

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2409A

ANNO: 2019

A P P U N T I

STUDENTE: Corrao Stefano

MATERIA: Meccanica delle Rocce - Esercitazioni Svolte - Prof.
Scavia, Prof. Barbero

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE



MECCANICA DELLE ROCCE

Esercitazioni Complete

DOCENTI:

Prof. Claudio Scavia

Ing. Monica Barbero

Cap. 1 - Analisi strutturale dell'ammasso roccioso

Premessa

In tale applicazione sono stati elaborati i dati ricavati da alcuni rilievi lungo stendimento, eseguiti in un'area dell'ammasso roccioso particolarmente critica per problemi di stabilità.

La prima fase di studio, è l'analisi strutturale dell'ammasso roccioso. Essa consiste nell'eseguire un rilievo per individuare le varie discontinuità presenti, in particolare definire le famiglie costituite da fessure aventi simili caratteristiche dal punto di vista dell'orientamento spaziale, inoltre si valutano anche altre caratteristiche quali: spaziatura, apertura, riempimento e JRC (scabrezza).

Documenti e dati consultati

I dati di giacitura e caratterizzazione delle discontinuità intercettate sono stati raccolti nel file "*strutt1516.xls*" riportato nell'allegato 1.

Cenni teorici e metodologici

Alla base dello studio svolto vi sono i concetti di ammasso roccioso, definito come una porzione di roccia che presenta sia microfratture che fratture più grandi, e di discontinuità, definita come un'entità portatrice di debolezza all'interno dell'ammasso, in presenza della quale vi è un'interruzione della continuità del materiale e cambia lo stato tensionale nel suo intorno.

In generale le discontinuità vengono descritte attraverso otto caratteristiche, secondo le raccomandazioni dell'ISRM (International Society for Rock Mechanics): orientazione, spaziatura, continuità, scabrezza, resistenza delle pareti, apertura, riempimento, filtrazione. L'ammasso roccioso in esame verrà studiato solo in base ad alcune di queste.

I dati del rilievo sono affetti da errori legati alla modalità di esecuzione della misura e da altri aspetti come la persistenza delle discontinuità. Un errore significativo è l'errore di Terzaghi legato all'orientamento relativo tra la linea di stendimento e le tracce delle discontinuità sulla parete rocciosa che induce ad una sottostima del numero di discontinuità effettivamente presenti. Tale errore si elimina, correggendo il numero di discontinuità misurato con un fattore correttivo detto *peso* e definito come:

$$w_j = \frac{1}{\cos\vartheta}$$

Dove ϑ rappresenta l'angolo tra la normale al piano e lo stendimento.

Affinché il numero delle discontinuità non cambi, ma al tempo stesso per dar più importanza alle discontinuità non perfettamente perpendicolari allo stendimento, il peso viene normalizzato:

$$w'_j = w_j \frac{N}{N_w}$$

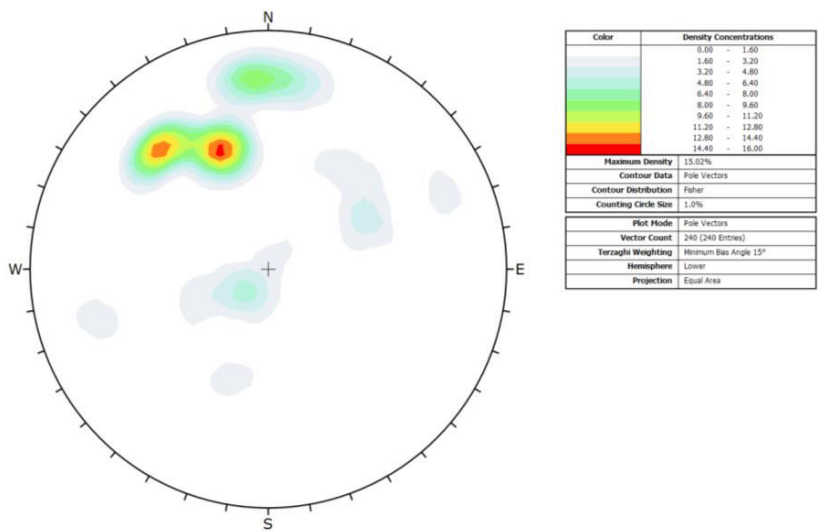


Figura 2: aree di isofrequenza

In seguito si procede al tracciamento delle aree più significative, che distinguono le diverse famiglie di discontinuità. Il software provvede al calcolo dell’orientazione del piano medio di ciascuna famiglia attraverso la determinazione della risultante pesata dei vettori con cui si rappresentano i poli (fig. 3).

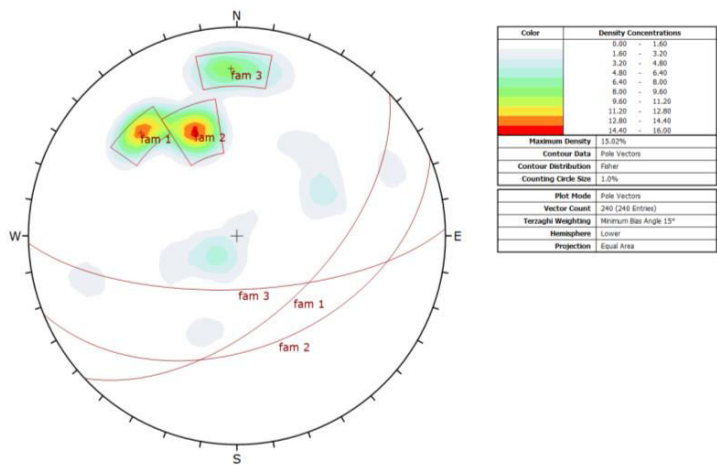


Figura 3: individuazione famiglie di discontinuità

Dal rilievo geostrutturale si determinano i parametri descrittivi relative alle singole discontinuità quali: spaziatura, apertura, riempimento e JRC (scabrezza), che vengono elaborate dal programma nella forma di istogrammi, riportati nell’allegato 2.

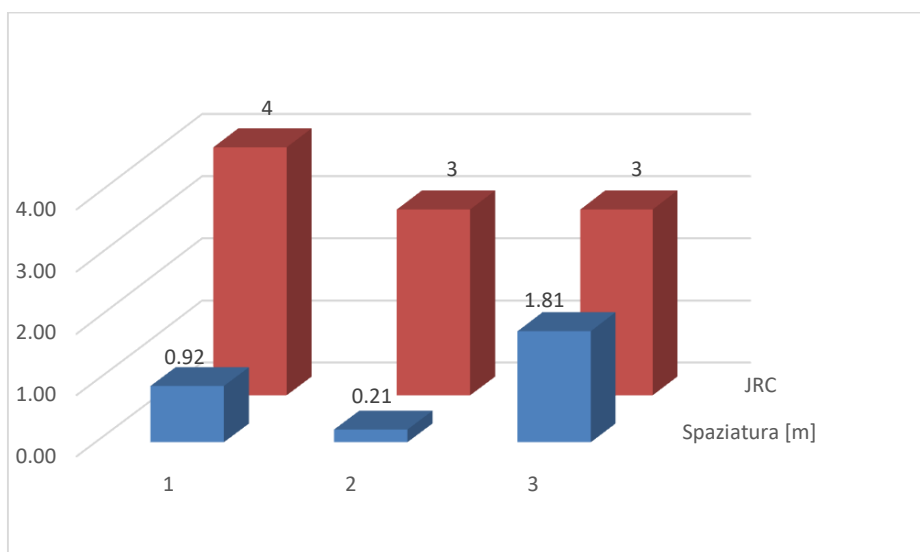


Grafico 1: spaziatura e indice JRC delle 3 famiglie di discontinuità

Nel grafico 1 sono state riportate le caratteristiche globali delle famiglie individuate in termini di spaziatura e JRC e, mentre per le famiglie 1 e 2 l'apertura è considerata *chiusa* e il riempimento *assente*, per la famiglia 3 l'apertura è *aperta* e il riempimento consiste in 3 cm di quarzo.

Si sono riportati in forma sintetica tutti i risultati ottenuti (tab.2).

	FAMIGLIA 1	FAMIGLIA 2	FAMIGLIA 3
Giacitura			
Dip [°]	57	45	69
Dip direction [°]	137	158	180
Spaziatura [m]	0,9	0,2	1,8
JRC [-]	4	3	3
Apertura	Chiusa	Chiusa	Aperta
Riempimento	Assente	Assente	3 cm quarzo

Tabella 2: caratteristiche delle discontinuità

- s ed α sono due parametri che dipendono dal litotipo considerato e dal grado di fratturazione della roccia e che, nel caso di roccia intatta, valgono rispettivamente 1 e 0,5;
- σ_{ci} rappresenta la resistenza a compressione della roccia intatta;
- m è un parametro dipendente dal tipo di roccia analizzata e che viene tarato per ottenere una buona interpolazione dei dati; Per poter definire il criterio occorre perciò determinare m e σ_{ci} e ciò può essere fatto riportando i dati delle prove su un piano avente in ascissa la tensione principale minore (σ_3) e in ordinata $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$; su tale piano infatti la relazione di Hoek-Brown diventa lineare e permette di ricavare i parametri ricercati: l'intercetta della retta rappresenta σ_{ci}^2 , mentre il coefficiente angolare fornisce il valore di $m\sigma_{ci}$.

Il criterio di resistenza di Mohr – Coulomb si caratterizza della seguente equazione:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$$

Dove:

- c = coesione
- σ_n = tensione normale
- $\tan \varphi$ = tangente dell'angolo di attrito

La relazione di Mohr-Coulomb lega la massima tensione tangenziale che il materiale può sopportare su un piano caricato con una certa tensione normale.

I parametri si determinano, mediante una linearizzazione del criterio di Hoek-Brown, che propone una linearizzare dell'intervallo σ_3 compreso tra 0 e $0,5\sigma_c$, considerando almeno 8 valori di σ_3 , per i quali si calcolano i corrispondenti valori di σ_1 .

Analisi e calcolo dati

Resistenza a compressione monoassiale

La prima fase di studio consiste nello stimare graficamente il valore di C_0 , che rappresenta la resistenza a compressione monoassiale. Tale valore corrisponde all'ordinata del punto di massimo della curva sforzo-deformazione. Questo parametro è stato direttamente estrapolato dal *grafico 2* e vale 86,54 MPa.

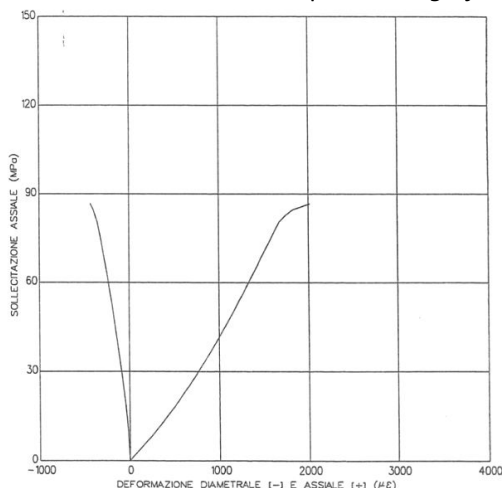


Grafico 2: legame sforzo-deformazioni di prova a compressione monoassiale

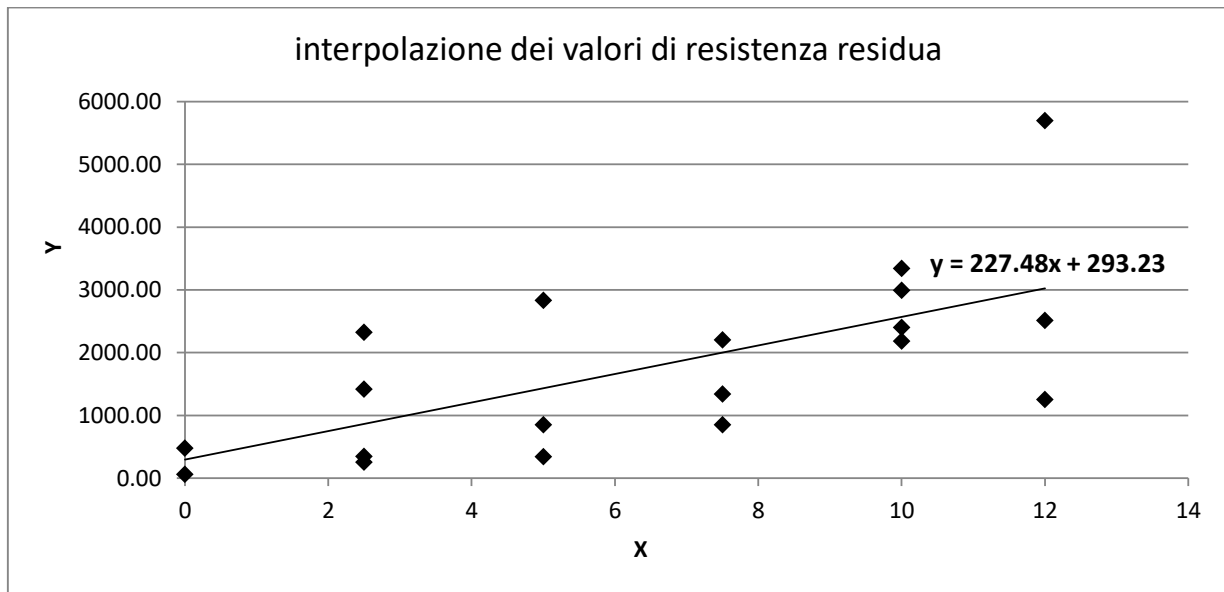


Grafico 4: : interpolazione lineare

In seguito, a partire dai termini che caratterizzano l'equazione della retta interpolante, si calcolano i parametri relativi al criterio di Hoek-Brown, i quali valgono

$$\sigma_{c, \text{picco}} = 106,71 \text{ MPa}; m_{\text{picco}} = 4,05$$

$$\sigma_{c, \text{residuo}} = 17,12 \text{ MPa}; m_{\text{residuo}} = 13,28$$

Noti tali parametri, è subito possibile definire l'andamento dell'involuppo di resistenza dei valori di picco e residui (graf. 5-6).

