

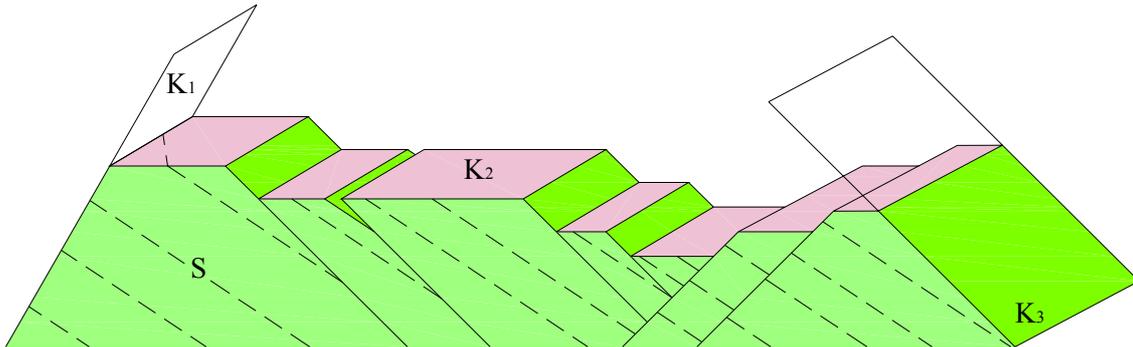
**SOMMARIO**

<b>RLGM (RILIEVO GEOMECCANICO)</b> .....	2
1.0 - Premessa.....	2
2.0 - Rilievo delle discontinuità.....	2
1) <i>Orientazione</i> .....	3
2) <i>Spaziatura (S)</i> .....	3
3) <i>Continuità o Persistenza</i> .....	4
4) <i>Scabrezza</i> .....	5
5) <i>Resistenza delle pareti</i> .....	9
6) <i>Apertura</i> .....	11
7) <i>Riempimento</i> .....	12
8) <i>Filtrazione</i> .....	12
9) <i>Numero di sistemi di discontinuità</i> .....	13
10) <i>Dimensione dei blocchi</i> .....	14
3.0 - Rappresentazione grafica del rilievo delle giaciture.....	14
<b>SISTEMA Q DI BARTON</b> .....	18
1.0 - Premessa.....	18
2.0 - Parametri della classificazione di Barton.....	18
<b>CLASSIFICAZIONE DI BENIAWSKY E ROMANA</b> .....	23
1.0 Introduzione.....	23
2.0 Valore di A1.....	23
2.0.1 La prova Point Load Test.....	23
2.0.2 Le prove sclerometriche.....	24
2.0.3 Standard ISRM.....	24
3.0 Valore di A2.....	25
4.0 Valore di A3.....	26
5.0 Valore di A4.....	26
6.0 Valore di A5.....	27
7.0 Valore di A6.....	27
8.0 Valore di RMR (rock mass rating) e parametri caratteristici dell'ammasso.....	28
9.0 SLOPE MASS RATING (SMR, Romana 1985).....	28
<b>CLASSIFICAZIONE DI JASAREVIC E KOVACEVIC</b> .....	30
1.0 - Introduzione.....	30
<b>CLASSIFICAZIONE DI SEN (RMR Modificato)</b> .....	32
1.0 - Introduzione.....	32
2.0 - Valore di A1.....	32
2.0.1 - La prova Point Load Test.....	32
2.0.2 - Le prove sclerometriche.....	32
3.0 - Valore di A2.....	33
4.0 - Valore di A3.....	33
5.0 - Valore di A4.....	34
6.0 - Valore di A5.....	35
7.0 - Valore di A6.....	35
<b>CLASSIFICAZIONE DI ROBERTSON</b> .....	37
1.0 - Introduzione.....	37
2.0 - Valore di A1.....	37
3.0 - Valore di A2.....	37
4.0 - Valore di A3.....	38
5.0 - Valore di A4.....	38
<b>CLASSIFICAZIONE DI SINGH E GOEL</b> .....	39
1.0 - Introduzione.....	39
2.0 - parametri della classificazione di Singh e Goel.....	39
3.0 - Risultati derivati dal calcolo di N.....	42

## RLGM (RILIEVO GEOMECCANICO)

### 1.0 - Premessa

Il programma RLGM ha lo scopo di rappresentare ed elaborare il rilievo geo-strutturale di discontinuità di ammassi rocciosi (Figura 1) eseguito in sito con il metodo della bussola e del clinometro, secondo le raccomandazioni ISRM.



