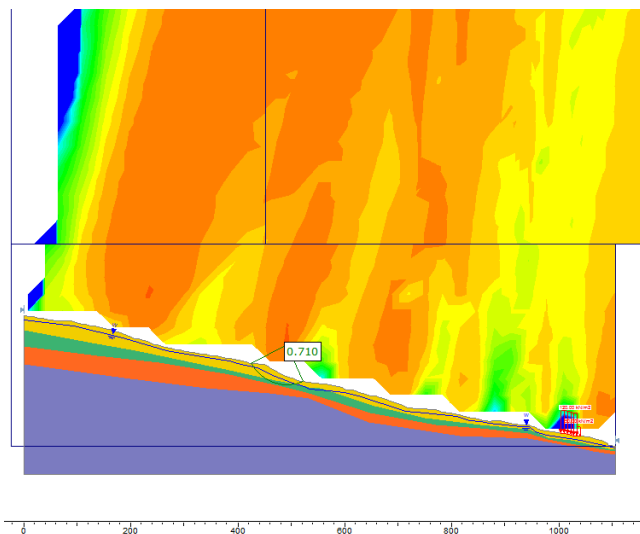
## 8.3.3 Scenario 3

Sono riportati di seguito le simulazioni effettuate dopo l'applicazione:

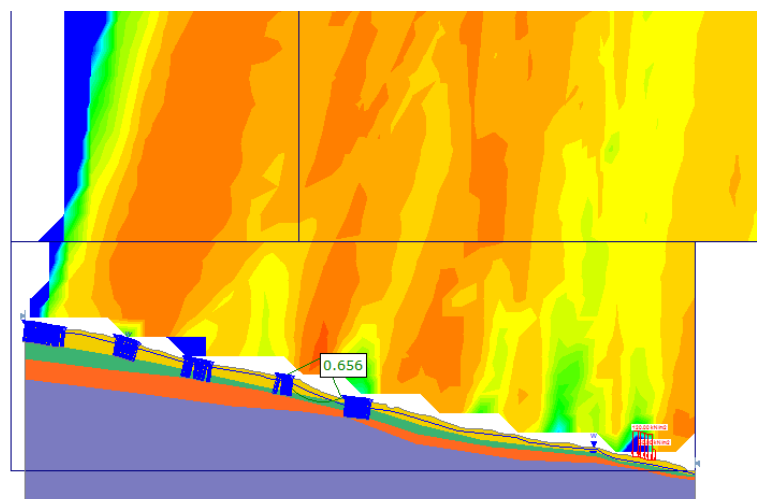
4. Dell'abbassamento del piano di falda
5. Dell'applicazione dei micropali [20 kN considerati]
6. Dell'applicazione dei pali [222 kN considerati].

FIGURE 8-3 SCENARIO 3

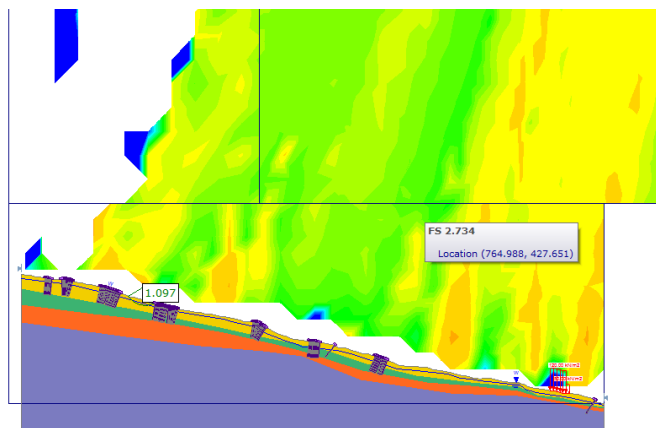
Figure fra loro in diversa scala.



1. ABBASSAMENTO FALDA



2. APPLICAZIONE MICROPALI



3. APPLICAZIONE PALI

## 8.4 Conclusioni

Misurando la lunghezza complessiva del pendio coperta da pali si può notare, come immaginabile, che la scelta dei parametri “migliori” porti ad una riduzione del numero di pali da utilizzare (interasse fra un palo e l’altro di un metro Tabella 8-5).

D’altro canto tale scenario è il più ottimistico e quindi anche irrealistico, come anche lo scenario 2, in cui si sono scelti i peggiori parametri.

Una buona approssimazione della realtà risulta essere lo scenario 3, in cui si sono mediati i valori dei sondaggi, anch’esso però è da valutare se applicarlo in tutto o mediarlo con altri fattori (primo fra tutti quello, purtroppo, economico)

TABELLA 8-5 COPERTURA [M] DI PALI DEL PENDIO

Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
143 m	375 m	210 m

Il modello è migliorabile, oltre che avendo a disposizione più dati da altri sondaggi, anche conoscendo ove tali prove sono state effettuate così da usare i parametri localmente e non come media della stratigrafia.

I sistemi di monitoraggio applicabili sul pendio sono molteplici:

- Prova con inclinometri, dovrà essere eseguita con scadenza regolare per accertarsi di eventuali scostamenti.
- Accelerometri e punti GPS, connessi ad una base di monitoraggio continuo, purtroppo l’ipotesi, su cui si basano tutti i metodi usati per la stabilità dei pendii, non permette di considerare gli spostamenti e la conoscenza dei tempi di attivazione dell’eventuale frana, quindi il monitoraggio continuo risulta essere l’unica via per eventi istantanei.
- Definizione e monitoraggio di punti con coordinate note, rintracciabili da teodoliti, posti in punti al di fuori del corpo franoso, con puntamento automatico così da determinare gli eventuali movimenti “persi” dagli accelerometri.

La scelta di un sistema piuttosto che un altro è dettata dall’importanza che ha la frana stessa cioè dal livello di sicurezza che si intende raggiungere e dalle opere umane da difendere, è bene, nel caso, anche costituire, se necessario, un sistema di allarme per protezione civile e con esso una soglia minima di attivazione onde evitare che scostamenti minimi procurino allarmi immotivati e non necessari.

## Riferimenti e note

Giani, G. (1988). *Analisi di stabilità dei pendii (parte I)*. Torino : Associazione mineraria subalpina.

### Note

- Tutti i coefficienti:  $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\varphi$ , sono stati considerati sempre efficaci, ove non espressamente dichiarato, seguendo il criterio di Terzaghi.