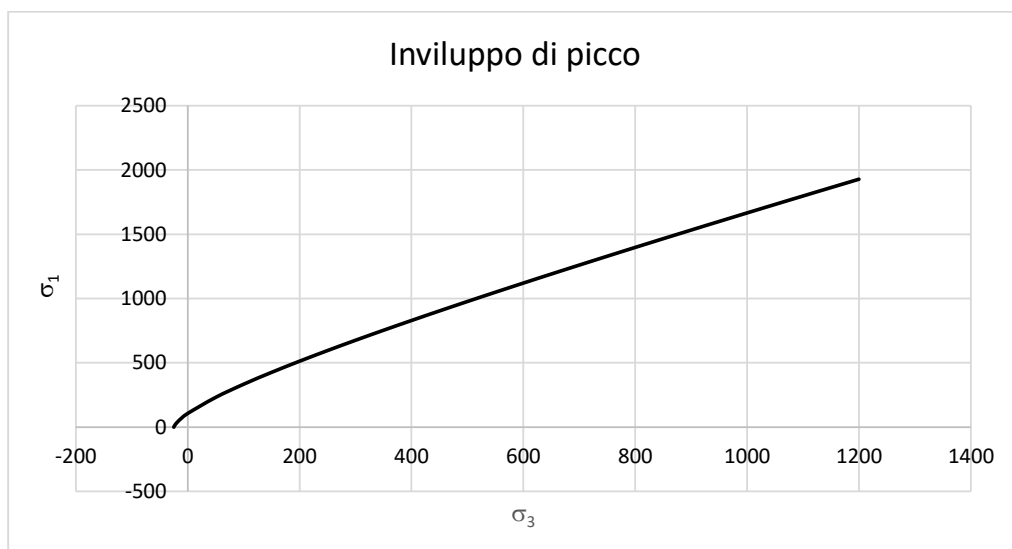


Grafico 5: involucro di resistenza dei valori di picco

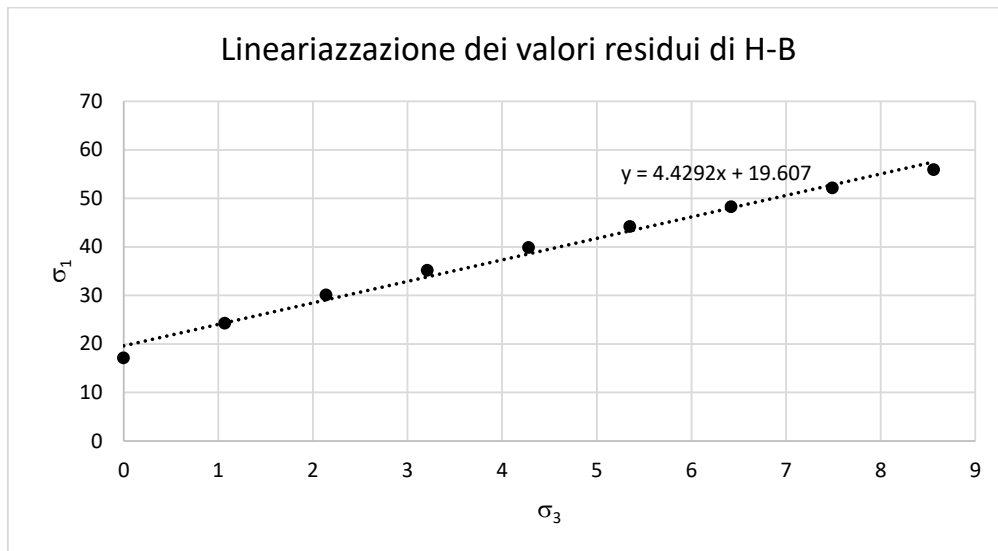


Grafico 8: linearizzazione

Si rappresenta graficamente l'involuppo di resistenza secondo il criterio di Mohr-Coulomb (*graf.9-10*):

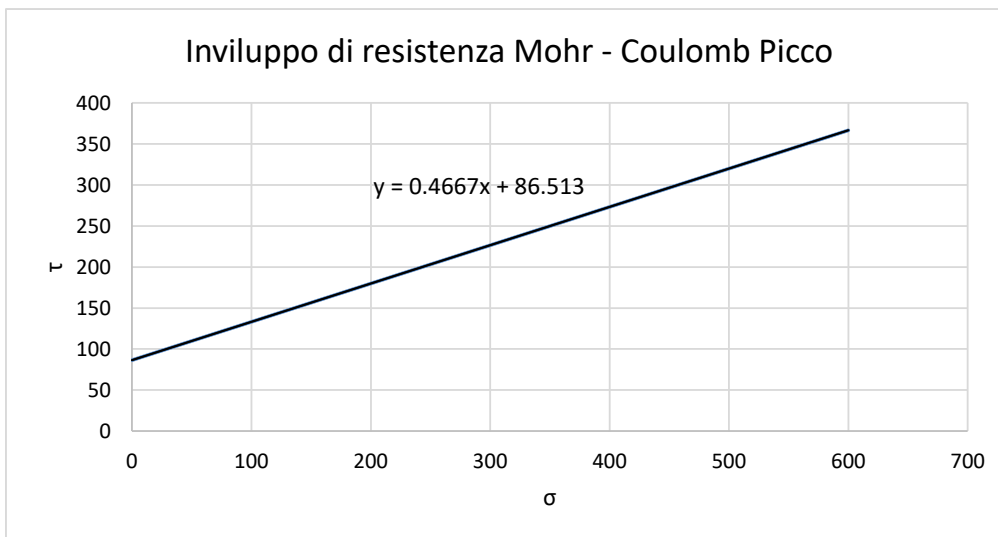


Grafico 9: involucro di picco

Cap. 3 – Caratterizzazione delle discontinuità

Premessa

A causa della presenza di zone di debolezza nell'ammasso roccioso a scala macroscopica (discontinuità), il comportamento meccanico del suddetto potrebbe essere notevolmente diverso da quello della matrice rocciosa (costituita da microfratture).

La seguente applicazione quindi ha l'obiettivo di caratterizzare le discontinuità mediante prove di laboratorio sui campioni di micascisti provenienti dal sondaggio effettuato.

Al fine di determinare i parametri di resistenza di base delle discontinuità interessanti l'ammasso in esame, sono state eseguite le seguenti operazioni:

- Costruzione del diagramma sforzo deformazione con lo scopo di determinare i parametri di resistenza a taglio di base;
- Determinazione dell'involuppo di resistenza a taglio di base per le discontinuità esaminate e individuazione del valore dell'angolo di attrito di base caratteristico.
- Sulla base dei dati ottenuti dalla caratterizzazione delle discontinuità (applicazione 2), diagrammare infine l'involuppo di resistenza a taglio non lineare secondo il criterio di Barton.

Documenti e dati consultati

I dati a disposizione sono contenuti nel file "rapporto 1.doc" e riportati in seguito in tab.4.

σ_n (MPa)	τ_b (MPa)
0.25	0.16
0.5	0.29
0.75	0.38
1	0.53

Tabella 4: risultati prove di taglio

In cui:

σ_n = tensione normale di compressione

τ_b = tensione tangenziale di base

Cenni teorici e metodologici

Le caratteristiche di un ammasso roccioso, ed in particolare la resistenza, sono condizionate dalla presenza di discontinuità. Per valutare il comportamento meccanico di un campione con discontinuità, esso viene sottoposto ad una prova di taglio diretto.

L'apparecchiatura utilizzata per realizzare tale prova è costituita da una scatola inferiore fissa ed una superiore che può scorrere rispetto ad essa. Applicando sforzi normali e di taglio si misurano gli spostamenti normali e tangenziali che subisce il provino. Non si considerano invece le deformazioni, in quanto le discontinuità presentano uno spessore nullo.

Considerando le pareti della discontinuità non alterate, si assume per JCS un valore pari alla resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta σ_{ci} .

$$JCS = 106,71 \text{ MPa}$$

Dall'interpretazione degli istogrammi di rugosità su piccola scala ricavati nell'Applicazione 1, si sono individuati 3 valori rappresentativi di JRC, uno per ogni famiglia di discontinuità (*tab.3*):

Famiglia 1		Famiglia 2		Famiglia 3	
JRC	4	JRC	3	JRC	3

Tabella 5: indice JRC per ciascuna famiglia

Infine diagrammando il criterio di Barton per ognuna delle tre famiglie di discontinuità si sono ottenute le seguenti rappresentazioni (tenendo conto del fatto che il massimo valore che σ_n può assumere è pari a JCS):

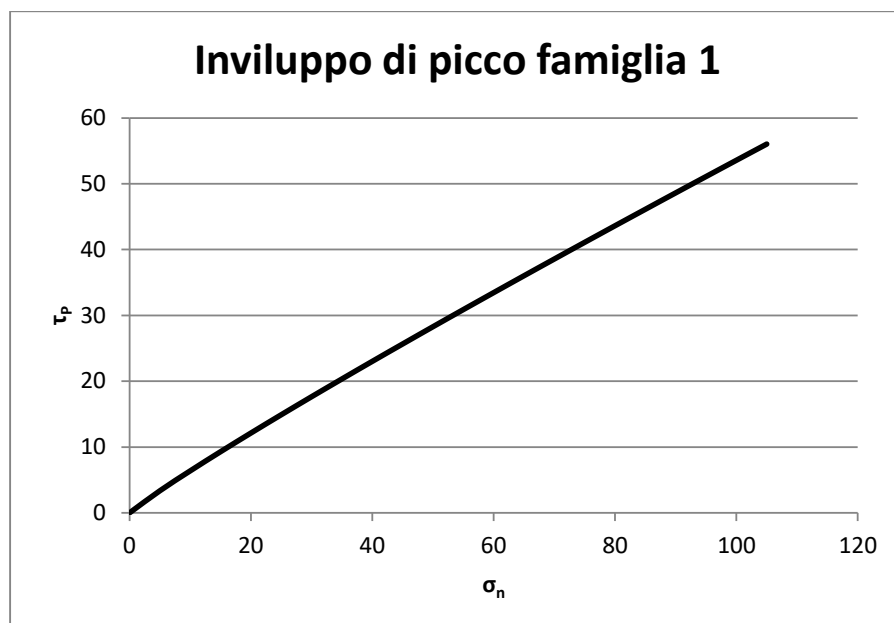


Grafico 12: inviluppo di resistenza di picco

Cap.4 – Caratterizzazione dell'ammasso roccioso

Premessa

L'obiettivo di questa applicazione è quello di determinare il valore degli indici di classificazione RMR e GSI, sulla base dei dati provenienti dalla caratterizzazione dell'ammasso roccioso svolta precedentemente. L'obiettivo è quindi quello di definire dei parametri (RMR e GSI), tali da poter identificare un generico ammasso roccioso secondo delle classi di qualità, in termini di resistenza meccanica e modulo di rigidezza.

Inoltre bisogna:

- Individuare i parametri di resistenza dell'ammasso roccioso, secondo il criterio non lineare di Hoek-Brown, rappresentando graficamente l'involuppo di resistenza;
- Individuare i parametri di resistenza dell'ammasso roccioso, secondo il criterio di Mohr-Coulomb, per linearizzazione del criterio di Hoek-Brown, rappresentandolo graficamente;
- Determinare il modulo di deformabilità caratteristico dell'ammasso roccioso;
- Diagrammare il criterio di resistenza per le discontinuità in scala reale (Barton-Bandis).

Documenti e dati consultati

I dati necessari per determinare i valori degli indici RMR e GSI sono rappresentati in tab.6. Di questi dati, alcuni provengono dalle analisi svolte precedentemente, altri sono assunti noti.

Resistenza a compressione monoassiale	106.71 MPa			
RQD	70%			
Spaziatura delle discontinuità		FAMIGLIA 1	FAMIGLIA 2	FAMIGLIA 3
		0.9	0.2	1.8
Condizioni delle discontinuità	Scabrezza	4	3	3
	Persistenza	3÷10m	3÷10m	3÷10m
	Alterazione	Debole alterazione	Debole alterazione	Debole alterazione
	Apertura	Chiusa	Chiusa	Aperta
	Riempimento	Assente	Assente	Quarzo 3 cm
Venute d'acqua	stillicidi			

Tabella 6: dati di input per caratterizzazione dell'ammasso roccioso

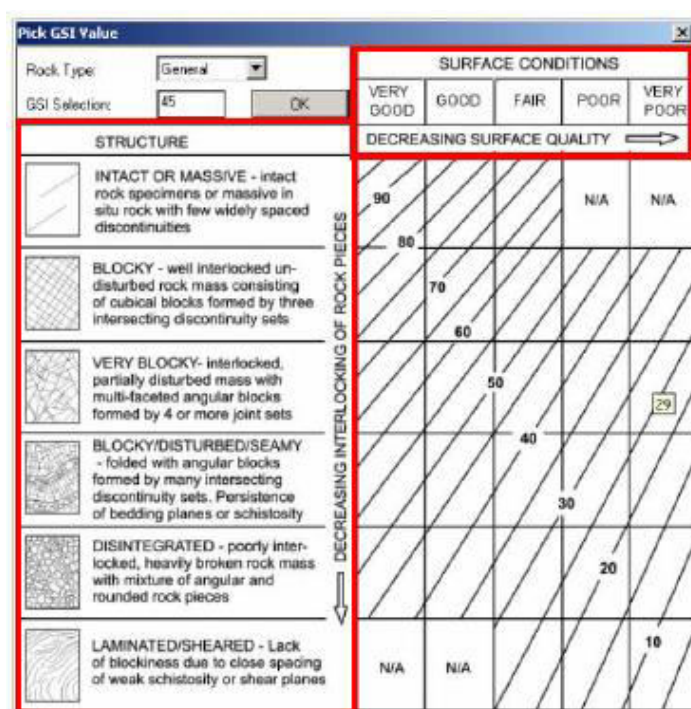


Figura 4: indice GSI

In presenza di ammassi di buona qualità, per i quali è possibile determinare un valore attendibile di RMR, il GSI può essere calcolato direttamente dal valore di RMR, avendo posto il parametro P5 pari a 15, mediante la relazione:

$$GSI = RMR - 5$$

Il criterio di Hoek-Brown è un criterio di resistenza non lineare, espresso nel piano delle tensioni principali σ_1 - σ_3 , utilizzato in genere per gli ammassi rocciosi, ma che può essere utilizzato anche per caratterizzare la roccia intatta.

La sua espressione è la seguente:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b * \sigma_{ci} * \sigma_3 + s_b * \sigma_{ci}^2)^\alpha$$

Il termine σ_{ci} rappresenta la resistenza a compressione monoassiale della matrice rocciosa.