**Figura 1** – K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> = sistemi di discontinuità; S = stratificazione

Le discontinuità in un ammasso roccioso condizionano, in modo più o meno evidente, il comportamento meccanico dell'ammasso stesso e del modello geotecnico alla base di qualsiasi calcolo; è quindi importante, al fine di una corretta valutazione delle condizioni di stabilità, una precisa descrizione della struttura della massa e delle discontinuità sia in termini qualitativi che quantitativi.

Per la determinazione del modello geotecnico dell'ammasso verranno, quindi, illustrati nella presente le fasi di rilievo delle giaciture, riferite alle condizioni geostrukturali (spaziatura, apertura, persistenza) e alle condizioni idrauliche e di resistenza delle discontinuità (scabrezza, resistenza delle pareti, grado di alterazione, materiali di riempimento).

Il procedimento utilizzato per l'esecuzione del rilievo è quello descritto nelle raccomandazioni ISRM, tradotte in italiano da O. Del Greco nella Rivista Italiana di Geotecnica - R.I.G. 2/93; il titolo originale delle raccomandazioni è "*Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*".

### 2.0 - Rilievo delle discontinuità

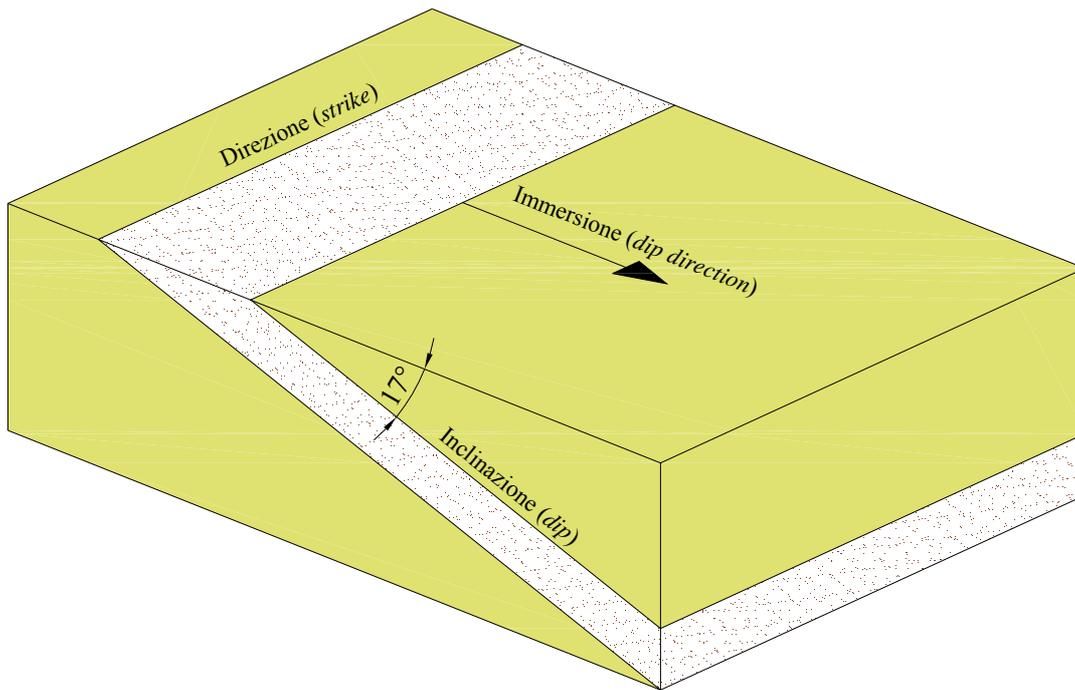
Discontinuità (Discontinuity)

È il termine generale per qualsiasi interruzione di continuità in una massa rocciosa avente resistenza a trazione bassa o nulla. È il termine collettivo per la maggior parte delle fessure, dei piani di stratificazione, dei piani di scistosità, delle zone di indebolimento e delle faglie.

I dieci parametri scelti nelle Raccomandazioni ISRM per descrivere le discontinuità e le masse rocciose sono definiti come segue:

### 1) Orientazione

Posizione della discontinuità nello spazio (Figura 2). Le superfici di discontinuità possono essere rappresentate come un piano la cui giacitura è individuata da una coppia di angoli ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) o ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) dove  $\alpha$  è l'*inclinazione*,  $\gamma$  la *direzione* e  $\beta$  l'*azimut* della discontinuità (nella terminologia anglosassone rispettivamente *dip*, *strike* e *dip direction* riferita ad un piano).



**Figura 2** – Rappresentazione di un piano di discontinuità nello spazio.

La strumentazione utilizzata è una bussola munita di livella a bolla d'aria e di un coperchio piano, che viene poggiato sulla superficie della discontinuità facendolo ruotare attorno ad un asse orizzontale (clinometro).

La massima inclinazione del piano medio della discontinuità  $\alpha$  (*dip*) è misurata con il clinometro ed è espressa in gradi con numeri di due cifre, da 00° a 90°. L'azimut della immersione  $\beta$  (*dip direction*) è misurato in gradi contati in senso orario rispetto al Nord ed è espresso con un numero di tre cifre da 000° a 360°.

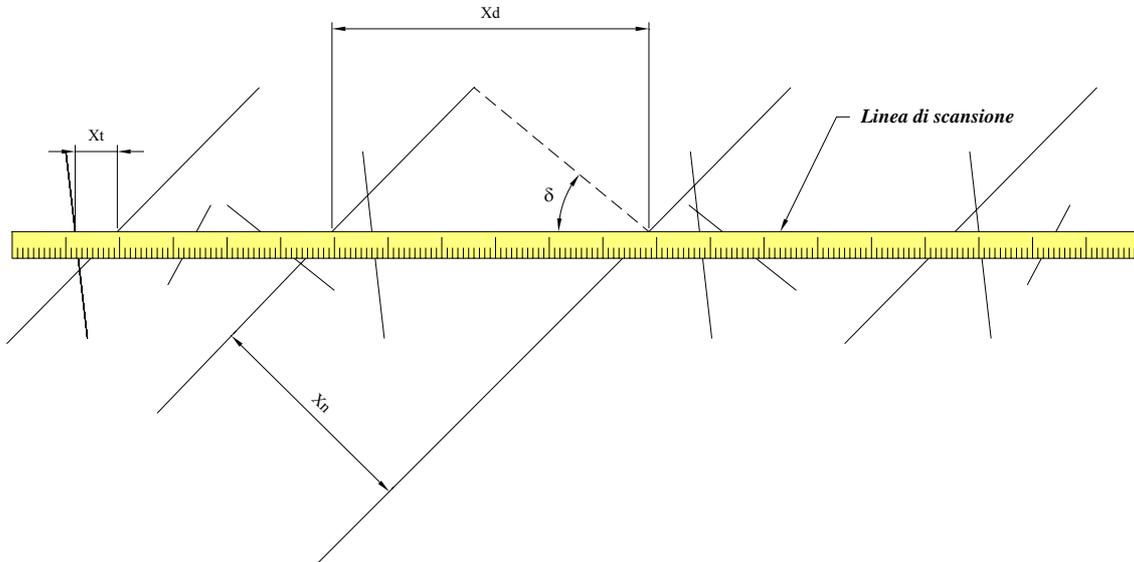
La coppia (*dip*, *dip direction*) rappresenta il vettore immersione. Le misure vengono eseguite lungo una linea di campionamento, materializzata sul fronte roccioso con una bandella metrica fissata alle estremità del rilievo, vengono quindi rilevate tutte le discontinuità incontrate procedendo da una estremità all'altra.

### 2) Spaziatura (S)

Distanza tra discontinuità adiacenti misurata in direzione ortogonale alle discontinuità stesse (Figura 3). Normalmente ci si riferisce alla spaziatura media o modale di un sistema di fessure.

Essa, unitamente all'orientazione ed alla persistenza, determina la forma e le dimensioni dei blocchi in cui si divide l'ammasso roccioso. Poiché la misura  $d$ , espressa in cm, viene eseguita ortogonalmente alla discontinuità, deve essere

corretta tenendo conto dell'angolo  $\delta$  tra la discontinuità e la linea di campionamento:  $S = d \cdot \sin \delta$ . Per ciascuna famiglia si definisce così una distribuzione di frequenza che si può rappresentare con istogrammi; la distribuzione della spaziatura è alla base della classificazione ISRM riportata nella Tab. 1.