I parametri m_b , s_b e α sono invece termini caratteristici dell'ammasso roccioso e si ricavano a partire dai parametri relativi alla matrice rocciosa (ossia m_i), che sono però corretti in funzione dell'indice GSI e del cosiddetto grado di disturbo D. questo ultimo termine esprime l'effetto di danneggiamento e di variazione nello stato tensionale che si ha nell'ammasso roccioso per effetto dell'esecuzione dello scavo e dipende dalla tecnica che si adopera.

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s_b = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

Analisi e Calcolo dati

Calcolo del RMR e GSI

In allegato 4 sono riportati i vari punteggi atti alla determinazione dell'indice RMR 5.

A seguito dell'analisi dei dati in possesso, si giunge quindi alla classificazione dell'ammasso roccioso per ogni famiglia di discontinuità, ossia alla determinazione del valore degli indici RMR e GSI (tab.8).

Si rimanda all'allegato 5 per i dettagli di calcolo.

	Famiglia 1	Famiglia 2	Famiglia 3
RMR 5	62	55	52
GSI	68	61	58

Tabella 8: indici RMR e GSI

Determinazione dei parametri di resistenza e deformabilità con il criterio di Hoek-Brown

In seguito, si procede al calcolo dei parametri dell'ammasso roccioso, secondo il criterio di Hoek-Brown. Sfruttando le formulazioni indicate in precedenza, si ottengono i seguenti valori di tabelle 9-11, che sono distinti in base alle famiglie di discontinuità che si prendono in considerazione.

FAMIGLIA 1			
PICCO		RESIDUO	
m_b	0.88	m_b	2.89
s	0.01	s	0.01
α	0.50	α	0.50

Tabella 9: parametri criterio di H-B

FAMIGLIA 2			
PICCO		RESIDUO	
m_b	0.63	m_b	2.07
s	0.01	s	0.01
α	0.50	α	0.50

Tabella 10: parametri criterio di H-B

FAMIGLIA 3			
PICCO		RESIDUO	
m_b	0.55	m_b	1.80
s	0.00	s	0.00
α	0.50	α	0.50

Tabella 11: parametri criterio di H-B

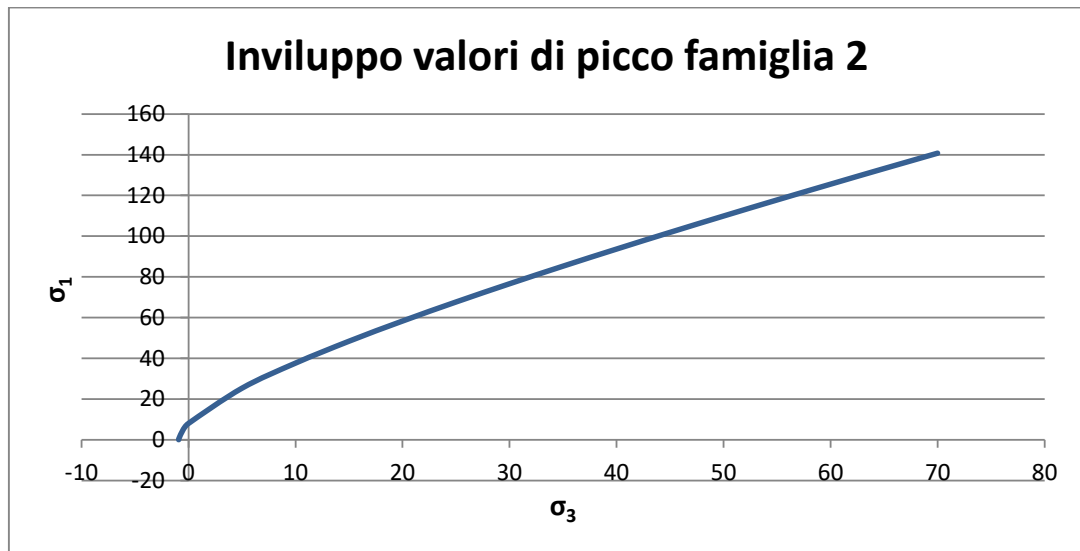


Grafico 17: inviluppo di resistenza di picco

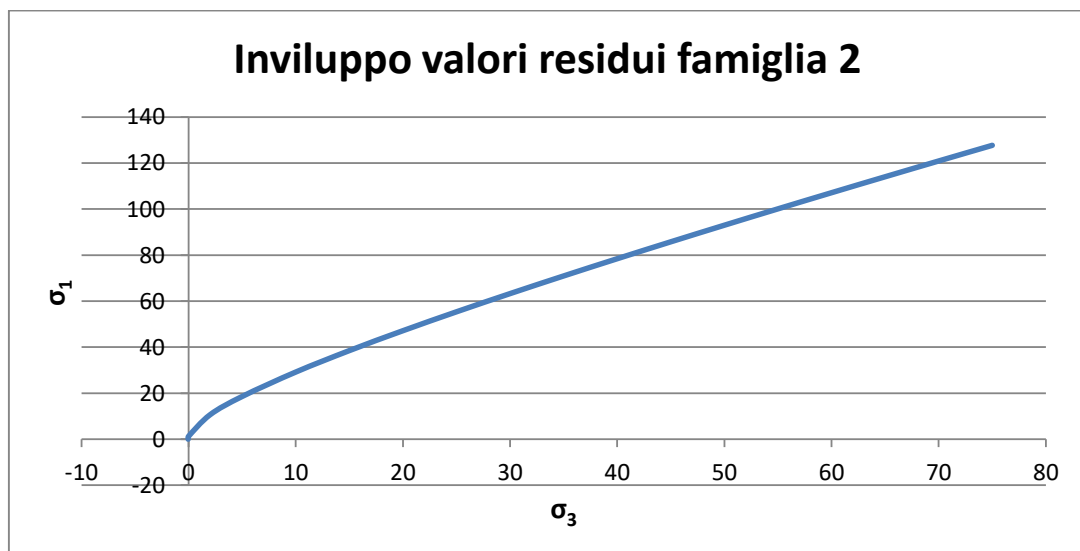


Grafico 18: inviluppo di resistenza residuo

Per la determinazione dei parametri di resistenza mediante il criterio di Mohr-Coulomb, è possibile operare la linearizzazione del criterio di Hoek-Brown, considerando un intervallo opportuno di tensione compreso tra 0 e $0,25\sigma_c$, come consigliato dagli Autori. In questo intervallo si individuano almeno otto valori di σ_3 equamente distribuiti, si valutano i corrispondenti σ_1 e da qui si procede con l'interpolazione lineare (graf.7-8).

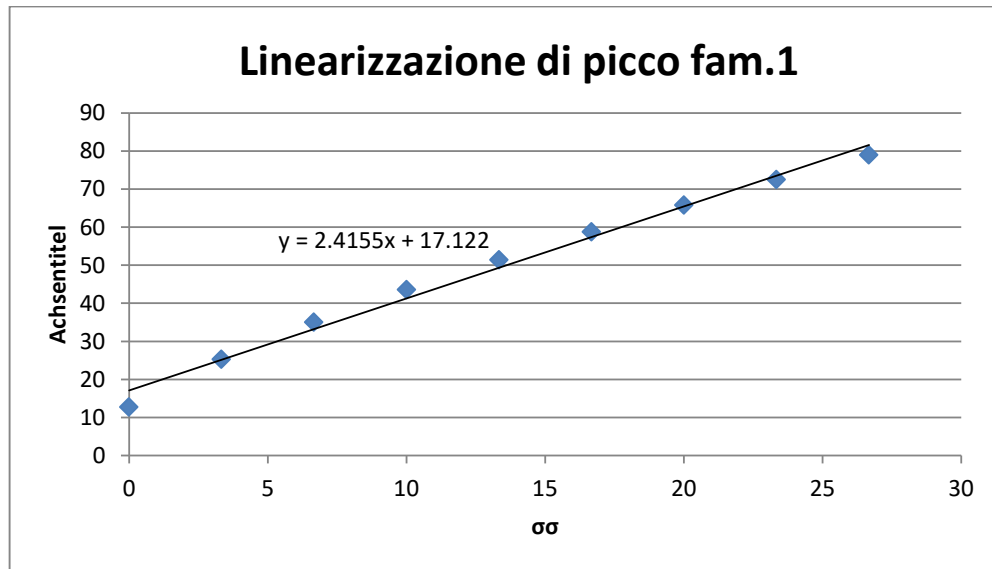


Grafico 21: linearizzazione di picco

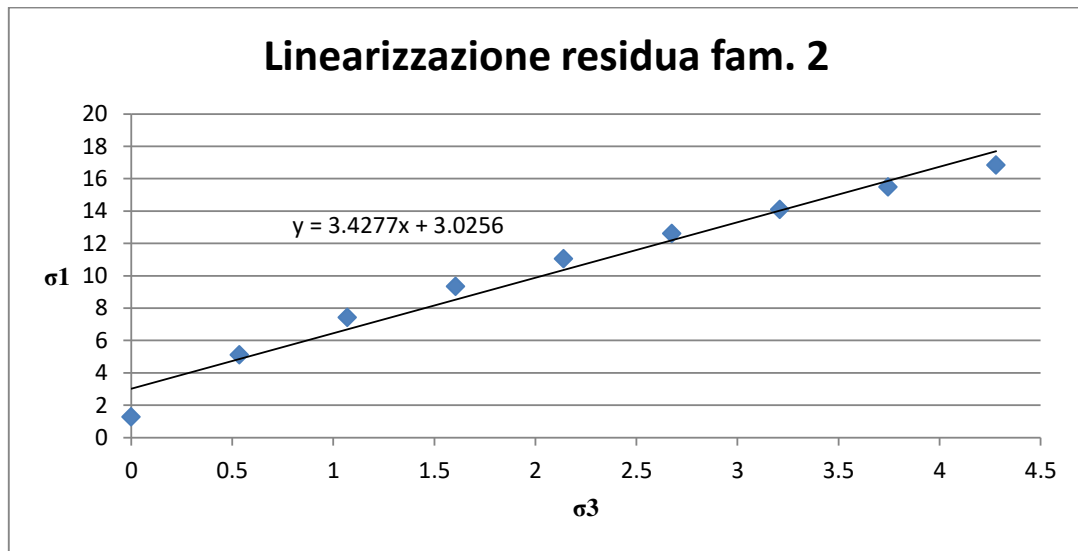


Grafico 24: linearizzazione residua

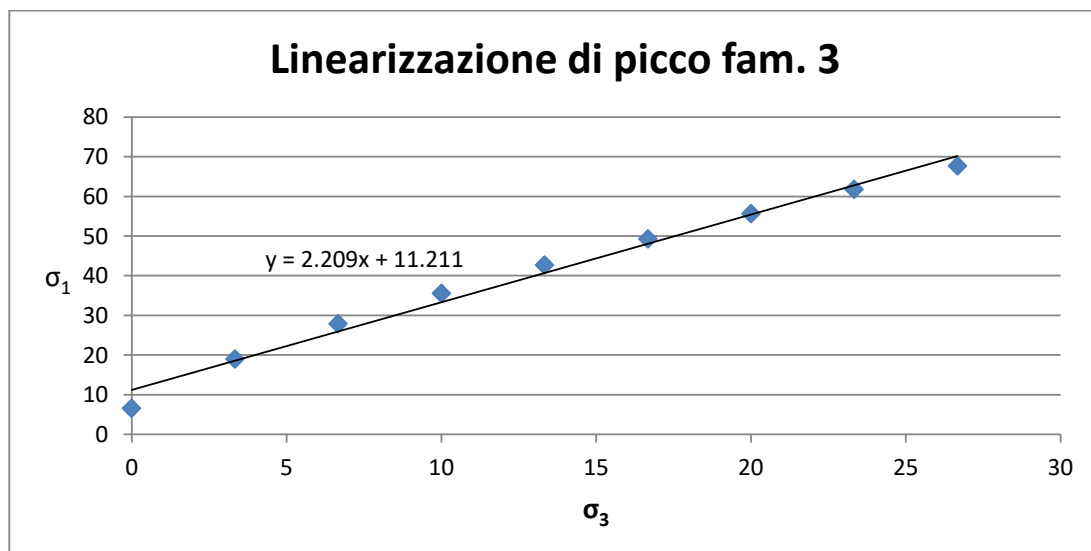


Grafico 25: linearizzazione di picco

In questo modo, si ottengono le seguenti rappresentazioni grafiche del criterio di Barton – Bandis per le diverse famiglie di discontinuità.

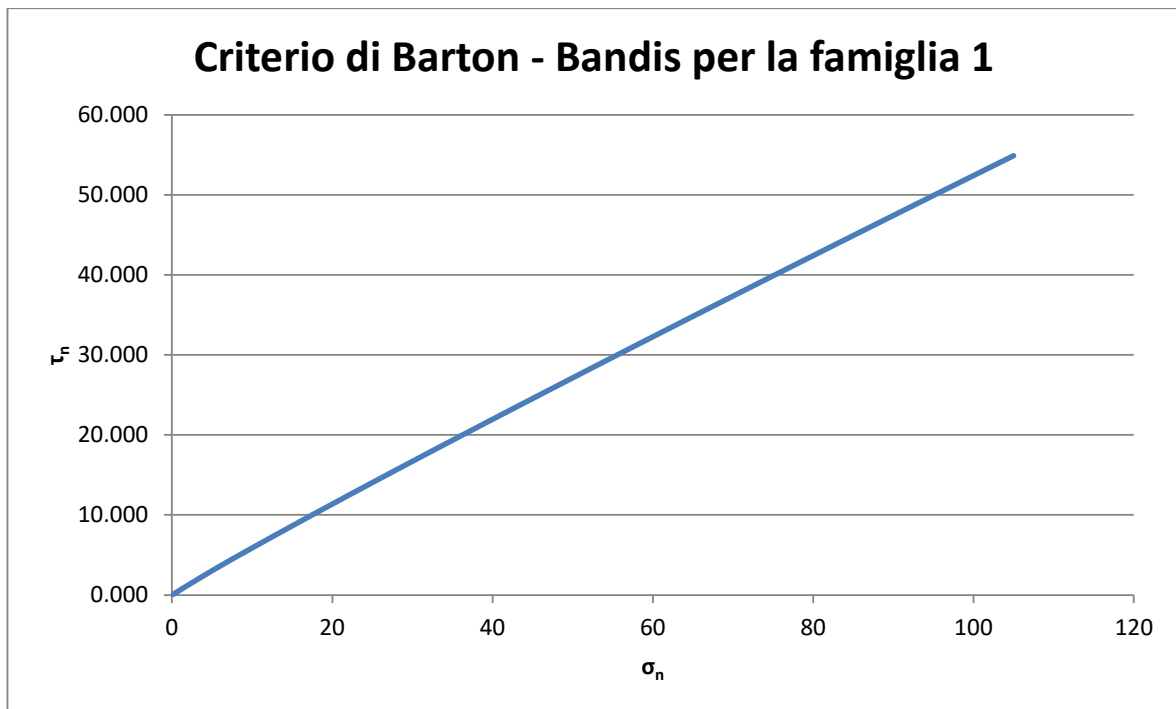


Grafico 27: involucro criterio di Barton

Conclusioni

Lo studio svolto ha portato ad una conoscenza dettagliata dell'ammasso roccioso in questione, sia per ciò che riguarda le caratteristiche meccaniche della matrice rocciosa di cui è costituito, sia dal punto di vista delle discontinuità che lo interessano. Si ha anche un buon numero di informazioni, in base agli strumenti attualmente in uso, riguardo il comportamento dell'intero ammasso roccioso, descritto dagli indici RMR e GSI.

Quello che si può senz'altro notare è che, sono stati rilevati valori molto simili per quello che riguarda le caratteristiche meccaniche delle singole discontinuità presenti nelle 3 famiglie individuate.

I tre sistemi che sono stati individuati, influenzano in maniera molto simile il comportamento dell'intero ammasso roccioso; gli indici di qualità variano infatti in un range molto ristretto, (come riportati nella Tabella 6), e, nell'ambito di una descrizione qualitativa basata sull'indice RMR, rientrano nelle 2 categorie adiacenti di qualità medio-buona con un punteggio che varia da 58 a 68.

Le informazioni contenute in questo rapporto possono fornire una base solida sulla quale fondare uno studio di stabilità dell'ammasso in questione, una valutazione sulla scelta di determinati sistemi di intervento sul fronte, una ricerca di possibili fenomeni franosi, o ancora per prevedere gli elementi di supporto-sostegno necessari alla sicurezza di scavi in galleria.

Allegati

Allegato 1

Si riportano in allegato 1 i dati contenuti nel file *strut1516.xls*, contenenti le giaciture delle discontinuità e le relative caratteristiche (dip, dip direction, spaziatura, apertura, Joint Roughness Coefficient, riempimento).

Discontinuità	Dip [°]	Dip direction [°]	Spaziatura [m]	Apertura	JRC	Riempimento
1	48,31	161,64	0,1	chiusa	2	assente
2	49,93	162,51	0,1	chiusa	2	assente
3	43,97	165,01	0,1	chiusa	2	assente
4	51,59	150,93	0,1	chiusa	2	assente
5	48,53	151,15	0,1	chiusa	2	assente
6	38,17	159,58	0,1	chiusa	2	assente
7	40,62	151,58	0,1	chiusa	2	assente
8	45,09	163,39	0,1	chiusa	2	assente
9	49,82	160,69	0,1	chiusa	2	assente
10	52,76	148,30	0,1	chiusa	2	assente
11	46,43	161,19	0,1	chiusa	2	assente
12	37,92	166,75	0,1	chiusa	2	assente
13	46,09	153,00	0,1	chiusa	2	assente
14	38,53	161,66	0,1	chiusa	2	assente
15	40,93	165,29	0,1	chiusa	2	assente
16	50,18	156,49	0,1	chiusa	3	assente
17	44,55	156,72	0,1	chiusa	3	assente
18	37,63	163,31	0,1	chiusa	3	assente
19	49,91	155,30	0,1	chiusa	3	assente

45	46,19	153,77	0,3	chiusa	4	assente
46	49,11	157,63	0,3	chiusa	4	assente
47	40,66	153,49	0,3	chiusa	4	assente
48	38,27	156,64	0,3	chiusa	4	assente
49	38,18	154,95	0,3	chiusa	4	assente
50	52,35	159,00	0,3	chiusa	4	assente
51	50,77	165,58	0,3	chiusa	4	assente
52	45,45	161,16	0,3	chiusa	4	assente
53	49,04	165,19	0,3	chiusa	4	assente
54	45,65	164,23	0,3	chiusa	4	assente
55	41,61	167,25	0,3	chiusa	2	assente
56	40,85	162,16	0,3	chiusa	2	assente
57	45,89	154,77	0,3	chiusa	2	assente
58	46,96	148,62	0,3	chiusa	2	assente
59	44,87	148,04	0,3	chiusa	2	assente
60	47,23	156,77	0,3	chiusa	2	assente
61	57,76	128,79	0,8	chiusa	4	assente
62	55,17	141,76	0,8	chiusa	4	assente
63	60,14	133,40	0,8	chiusa	4	assente
64	62,86	135,20	0,8	chiusa	4	assente
65	55,93	137,90	0,8	chiusa	4	assente
66	59,26	141,26	0,8	chiusa	4	assente
67	56,81	133,84	0,8	chiusa	4	assente
68	61,28	131,42	0,8	chiusa	4	assente
69	56,77	137,61	0,8	chiusa	4	assente

95	59,58	142,37	0,9	chiusa	3	assente
96	55,77	128,58	0,9	chiusa	3	assente
97	62,11	134,97	0,9	chiusa	3	assente
98	57,79	132,08	0,9	chiusa	3	assente
99	59,72	131,49	0,9	chiusa	3	assente
100	59,72	136,74	0,9	chiusa	3	assente
101	58,99	146,44	0,9	chiusa	3	assente
102	61,22	134,62	0,9	chiusa	3	assente
103	58,83	128,19	1	chiusa	6	assente
104	58,31	138,77	1	chiusa	6	assente
105	56,73	141,69	1	chiusa	6	assente
106	57,79	142,42	1	chiusa	6	assente
107	55,05	137,56	1	chiusa	6	assente
108	58,34	135,48	1	chiusa	6	assente
109	60,24	142,89	1	chiusa	6	assente
110	53,82	141,01	1	chiusa	6	assente
111	53,10	127,42	1	chiusa	6	assente
112	56,88	134,03	1	chiusa	6	assente
113	62,64	140,57	1	chiusa	6	assente
114	54,17	146,81	1	chiusa	6	assente
115	59,70	142,36	1	chiusa	6	assente
116	58,60	138,23	1	chiusa	6	assente
117	61,23	146,16	1	chiusa	6	assente
118	57,42	138,31	1	chiusa	6	assente
119	56,65	143,68	1	chiusa	6	assente

145	74,11	192,53	2	aperta	2	quarzo 3 cm
146	70,56	189,21	2	aperta	2	quarzo 3 cm
147	67,49	182,33	2	aperta	2	quarzo 3 cm
148	74,74	174,16	2	aperta	2	quarzo 3 cm
149	69,17	172,70	2	aperta	2	quarzo 3 cm
150	65,01	174,59	2	aperta	2	quarzo 3 cm
151	75,38	165,44	2	aperta	4	quarzo 3 cm
152	66,79	173,35	2	aperta	4	quarzo 3 cm
153	75,02	172,60	2	aperta	4	quarzo 3 cm
154	64,49	171,46	2	aperta	4	quarzo 3 cm
155	68,59	168,64	2	aperta	4	quarzo 3 cm
156	76,05	178,32	2	aperta	4	quarzo 3 cm
157	67,96	184,46	2	aperta	4	quarzo 3 cm
158	74,34	175,68	2	aperta	4	quarzo 3 cm
159	76,54	178,31	2	aperta	4	quarzo 3 cm
160	67,80	169,82	2	aperta	4	quarzo 3 cm
161	74,28	182,46	2	aperta	4	quarzo 3 cm
162	67,11	187,04	1	aperta	4	quarzo 3 cm
163	73,07	178,68	1	aperta	4	quarzo 3 cm
164	75,86	184,98	1	aperta	4	quarzo 3 cm
165	69,88	173,69	1	aperta	4	quarzo 3 cm
166	64,55	185,01	0,9	aperta	4	quarzo 3 cm
167	70,21	177,25	0,9	aperta	4	quarzo 3 cm
168	76,41	167,22	0,9	aperta	4	quarzo 3 cm
169	62,46	192,00	0,9	aperta	4	quarzo 3 cm

195	73,44	72,44	2	chiusa	3	assente
196	155,97	79,94	2	chiusa	3	assente
197	142,34	17,97	2	chiusa	3	assente
198	143,48	55,67	2	chiusa	3	assente
199	43,91	26,30	2	chiusa	3	assente
200	105,25	64,62	2	chiusa	3	assente
201	112,05	70,80	2	chiusa	3	assente
202	38,58	18,76	2	chiusa	3	assente
203	114,61	26,18	2	chiusa	3	assente
204	26,28	68,51	2	chiusa	3	assente
205	59,97	69,20	0,5	chiusa	6	assente
206	13,12	67,75	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
207	111,81	50,45	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
208	75,68	25,39	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
209	26,25	52,68	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
210	85,42	39,62	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
211	177,38	47,53	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
212	185,80	30,30	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
213	39,73	54,80	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
214	67,27	4,60	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
215	77,46	34,14	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
216	64,63	55,39	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
217	116,58	39,51	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
218	61,49	75,87	0,5	aperta	6	quarzo 3 cm
219	48,43	20,01	0,5	aperta	5	quarzo 3 cm

Allegato 2

Si riportano i grafici relativi alle caratteristiche delle famiglie di discontinuità determinate nel cap.1.