**Figura 3** – Spaziatura delle discontinuità negli ammassi rocciosi. Definizione bidimensionale della spaziatura normale ( $X_n$ ), della spaziatura totale ( $X_t$ ) e della spaziatura del set ( $X_d$ ).

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

**Tab. 1** - Classificazione ISRM in base alla spaziatura.

### 3) Continuità o Persistenza

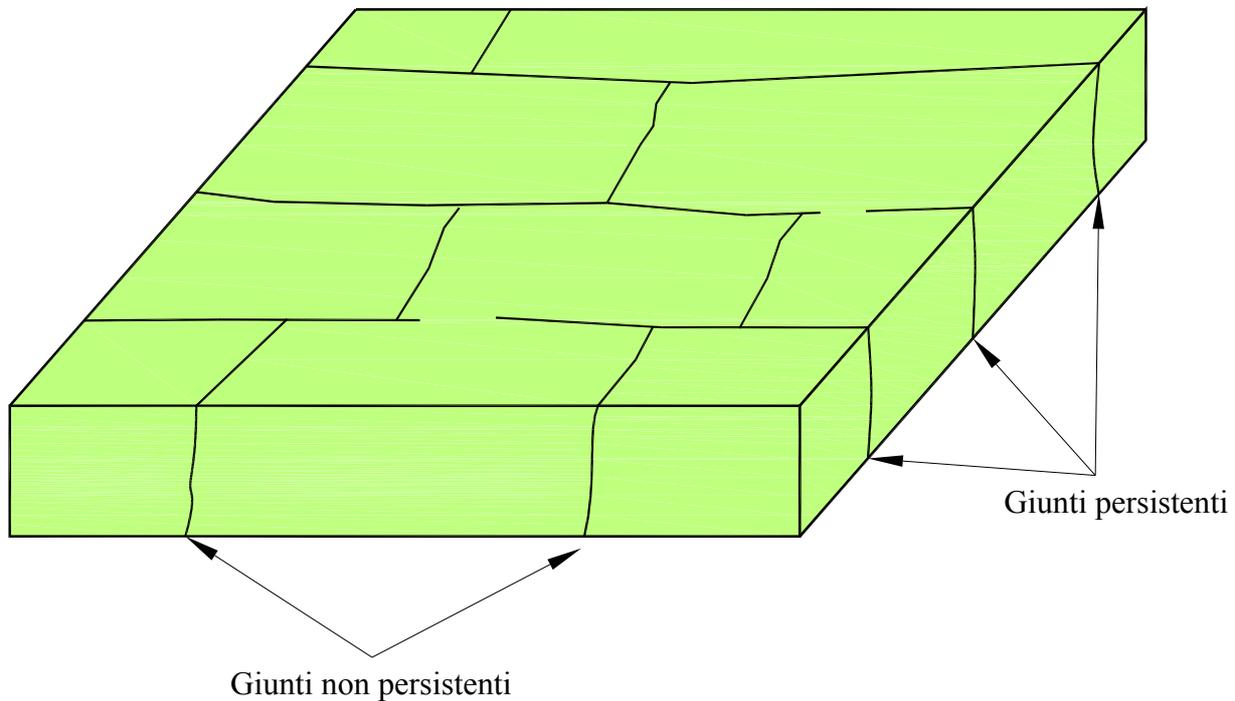
Lunghezza della traccia della discontinuità osservata in un affioramento (Figura 4). Può dare una misura grossolana dell'estensione areale o della profondità di penetrazione di una discontinuità.

Il fatto che il piano di discontinuità termini in roccia massiccia o contro altre discontinuità, riduce la persistenza.

Nella Tab. 2 è riportata la classificazione ISRM in funzione della persistenza

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

**Tab. 2** - Classificazione ISRM in base alla persistenza.



**Figura 4** – Concetto di persistenza di una discontinuità.

#### 4) Scabrezza

Rugosità delle superfici affacciate di una discontinuità e ondulazione relativamente al piano medio delle discontinuità. Sia la rugosità che il suo andamento morfologico contribuiscono alla resistenza di taglio, specialmente nel caso di strutture interconnesse e senza spostamenti relativi. L'importanza della rugosità diminuisce con l'aumentare dell'apertura della discontinuità stessa.