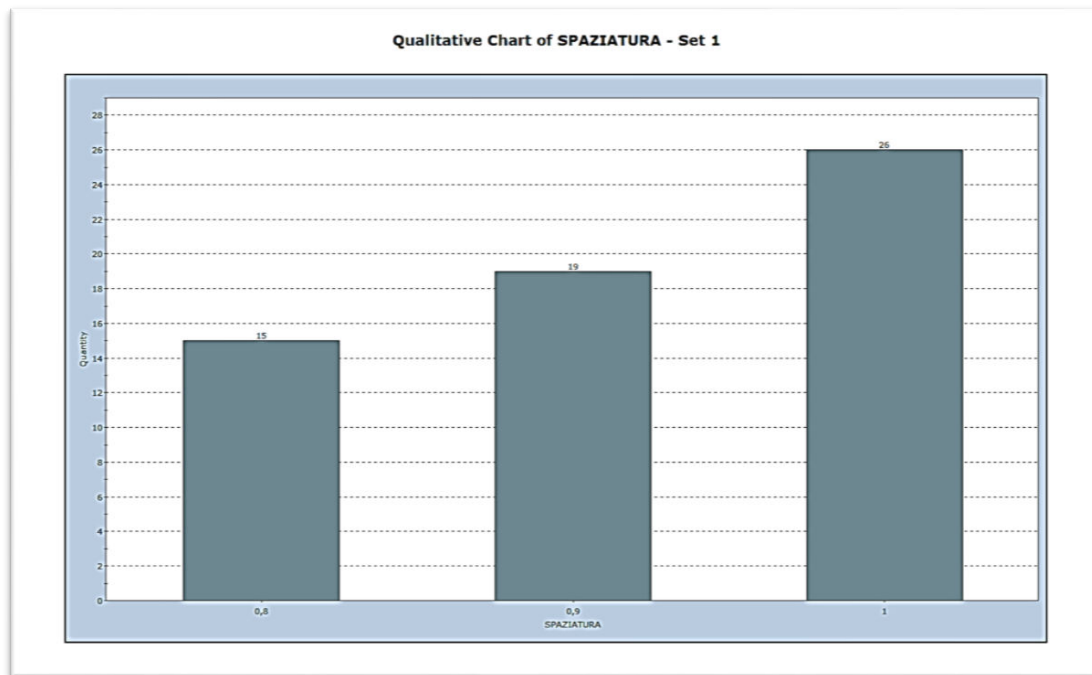


Figura 5: spaziatura famiglia 1

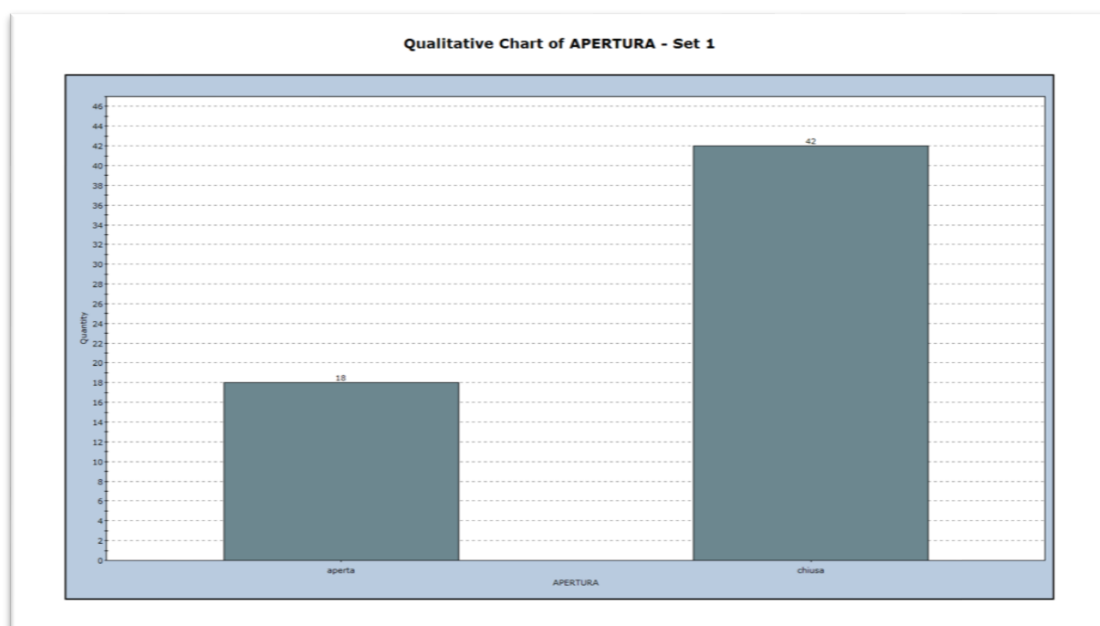


Figura 6: apertura famiglia 1

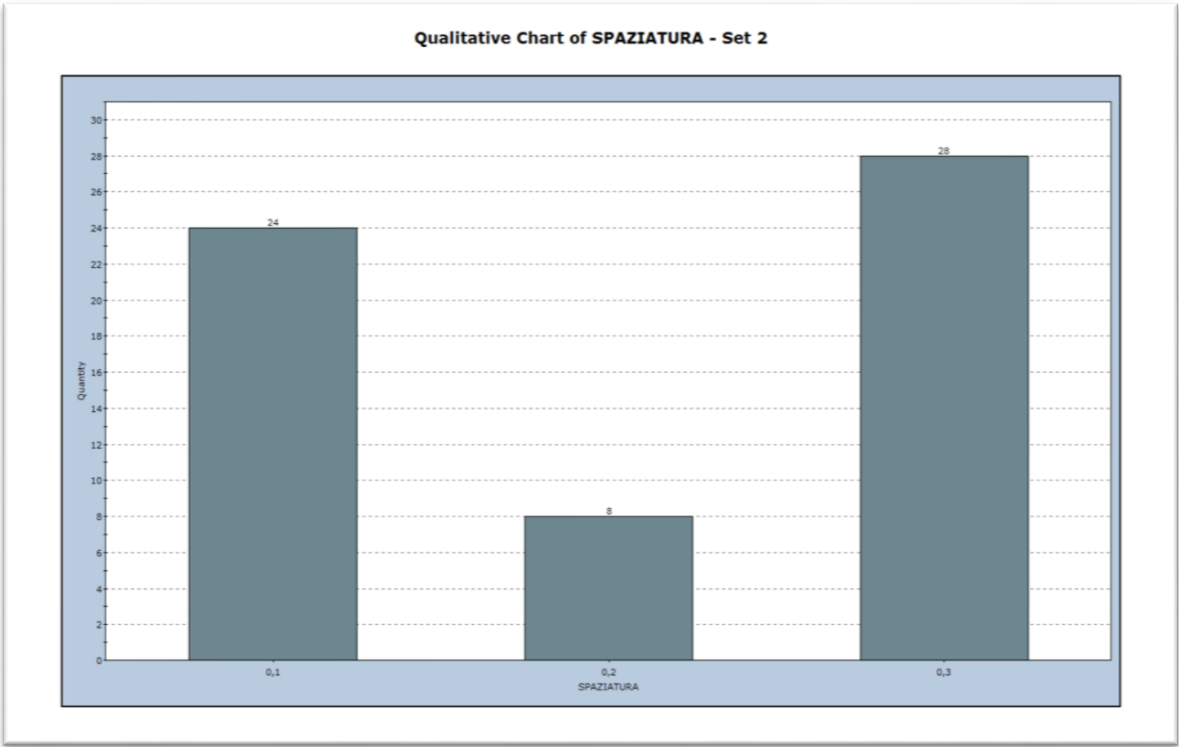


Figura 9: spaziatura famiglia 2

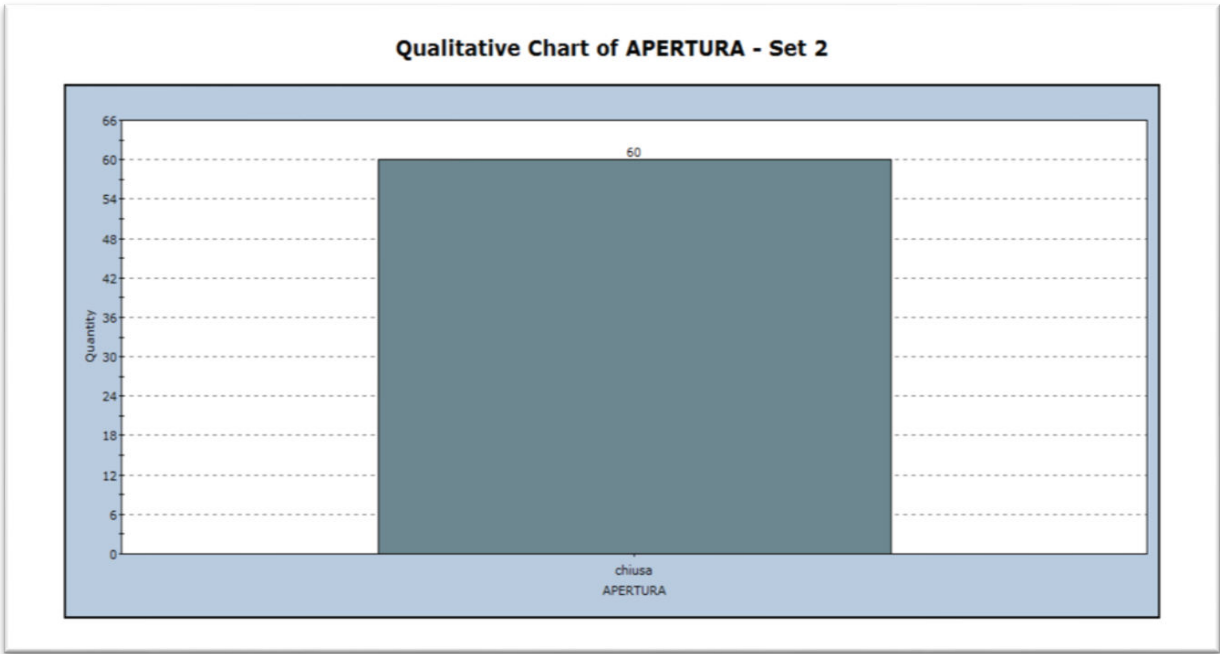


Figura 10: apertura famiglia 2

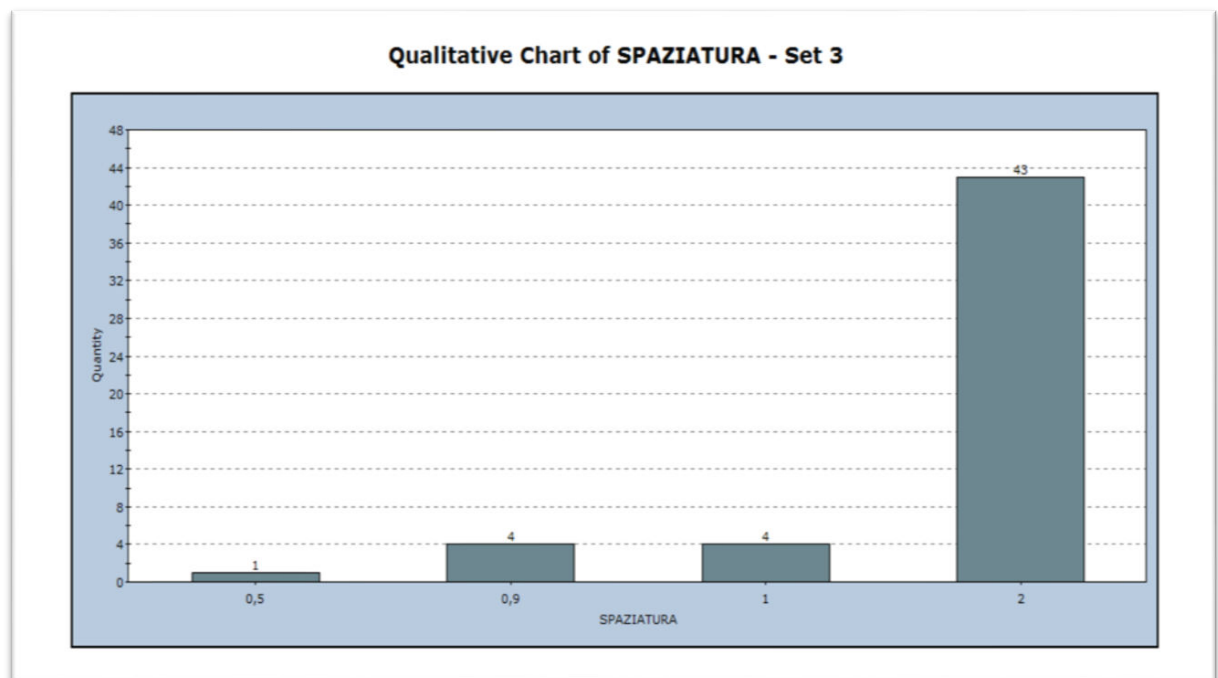


Figura 14: spaziatura famiglia 3

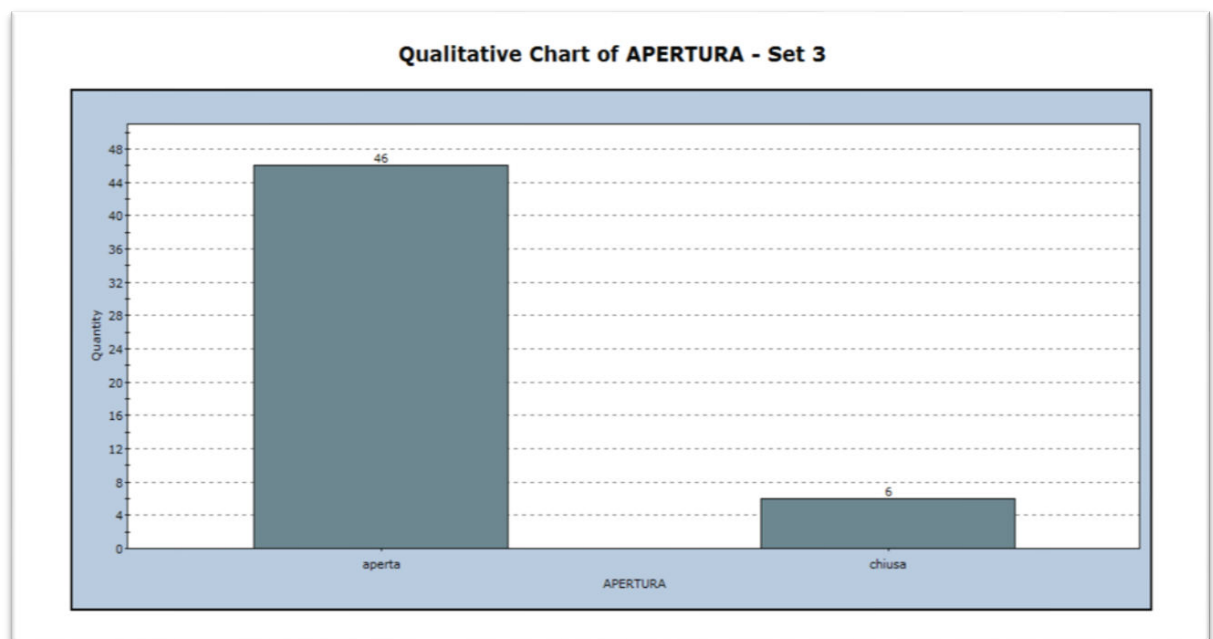


Figura 13: apertura famiglia 3

Allegato 3

Risultati di prove di compressione monoassiale, compressione triassiale e trazione indiretta, effettuati in laboratorio.

σ_3 (MPa)	$\sigma_{1\text{picco}}$ (MPa)	$\sigma_{1\text{residuo}}$ (MPa)
0,00	90,81	
0,00	87,63	
0,00	105,88	
0,00	64,47	
0,00	43,15	
0,00	65,81	
0,00	161,16	21,8
0,00	131,80	7,73
7,50	91,25	36,66
10,00	122,48	59
10,00	137,75	67,8
12,00	193,33	62,11
2,50	90,35	18,38
5,00	61,65	23,47
7,50	91,24	44,1
10,00	131,19	56,73
12,00	68,64	47,42
12,00	201,76	87,48
5,00	77,43	34,19
7,50	125,60	54,41
10,00	79,60	64,7
2,50	67,83	21,07
2,50	143,40	40,13
2,50	204,92	50,7
5,00	207,32	58,2
-14,53	43,59	
-20,58	61,74	
-22,29	66,87	
-19,33	57,99	
-19,18	57,54	
-15,23	45,69	
-14,48	43,44	
-7,37	22,11	
-7,43	22,29	
-8,35	25,05	

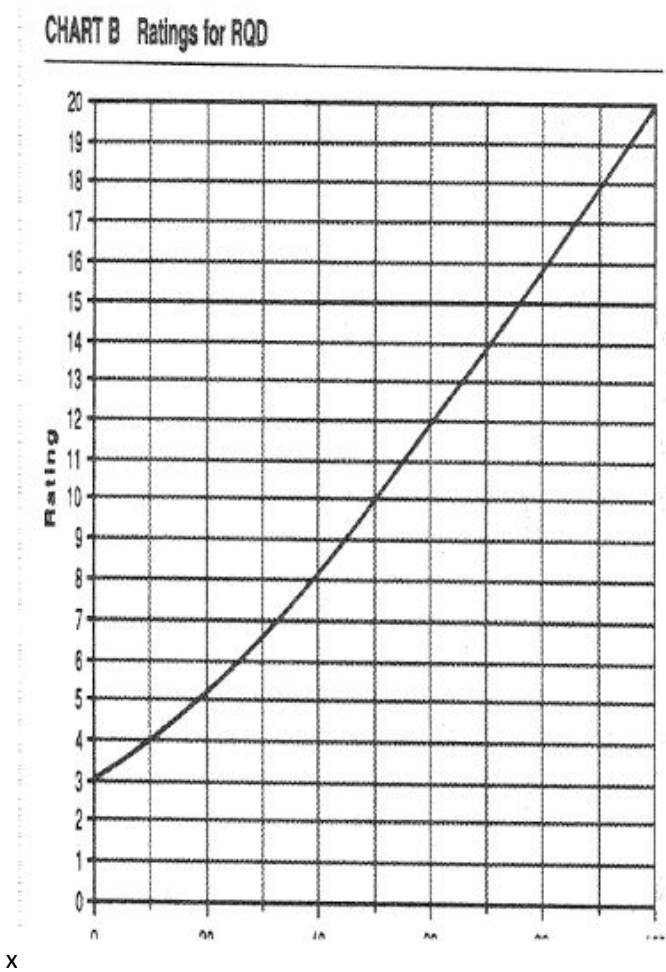


Tabella 15: RQD

Spaziatura media [m]	<0.06	0.06÷0.2	0.2÷0.6	0.6÷2	>2
Punteggio	5	8	10	15	20

Tabella 16: spaziatura media

Allegato 5

In questo allegato si riportano le tabelle contenenti i calcoli per la stima dei parametri del metodo di classificazione RMR e GSI

	Famiglia 1		parametro stimato
P1	Resistenza a compressione monoassiale [MPa]	106.71	10
P2	RQD	70%	14
P3	spaziatura [m]	0.9	14
P4	scabrezza	4	1
	persistenza	3÷10 m	2
	alterazione	debolmente alterata	5
	apertura	chiuse	6
	riempimento	assente	6
P5	venute d'acqua	stillicidi	4
RMR 5	CLASSE 2	BUONA	62

Tabella 18: stima dei parametri fam.1

	Famiglia 2		parametro stimato
P1	Resistenza a compressione monoassiale [Mpa]	106.71	10
P2	RQD	70%	14
P3	spaziatura [m]	0.2	8
P4	scabrezza	3	0
	persistenza	3÷10 m	2
	alterazione	debolmente alterata	5
	apertura	chiuse	6
	riempimento	assente	6
P5	venute d'acqua	stillicidi	4
RMR 5	CLASSE 3	MEDIA	55

Tabella 19: stima dei parametri fam.2

	Famiglia 2		parametro stimato
P1	Resistenza a compressione monoassiale [Mpa]	106.71	10
P2	RQD	70%	14
P3	spaziatura [m]	0.2	8
P4	scabrezza	3	0
	persistenza	3÷10 m	2
	alterazione	debolmente alterata	5
	apertura	chiuse	6
	riempimento	assente	6
P5	venute d'acqua	stillicidi	15
RMR 5	CLASSE 3	MEDIA	66
		GSI	61

Tabella 22: stima dei parametri fam.2

	Famiglia 3		parametro stimato
P1	Resistenza a compressione monoassiale [Mpa]	106.71	10
P2	RQD	70%	14
P3	spaziatura [m]	1.8	19
P4	scabrezza	3	0
	persistenza	3÷10 m	2
	alterazione	debolmente alterata	5
	apertura	aperta	0
	riempimento	quarzo 3 cm	2
P5	venute d'acqua	stillicidi	15
RMR 5	CLASSE 3	MEDIA	67
		GSI	62

Tabella 23: stima dei parametri fam.3

Premessa

Il presente rapporto si prefigge di analizzare la stabilità di un versante situato nell'ammasso roccioso oggetto di caratterizzazione del Rapporto 1. Il versante è soggetto a fenomeni di scivolamento di volumi di roccia e caduta massi.

La prima parte quindi riguarderà l'analisi di stabilità per caduta massi, mentre la seconda parte considererà la stabilità del versante per quanto concerne lo scivolamento planare.

Materiale	Coefficiente di restituzione normale	Coefficiente di restituzione tangente	Angolo di attrito
Copertura con vegetazione	0.24	0.73	30°
Affioramento roccioso	0.40	0.85	30°
Copertura detritica	0.30	0.80	28°
Torrente	0.01	0.01	0.01°

Tabella 2: caratteristiche materiali

Ai parametri di Tabella 2 saranno assegnate delle opportune distribuzioni statistiche mentre il volume caratteristico di progetto sarà posto pari a 5 m³.

Per quel che riguarda la velocità iniziale del blocco si ipotizza una componente orizzontale pari a 0.7 m/s (con distribuzione normale, ponendo la deviazione standard pari a 0.1 m/s) e una componente verticale pari a 0 m/s.

Le aree di distacco dei blocchi possono essere ipotizzate nel tratto di versante dal vertice 8 al vertice 19.

Cenni metodologici e teorici

In sede preliminare, si esegue un'analisi dinamica di caduta massi, che consiste nell'individuazione dei blocchi potenzialmente instabili e nello studio del relativo cinematismo.

Il primo aspetto corrisponde a individuare la cosiddetta nicchia di distacco, ossia l'area del pendio dalla quale può avvenire il distacco di blocchi. Essa si individua mediante analisi di tipo geomorfologico e rilievi geostrutturali, volti a individuare la giacitura delle discontinuità.

Lo studio del cinematismo si prefigge di prevedere la traiettoria di caduta, l'energia cinetica, la velocità e il punto di arresto dei massi a valle. In realtà, il moto del blocco è estremamente complesso e può essere suddiviso in diverse componenti.

- Traiettoria aerea, in cui il blocco si muove liberamente nell'aria secondo un cinematismo di caduta a gittata o di caduta libera, in funzione della velocità iniziale.
- Impatto del blocco contro il pendio.
In questa fase hanno rilevanza le caratteristiche geometriche e il peso del blocco (che determina l'energia cinetica) e le caratteristiche meccaniche dei materiali a contatto.

Una volta eseguita l'analisi di caduta, si può procedere alla progettazione dell'opera di difesa, in questo caso una barriera paramassi.

Il suo dimensionamento si basa su una serie di parametri caratteristici, definiti dalla Norma ETAG 027, quali il contenuto energetico, la velocità, l'altezza di volo e la distanza d'arresto, che sono ricavati nell'analisi delle traiettorie di caduta massi.

Come prima operazione, occorre procedere alla scelta del punto in cui posizionare la barriera, basandosi in genere sull'altezza di rimbalzo e l'energia cinetica totale: sapendo che la barriera deve essere posizionata a monte dell'elemento da proteggere, l'operazione si basa in primo luogo su un criterio di economicità, che porta a collocare la barriera in corrispondenza della zona in cui altezza di rimbalzo ed energia assumono valori relativamente bassi. La soluzione però deve essere anche compatibile con le esigenze costruttive, soprattutto dal punto di vista dell'accessibilità.

In seguito, si procede alle verifiche strutturali, secondo le prescrizioni della Norma ETAG027.

La barriera paramassi deve garantire il soddisfacimento di una verifica energetica, secondo cui l'energia di progetto E_p deve essere inferiore all'energia massima E_{BTE} certificata per la barriera (ossia che ha avuto il Benestare Tecnico Europeo), a meno di un fattore di sicurezza γ_E , dipendente dal livello energetico adottato dal produttore nelle prove di certificazione, secondo la seguente formula.

$$E_p - \frac{E_{BTE}}{\gamma_E} \leq 0$$

L'energia di progetto si calcola mediante la definizione di energia cinetica.

$$E_p = \frac{1}{2} m_p v_p^2$$

La velocità di progetto v_p corrisponde al 95° percentile della distribuzione delle velocità nel punto di interesse, moltiplicato per un coefficiente di sicurezza globale γ_f . Quest'ultimo è il prodotto di due coefficienti parziali γ_{Tr} e γ_{Dp} , legati rispettivamente al grado di attendibilità dell'analisi della propagazione e alla precisione della ricostruzione del profilo.

La massa di progetto m_p è invece ricavata a partire dal volume di progetto del blocco moltiplicato per la densità della roccia e corretto con un coefficiente di sicurezza globale γ_m . Quest'ultimo è il prodotto di due coefficienti parziali γ_{VolF1} e γ_γ , legati rispettivamente alla precisione del volume di progetto e alla valutazione della massa dell'unità di volume della roccia.