In termini generali la rugosità può essere caratterizzata da una ondulazione e da una rugosità vera e propria; nel primo caso la forma della ondulazione provoca la dilatanza in caso di scorrimento trasversale, nel secondo caso la forma della rugosità tende ad essere rotta in caso di scorrimento.

La metodologia e la strumentazione per eseguire il rilievo sono riportate nelle Raccomandazioni ISRM che si ricordano qui di seguito.

La rugosità si può rilevare in due modi diversi:

1. qualora si conosca la direzione di scorrimento potenziale, la rugosità può essere rilevata con profili lineari scelti parallelamente a questa direzione. In molti casi la direzione di scorrimento è parallela alla direzione di immersione. Nei casi in cui lo scorrimento è condizionato da due differenti piani di discontinuità intersecatisi, la direzione di potenziale scorrimento è parallela alla linea di intersezione dei piani. Nel caso di stabilità della spalla di una diga ad arco, la direzione dello scorrimento potenziale può avere una rilevante componente orizzontale.
2. nel caso in cui non si conosca la direzione dello scorrimento potenziale, ma sia molto importante conoscerla, la rugosità può essere misurata in tre dimensioni anziché in due. Ciò può essere fatto con una bussola ed un clinometro

a disco. Le letture della inclinazione e della direzione possono essere rese graficamente come poli su reticoli equiarea. In alternativa le superfici di discontinuità possono venire rilevate usando il metodo fotogrammetrico.

Questa può risultare un'utile tecnica quando le superfici critiche siano inaccessibili.

Scopo di tutti i metodi di misurazione della rugosità è l'eventuale valutazione o calcolo della resistenza al taglio e della dilatanza. I metodi di interpretazione dei profili di rugosità e di stima della resistenza al taglio disponibili attualmente sono illustrati nel successivo punto.

### *Strumentazione*

Il metodo di rilevamento del profilo lineare di una rugosità richiede la seguente strumentazione: 1) asta pieghevole di almeno due metri, graduata in mm; 2) bussola e clinometro; 3) dieci metri di filo sottile o filo di nylon marcato ad intervalli di un metro (in rosso) e di un decimetro (in blu). Le estremità del filo dovrebbero essere attaccate a blocchetti di legno o simili, così da poter essere teso a costituire una linea di riferimento diritta al di sopra del piano di una discontinuità ad ampia ondulazione.

Il metodo di rilevamento della rugosità con bussola e clinometro a disco richiede le seguenti attrezzature: 1) una bussola geologica Clar (Breithaupt) con incorporata una livella a bolla orizzontale ed un coperchio girevole unito al corpo principale della bussola mediante una cerniera graduata per misurare l'inclinazione; 2) quattro sottili dischi circolari in lega leggera, di vario diametro (per es. 5, 10, 20, 40 cm), che possono essere fissati di volta in volta al coperchio della bussola [v. bibliografia ISRM].

### *Procedura*

Profilo lineare. Le discontinuità vengono scelte in modo tale da essere accessibili e tipiche della superficie di potenziale scorrimento.

A seconda delle dimensioni di ciascun piano, saranno utilizzati l'asta graduata di 2 metri o il filo di 10 metri ponendoli al di sopra del piano della discontinuità parallelamente alla direzione di potenziale scorrimento. Essi dovrebbero essere posti a contatto del punto o dei punti più elevati della discontinuità e dovrebbero essere altresì il più possibile rettilinei. Un sottile strato di plastilina può essere utilizzato per prevenire lo scorrimento dell'asta verso il basso lungo la linea di massima pendenza. La plastilina può essere posta tra l'asta e le creste della discontinuità. Si misurano le distanze ( $y$ ) sulla perpendicolare tra l'asta (o il filo) e la superficie della discontinuità, con l'approssimazione del mm, per distanze tangenziali ( $x$ ) date. È consigliabile essere flessibili nella scelta delle "x", dato che un intervallo regolare (per es. 5 cm) potrebbe far trascurare un piccolo gradino o qualcosa di simile che potrebbe avere importanza nella valutazione della resistenza al taglio. In genere, valori di ( $x$ ) pari a circa il 2% della lunghezza totale misurata sono sufficienti per avere una misura sostanzialmente buona della rugosità.