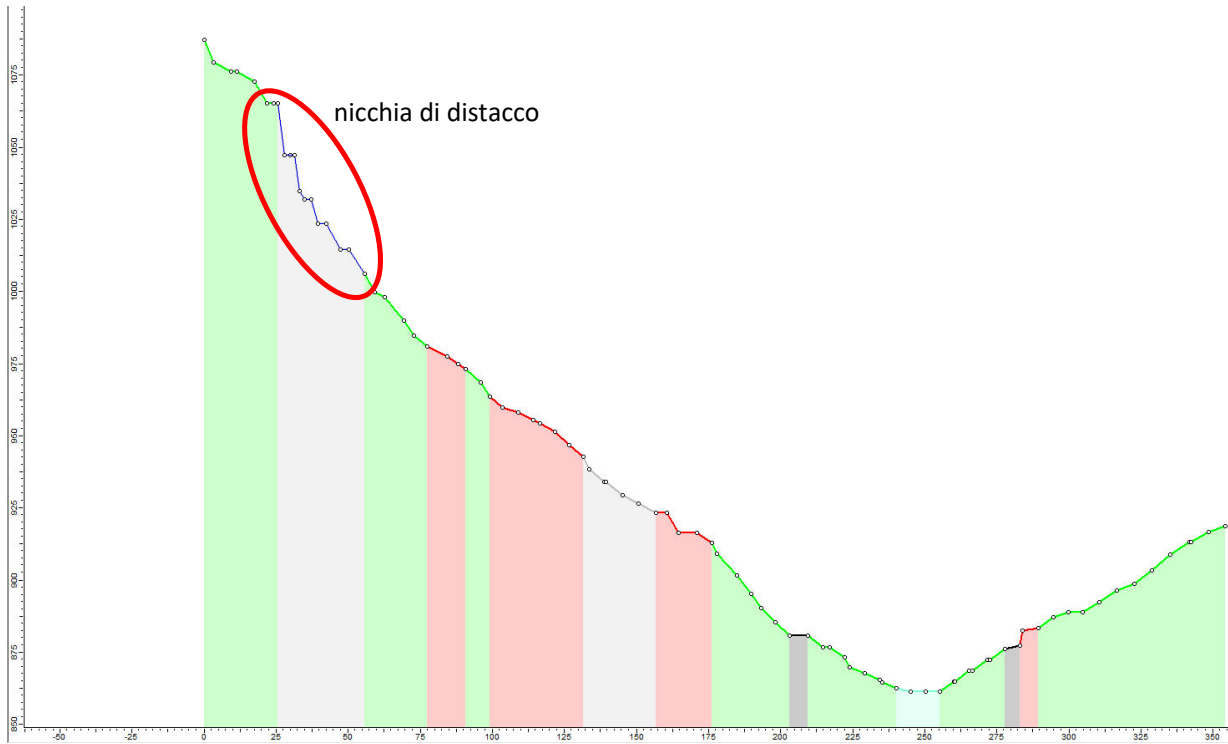


Figura 1: profilo di progetto

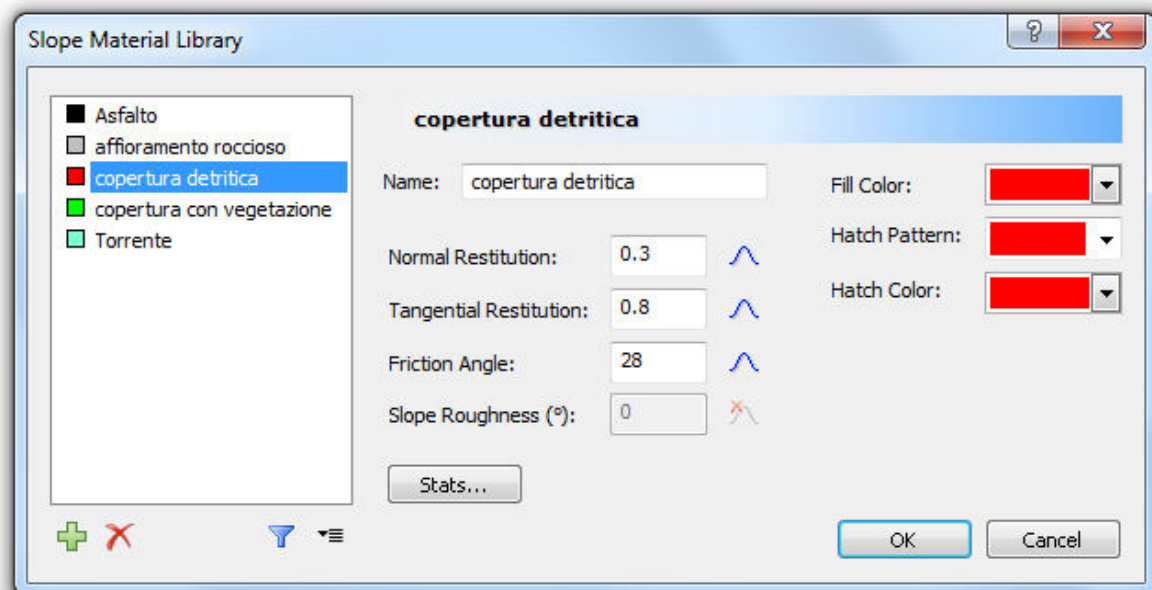


Figura 4: caratteristiche copertura detritica

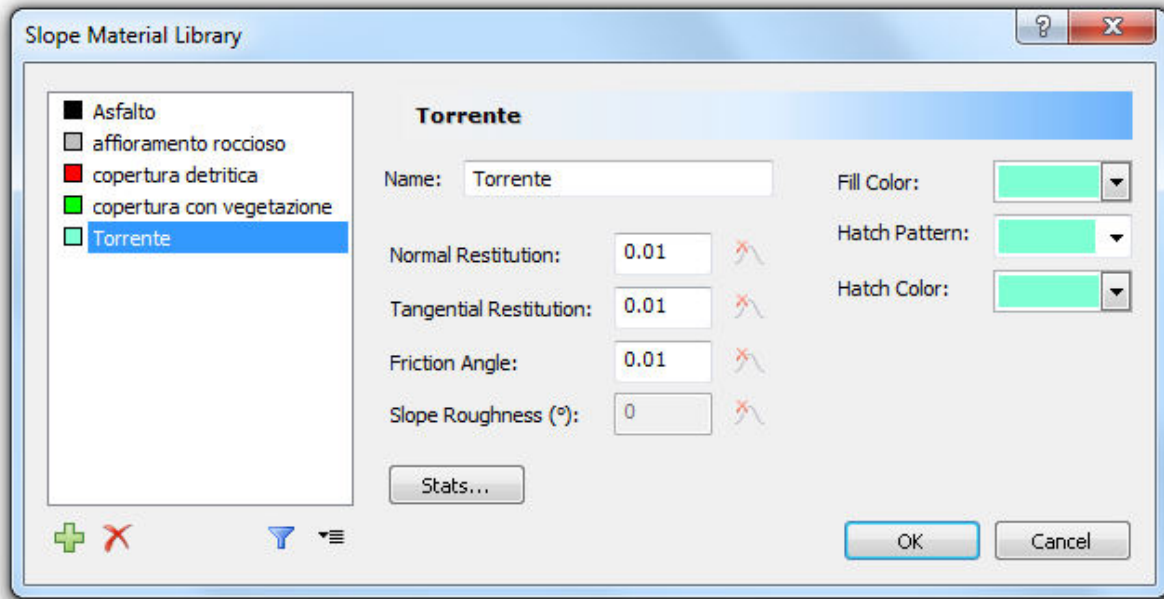


Figura 6: caratteristiche torrente

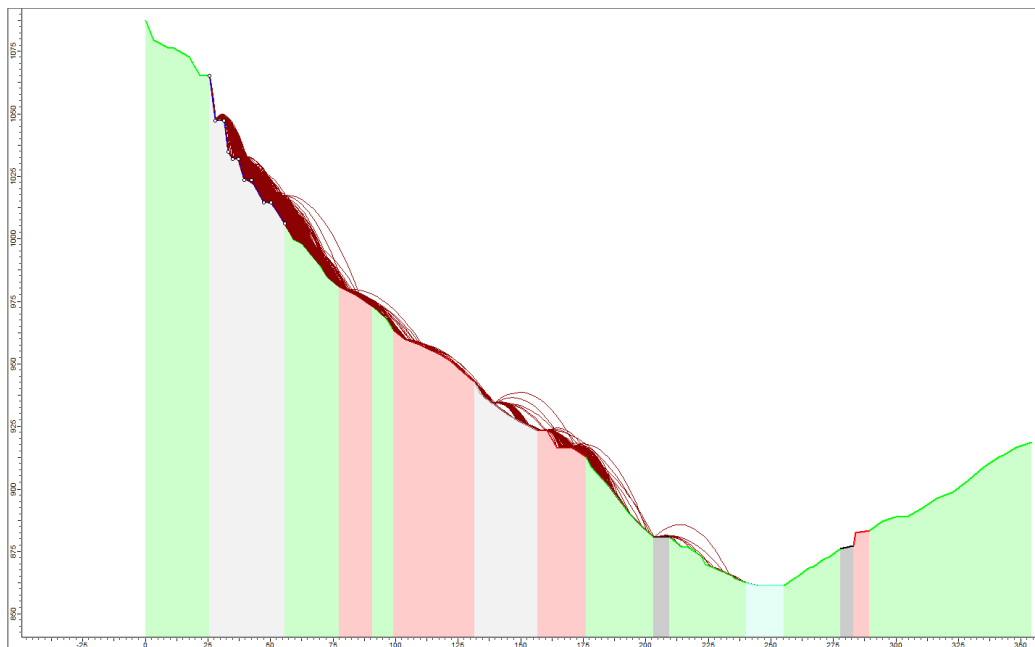


Figura 7: profili di caduta massi

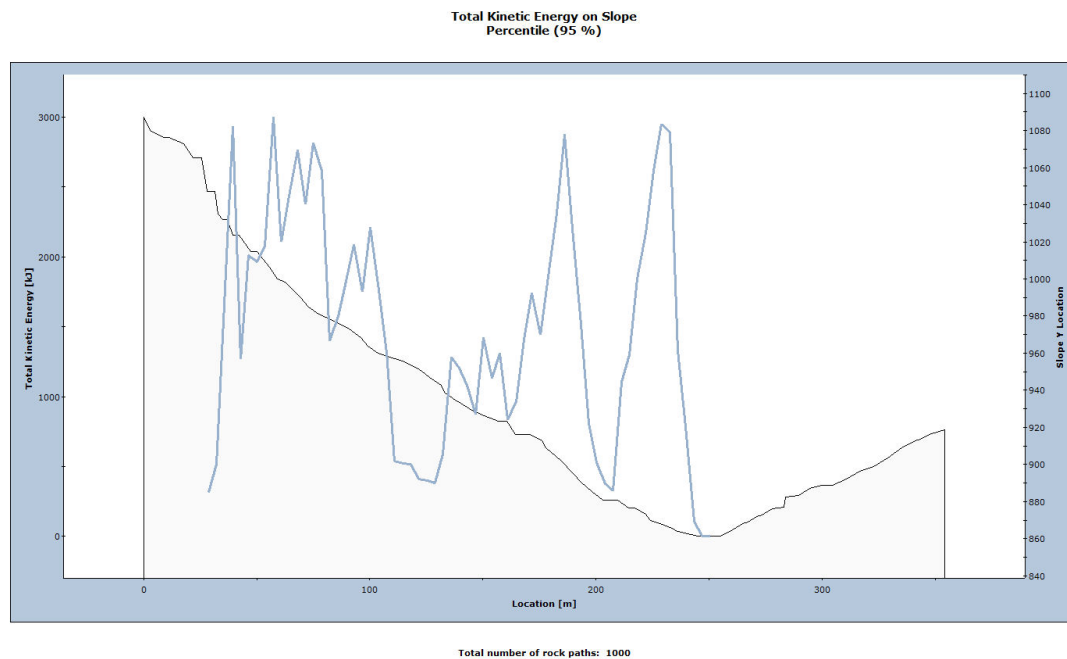


Grafico 2: andamento dell'energia cinetica totale lungo il profilo

Considerati i grafici precedenti, si nota come i suddetti parametri assumano valori molto diversi lungo il profilo: a tratti si raggiungono rimbalzi pari a 11m di altezza e l'energia cinetica raggiunge picchi di 3000KJ. La variabilità di tali dati comunque non risulta essere un problema in quanto in questa fase si va a definire la posizione della barriera paramassi da installare, la quale viene scelta nel rispetto delle condizioni di sicurezza e di economicità, quest'ultima definita in termini di accessibilità al sito e ai mezzi, e, quindi, al fine di ridurre i costi di costruzione. Si sceglie quindi di posizionare la barriera ad un'ascissa pari a X=136m, in quanto più a valle si riscontra la presenza di una strada.

Per tale valore di ascissa si calcola, usando la funzione "collector", la velocità traslazionale caratteristica del blocco, calcolandone il 95° percentile, la quale risulta pari a 13,7 m/s (grafico 3).

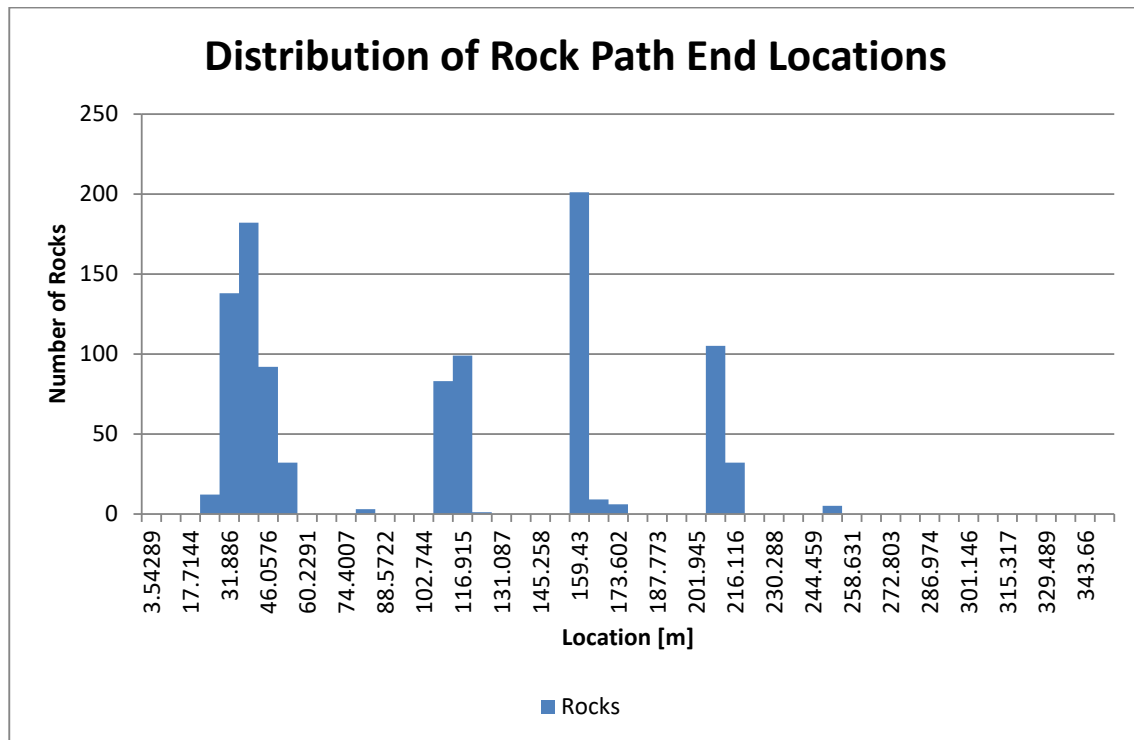


Grafico 4: distribuzione dei punti di arresto lungo il versante

La velocità di progetto dei blocchi viene calcolata a partire dalla velocità corrispondente al frattile del 95% della velocità precedentemente calcolata v_t , secondo la seguente relazione

$$v_p = v_t * \gamma_{Tr} * \gamma_{Dp} = 14,25 \text{ m/s}$$

Assumendo

- $\gamma_{Tr}=1,02$ coefficiente di attendibilità dei calcoli delle traiettorie
- $\gamma_{Dp}=1,02$ coefficiente che tiene conto della qualità di discretizzazione del pendio

La massa del blocco di progetto è definita come il prodotto del volume del blocco di progetto per il peso di volume della roccia moltiplicato per uno specifico fattore di sicurezza (Tab.3)

$$m_p = (Vol_b * \gamma) * \gamma_m$$

Essendo

- l'altezza di intercettazione (h_i), definita come l'altezza della barriera misurata ortogonalmente alla pendenza media del pendio nella zona di montaggio deve essere superiore all'altezza di progetto (h_p)

In tabella 4 si riportano i calcoli

Parametri d'altezza		
h_t	0,31	[m]
f	1,06	[m]
γ_f	1,04	[-]
h_p	0,35	[m]
$h_{p,f}$	1,38	[m]

Tabella 4: altezza di progetto

Deve inoltre essere verificata la seguente disequaglianza

$$h_p - h_i \leq 0$$

A seguito dei calcoli quindi si decide di usare una barriera paramassi in corrispondenza di $x=136m$, alta 4 metri (l'altezza della barriera potrebbe anche essere pari a 2m, ma per un'energia di 2000KJ, il produttore Geobrugg dispone soltanto di reti a partire da 4m) e con un'energia dissipabile pari a 2000KJ, così da soddisfare la verifica di altezza; le caratteristiche di tale barriera e i disegni di progetto, scelta dal sito www.geobrugg.com, Secondo quanto dichiarato dal produttore, le reti paramassi RXE sono sistemi ad elevata resistenza e praticità di montaggio. La rete (sistema ROCCO©) è costituito da anelli (diametro 30-35 cm) di filo d'acciaio ad alta resistenza. I montanti sono costituiti da profilati tipo H in acciaio inossidabile ad alta resistenza incernierati sopra apposite piastre in acciaio.

Le caratteristiche della barriera e gli schemi tecnici sono riportate nell'allegato 1.

La barriera paramassi da installare allora dovrà avere un'energia dissipabile maggiore di quella di progetto del blocco appena calcolata, secondo la verifica

$$E_p - \frac{E_{BTE}}{\gamma_E} \leq 0$$

dove:

Cap. 2 – Analisi di stabilità per scivolamento lungo un piano

Premessa

Documenti e dati consultati

Cenni teorici e metodologici

Lo studio di un fenomeno franoso si articola in diverse fasi, legate ai momenti che caratterizzano lo svilupparsi di tale evento.

Inizialmente, si esegue lo studio dell'innesco, volto a definire le caratteristiche dell'ammasso roccioso in esame e, in particolare, si costituisce di un'analisi geostrutturale finalizzata a individuare le discontinuità presenti.

In seguito, si esegue lo studio dei cinematismi: sulla base dell'orientamento relativo tra le discontinuità e il fronte del pendio, si valuta se esistono le condizioni geometriche perché avvenga un cinematismo. In altri termini, si individuano i solidi che possono mettersi in movimento.

D'altra parte, perché si verifichi effettivamente il cinematismo, è necessario che le azioni instabilizzanti, che tendono a mettere in movimento il blocco, siano superiori alle azioni stabilizzanti. Pertanto, occorre definire un modello geomeccanico, che metta insieme le varie cause che possono portare a instabilità e i parametri della legge costitutiva del materiale, ossia resistenza e deformabilità del materiale.

Il modello geomeccanico porta alla definizione di un metodo di calcolo per la valutazione della stabilità del pendio, con il quale si capisce se effettivamente si verifichi o meno il cinematismo.

Dal punto di vista cinematico, lo scivolamento planare si verifica quando le discontinuità presenti nell'ammasso roccioso presentano i seguenti valori di giacitura rispetto al fronte del pendio.

$$\alpha_d = \alpha_f \pm 20^\circ$$

$$\psi_d < \psi_f$$

Nello scivolamento planare, può anche intervenire un giunto di trazione, ossia una famiglia di giunti subverticali posti nella parte superiore del pendio, che separano il blocco dal resto dell'ammasso roccioso.

Affinché abbiano un ruolo nel cinematismo, è richiesto che il giunto di trazione soddisfi le seguenti condizioni di giacitura.

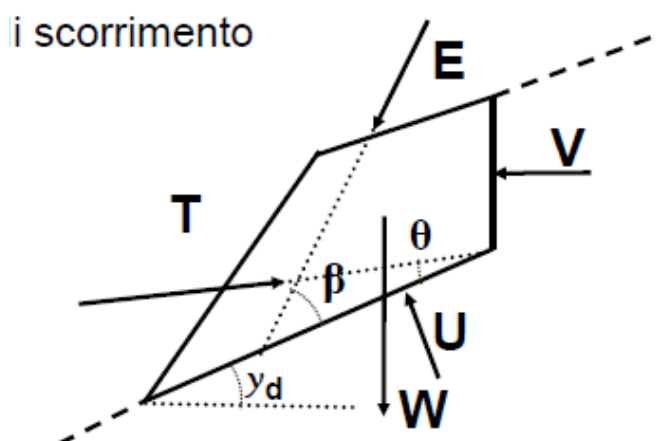


Figura 8: schema delle forze agenti sul pendio

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_d - U - V \sin \psi_d + T \cos \vartheta + E \sin \beta) \tan \varphi}{W \sin \psi_d + V \cos \psi_d - T \cos \vartheta + E \cos \beta}$$

I termini c e φ sono i parametri di resistenza secondo il criterio di Coulomb.

Qualora l'esito della verifica di stabilità sia negativo, occorre adottare un intervento di stabilizzazione, quali i tiranti di ancoraggio.

Il dimensionamento del sistema di ancoraggio prevede, come primo passo, di determinare la forza risultante T che l'insieme dei tiranti deve applicare al blocco per stabilizzarlo. In termini di calcolo, occorre imporre un valore del fattore di sicurezza che sia superiore a 1 (tipicamente 1,3) e, invertendo la relazione, ricavare la forza T corrispondente. Siccome questa forza è espressa per unità di profondità, questa è moltiplicata per lo spessore del blocco, in modo da ottenere la forza complessiva.

Da qui si calcola il tiro agente su ciascun elemento d'ancoraggio, che deve essere calibrato in modo da soddisfare due vincoli.

- Vincolo strutturale: il tiro deve essere inferiore alla resistenza del singolo tirante.
- Vincolo geometrico: per evitare che il blocco si trovi in una configurazione labile, sono necessari almeno 2 tiranti e questi devono formare una maglia avente dimensione minima pari a 1,5 m.