Le ( $x$ ) e le ( $y$ ) lette sono tabulate insieme all'azimut e all'inclinazione della base di misura. Queste ultime possono essere differenti dall'orientazione *dip / dip direction* della discontinuità.

I profili tipici della rugosità minima, media e massima vengono rilevati usando il suddetto procedimento. Essi possono essere riferiti ad un intero sistema di discontinuità, ad una discontinuità critica, o a ciascuna superficie misurata, in funzione del grado di dettaglio richiesto. L'angolo di ondulazione ( $i$ ), illustrato in Figura 5, dovrebbe essere misurato con l'asta rigida ed il clinometro, qualora il profilo rilevato sia così corto da non poter includere l'intera ondulazione.

La lunghezza e l'ampiezza approssimativa di un'ondulazione troppo ampia per essere rilevata con il profilo lineare, dovrebbero essere stimate o misurate quando non vi sono problemi di accessibilità.

Fotografie raffiguranti le superfici con rugosità minima, media e massima dovrebbero essere riprese con un regolo di 1 metro posto ben in vista a contatto della superficie in esame.

Bussola e clinometro a disco. Le discontinuità scelte devono essere tali da essere accessibili e tipiche della superficie di potenziale scivolamento. Gli angoli di rugosità ( $i$ ) su piccola scala (Figura 6) si misurano posizionando il disco di maggior diametro (per es. quello di 40 cm di diametro) sulla superficie della discontinuità in almeno 25 posizioni diverse, e registrando sia l'inclinazione che la direzione di massima pendenza per ciascuna posizione. (Si prende in considerazione una superficie almeno dieci volte maggiore di quella del disco di maggior diametro).

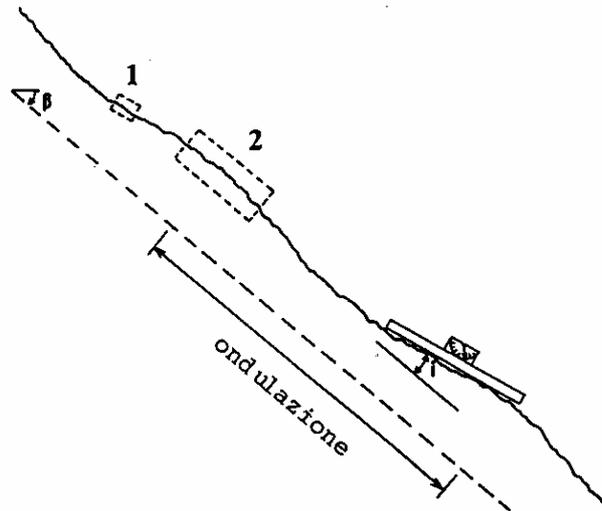
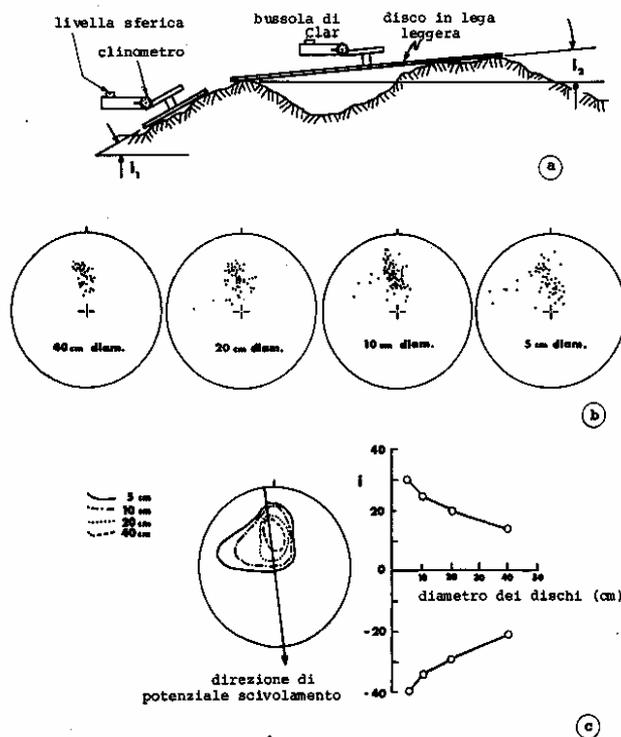


Figura 5 – Misura dell'angolo di ondulazione



**Figura 6** – Misura degli angoli di rugosità

Nella impossibilità di eseguire le procedure sopra descritte, le Raccomandazioni ISRM, consigliano l'uso di termini descrittivi della rugosità che possono essere riassunti nella Figura 7.