Occorre poi individuare una lunghezza libera sufficiente a garantire che l'ancoraggio attraversi il volume di materiale critico e vada a fondarsi nel materiale sano.

In seguito, si procede alla verifica strutturale del tirante.

La procedura di riferimento è quella suggerita da Bustamante e Doix, che prevede di dimensionare sulla base delle seguenti configurazioni di collasso.

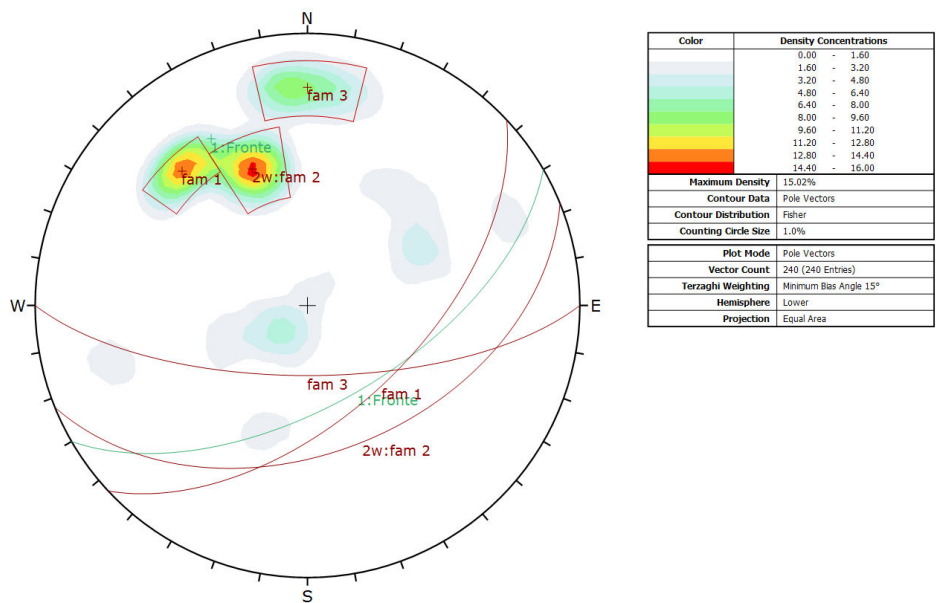


Figura 9: stereogrammi delle famiglie di discontinuità e fronte

Per proseguire nell’analisi occorre tenere presente le seguenti ipotesi:

- il piano superiore del versante può essere ipotizzato orizzontale;
- l’altezza del volume instabile è valutabile pari a 15 m;
- è presente una frattura verticale che libera il volume di roccia a circa 3 m dal ciglio;
- le caratteristiche meccaniche dei piani di discontinuità sono note dal Rapporto1(tabella 5);
- le caratteristiche meccaniche della roccia costituente l’ammasso sono note dall’analisi di caduta massi;
- il volume di roccia considerato è stabile in condizioni di assenza di acqua

Per trovare il valore della coesione si è ipotizzato un ragionamento del seguente tipo: siccome l'ammasso roccioso non è ancora crollato, sicuramente esso presenterà un coefficiente di sicurezza pari ad 1.

Tramite ragionamento inverso prendendo in esame la seguente formula:

formula

Si ricaverà un valore di coesione pari ad 21,85

Tale valore moltiplicato per l'area della discontinuità ci fornisce della forza coesiva

$$c \cdot A = 360,3$$

Allegato 1

SPECIFICATIONS	RXE-500	R1E-500-R ¹	RXE-1000	RXE-2000	RXE-3000	RXE-5000	RXE-8000
Energy category ¹ (ETA/FOEN)	3/2 (500 kJ)	3/2 (500 kJ)	5/3 (1000 kJ)	7/5 (2000 kJ)	8/6 (3000 kJ)	9/8 (5000 kJ)	-/8 (8000 kJ)
Approval no. ETA ²	ETA-13/0025	pending	ETA-13/0225	ETA-13/1047	ETA-14/0362	ETA-11/0305	ETA-12/0213
Certificate no. FOEN ³	S 14-5	pending	S 13-1	S 13-2	S 14-4	S 14-3	pending
CE mark	1301-CPR-1052	pending	1301-CPD-0882	1301-CPR-1002	1301-CPR-1022	1301-CPD-0914	1301-CPD-0915
ROCCO® ring net type	7/3/350	7/3/300	7/3/300	12/3/350	15/3/350	16/3/350	19/3/300
Wire Ø	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Ring Ø	350 mm	300 mm	300 mm	350 mm	350 mm	350 mm	300 mm
Rope Ø	12-18 mm	12-18 mm	16-22 mm	16-22 mm	16-22 mm	20-22 mm	22 mm
Number of U-brakes for approx. 80-100 RM	4 x U-150-60/13	4 x U-150-60/13	4 x U-300-K1620	4 x U-300-R20	2 x U-300-R20 2 x U-400-R20 2 x U-400-60/5	12 x U-300-R20	2 x U400-60/8 6 x U400-R20 6 x U300-R20
Post type	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA/RRW	RRW
Post spacing	6-12 m	6-12 m	6-12 m	8-12 m	8-12 m	8-12 m	8-12 m
Standard barrier height	2/3/4/5 m	2/3/4 m	3/4/5/6 m	4/5/6/7 m	4/5/6/7 m	5/6/7/8/9 m	6/7/8/9/10/10.5 m
Heights with ETAG 027 approval	3-3.5 m	3-3.5 m	4-5 m	5-6 m	5-6 m	6-7 m	7-8 m
Heights with FOEN certificate	3-4.5 m	3-4.5 m	4-5 m	5-7.5 m	5-7.5 m	6-9 m	7-10.5 m
Maximum deflection ⁴	3.60 m	ausstehend	4.36 m	5.80 m	6.97 m	8.15 m	8.45 m
Residual useful height in the impact zone ⁵	> 50 % (Cat. A)	> 50 % (Cat. A)	> 50 % (Cat. A)	> 50 % (Cat. A)	> 50 % (Cat. A)	> 50 % (Cat. A)	> 50 % (Cat. A)

¹According to ETAG 027 | ²See **ETAssessment/ETApprovals** at <http://www.ecta.eu> | ³According to the Swiss directive | ⁴RIGiD – without retaining ropes

We reserve the right to make technical changes.



Sommario

Sommario	1
Indice delle figure	2
Indice delle tabelle	3
Indice dei grafici.....	4
Premessa	5
Riferimenti normativi	5
Documenti e dati consultati	5
Cap. 1 – Determinazione dello stato tensionale e deformativo nell’intorno della galleria circolare adottando un mezzo a comportamento CILE.....	6
Cenni metodologici e teorici.....	6
Analisi e calcolo dati	7
Cap. 2 - Determinazione dello stato tensionale e deformativo nell’intorno di una galleria circolare in un mezzo a comportamento ELPLA.....	11
Cenni teorici e metodologici.....	11
Analisi e calcoli dati	12
Cap. 3 – Determinazione della linea caratteristica del cavo	14
Documenti e dati consultati	14
Cenni teorici e metodologici.....	14
Analisi e calcoli dati	14
Cap. 4 - Determinazione della linea caratteristica del sostegno	17
Cenni teorici e metodologici.....	17
Analisi e calcoli dati	17
Conclusioni	20
Bibliografia e sitografia.....	21
Allegato 1 – andamento tensioni spostamenti comportamento CILE isotropo.....	22
Allegato 2 – andamento tensioni spostamenti comportamento CILE anisotropo ($\phi=90^\circ$).....	28
Allegato 3 – andamento tensioni spostamenti comportamento CILE anisotropo ($\phi=0^\circ$).....	34
Allegato 4 – andamento tensioni spostamenti comportamento ELPLA	40

Indice delle tabelle

Tabella 1: caratteristiche ammasso roccioso	5
Tabella 2: stima fascia plasticizzata	10

Premessa

Il seguente rapporto è dedicato alla determinazione dello stato tensionale e deformativo indotto nell'intorno di una galleria autostradale circolare, scavata nell'ammasso roccioso oggetto di caratterizzazione nel Rapporto 1.

In seguito, si determina la linea caratteristica dello scavo che si effettua, seguito da alcune considerazioni relative allo studio di stabilità della galleria.

Riferimenti normativi

Per il seguente rapporto ci si è riferiti al capitolo 6.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni, in cui sono fornite le indicazioni e i vincoli da rispettare nella realizzazione di un progetto geotecnico.

Documenti e dati consultati

Per il seguente rapporto si fa riferimento ad una galleria di raggio di 6m, in un tratto in cui la copertura è di 400m, utilizzando le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso del rapporto 1, riportate in tabella1.

Tabella E [MPa]	5495
N [-]	0.28
C [Mpa]	3.98
Φ [°]	22.5

Tabella 1: caratteristiche ammasso roccioso

Tali dati si sono ottenuti considerando un valore medio delle famiglie più rappresentative.

Lo studio è condotto considerando uno stato tensionale isotropo prima ($k_0=1$) ed uno anisotropo ($k_0=0.5$) dopo, valutando lo stato tensionale e deformativo sia in calotta che al piedritto, rispettivamente per $\theta=90^\circ$ e $\theta=0^\circ$.

- r : distanza dal centro della galleria del punto considerato;
- q : angolo, valutato in senso antiorario, compreso tra il punto considerato e la tensione orizzontale;
- σ_h e σ_v : tensioni naturali orizzontale e verticale;
- G : modulo di elasticità tangenziale;
- ν : coefficiente di Poisson;
- K_0 : coefficiente di spinta a riposo (rapporto tra tensione orizzontale e verticale).

A partire dalla soluzione elastica di Kirsch, è possibile definire i punti nell'intorno della galleria che vanno a rottura, in corrispondenza dei piedritti (direzione orizzontale) e calotta (direzione verticale).

Per fare ciò, si adotta una discretizzazione nell'intorno dello scavo e, per ciascun punto, si valutano la tensione radiale e la tensione circonferenziale. Lungo la direzione orizzontale e quella verticale, queste sono tensioni principali.

In seguito, si calcola la tensione resistente: in condizioni di compressione, questa è calcolata secondo il criterio di Hoek – Brown; in condizioni di trazione, questa corrisponde alla resistenza a trazione dell'ammasso roccioso.

I valori di tensione sono confrontati con la tensione resistente: se questa è superata, non c'è compatibilità tensionale in quella zona. Ciò significa che in quella zona è presente una fascia di punti che sono giunti a rottura e questa fascia è detta fascia plastica.

È possibile stimare dal centro della galleria il raggio al quale si colloca la frontiera di passaggio dalla condizione di rottura alla condizione elastica, detto raggio plastico.

Questa è però solo una stima perché si lavora in campo elastico e ci si limita a indicare i punti in cui gli stati tensionali sono incompatibili con il criterio di resistenza.

Analisi e calcolo dati

Rispettando le condizioni sopra citate, si ottengono i seguenti andamenti delle tensioni radiali e degli spostamenti per $k_0=1$ e $k_0=0.5$, calcolati in calotta e sui piedritti. A questi si accompagna l'andamento della tensione principale a rottura, dal quale si è individuato il raggio plastico.

I valori sono riportati negli allegati 1-3, dove sono stati evidenziati anche i valori del raggio plastico.

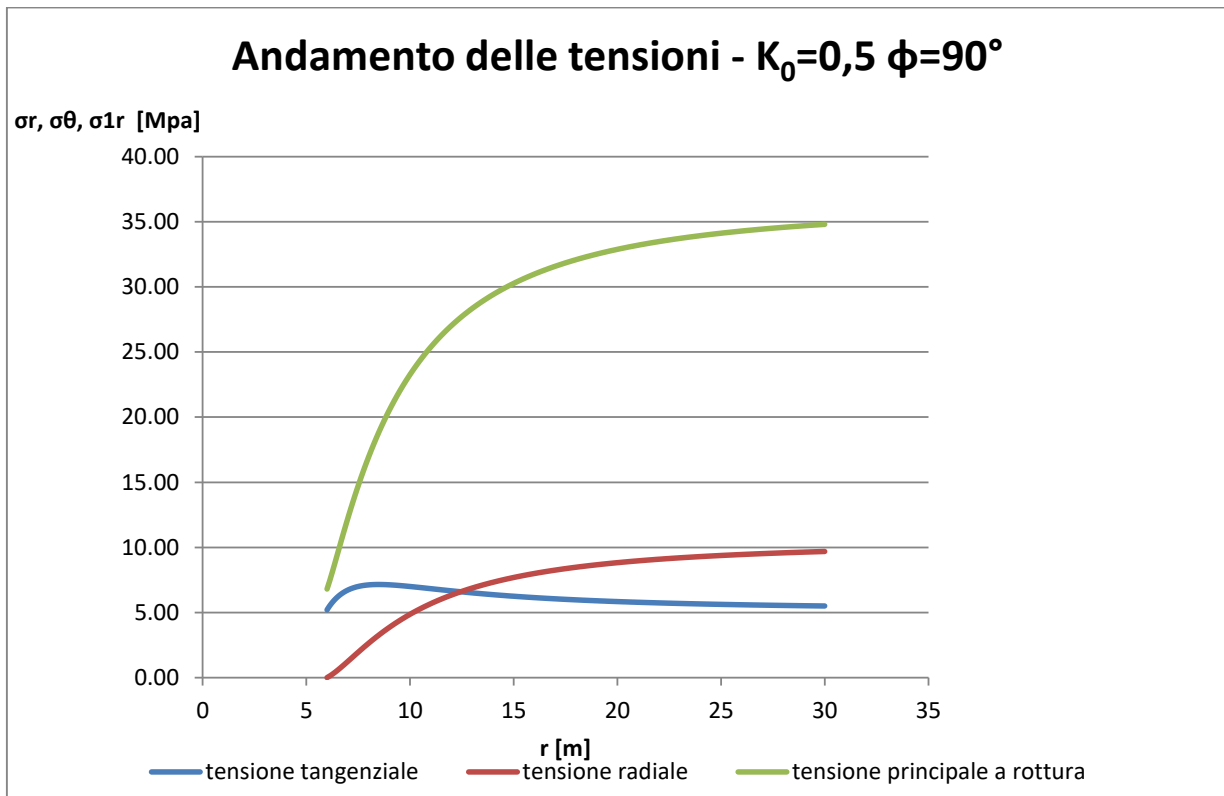


Grafico 2: andamento delle tensioni per $K_0=0,5$, $\vartheta=90^\circ$, comportamento CILE