*Valutazione della resistenza a taglio*

La rugosità dà indicazioni per la valutazione della resistenza a taglio delle discontinuità non riempite.

I valori di  $\phi$  di picco possono essere stimati con la relazione:

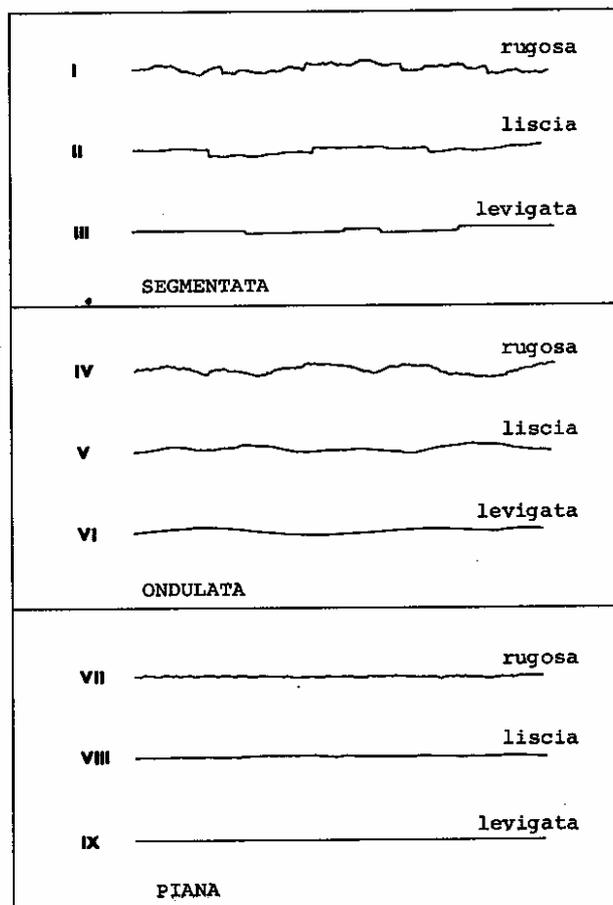
$$\phi_{picco} = JRC \times \log \frac{JCS}{\sigma_n + \phi_r}$$

dove:

JRC = coefficiente di rugosità della discontinuità

JCS = resistenza a compressione delle pareti della discontinuità

$\phi_r$  = angolo di attrito residuo



**Figura 7** – Classificazione descrittiva delle discontinuità ondulate proposta dall'ISRM.

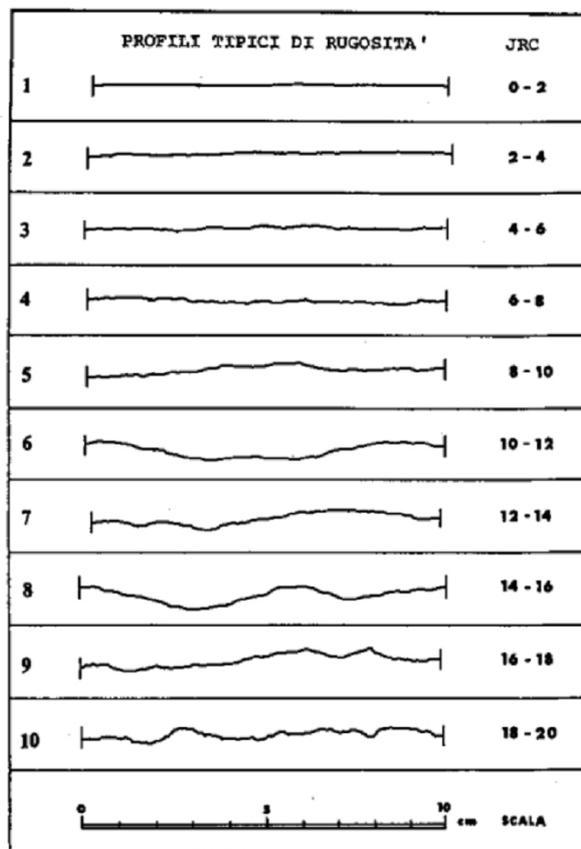
Il valore di JRC viene ricavato dai grafici di Figura 8, i valori di JCS e  $\phi_r$  si ricavano dalle prove con il martello di Schmidt, eseguite sia sulla parete della discontinuità, sia su una frattura fresca del materiale roccioso intatto.

Altro parametro utile per la classificazione dell'ammasso roccioso è il Jr ("Joint Roughness Number") che dipende dalla rugosità delle pareti del giunto i cui valori sono riassunti nella Tab. 3

### 5) Resistenza delle pareti

Resistenza a compressione equivalente dei lembi affacciati di una discontinuità. Può essere minore della resistenza della roccia massiccia per l'esposizione agli agenti atmosferici o per l'alterazione delle pareti. Costituisce una componente rilevante della resistenza di taglio se le pareti sono a contatto.

Gli effetti dell'azione atmosferica sono di due tipologie principali: disgregazione meccanica e decomposizione chimica.



**Figura 8** – Profili di scabrezza e corrispondenti valori di JRC (ISRM, 1978).

	<i>Class.</i>	<i>Scabrezza</i>	<i>Jr</i>
Giunti chiusi o con tratti beanti < 10cm	A	Fratture discontinue	4
	B	Rugose, irregolari, ondulate	3
	C	Ondulate, lisce	2
	D	Ondulate a facce levigate	1,5
	E	Planari, ruvide o irregolari	1,5
	F	Planari, lisce	1
	G	Planari a facce levigate	0,5
Giunti aperti	H	Minerali argillosi nei giunti, fratture non a contatto	1
	I	Zone sabbiose, ghiaiose o fratturate	1

Tab. 3 - Coefficiente Jr

La prima si manifesta con l'ampliarsi di discontinuità preesistenti o con la formazione di nuove, l'apertura di fratture intergranulari e la rottura di singoli individui minerali.

La seconda si manifesta con una decolorazione della roccia e porta ad una decomposizione dei minerali silicati in minerali argillosi. Nel caso di rocce carbonatiche e saline è molto importante il fenomeno della dissoluzione. La resistenza delle pareti, come già visto, può essere valutata con il martello di Schmidt e con saggi di scalfitura.

Altro parametro utile per la classificazione dell'ammasso roccioso è il Ja (*Joint Alteration Number*) che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento; i valori sono riassunti nella Tab. 4:

<i>Class.</i>	<i>Alterazione delle superfici</i>	<i>Ja</i>
A	Riempimento impermeabile, duro, strettamente cicatrizzato	0,75
B	Bordi fratture inalterati, superfici autoreggenti	1
C	Bordi fratture leggermente alterati, rivestiti di minerali non ammorbiditi, particelle sabbiose	2
D	Rivestimento limoso-argilloso o sabbioso argilloso	3
E	Rivestimento di minerali ammorbiditi con argille rigonfianti	4
F	Particelle sabbiose, roccia disgregata libera da argilla	4
G	Riempimenti di minerali argillosi non rigonfianti, continui	6
H	Riempimenti di minerali argillosi ammorbiditi	8
I	Riempimenti di minerali argillosi rigonfianti	8÷12

Tab. 4 - Coefficiente Ja

Nelle Raccomandazione ISRM viene aggiunto un altro indice, W (Tab. 5), che varia da 1 (roccia fresca o poco alterata) a 6 (roccia estremamente alterata), si riporta in tabella la classificazione completa:

<i>Denominazione</i>	<i>Descrizione</i>	<i>W</i>
Fresca	Non vi sono segni visibili di alterazione del materiale roccioso; tuttalpiù una leggera decolorazione sulla superficie delle maggiori discontinuità	1
Leggermente alterata	La decolorazione indica un'alterazione del materiale roccioso e delle superfici di discontinuità. Tutto il materiale roccioso può essere decolorato e talvolta può essere esternamente meno resistente della roccia fresca all'interno	2
Moderatam. alterata	Meno della metà del materiale roccioso è decomposto e/o disgregato come un terreno. Roccia fresca o decolorata è presente o come uno scheletro continuo o all'interno di singoli blocchi.	3

Fortemente alterata	Più della metà del materiale roccioso è decomposto e/o disgregato come un terreno. Roccia fresca o decolorata è presente o come uno scheletro discontinuo o all'interno di singoli blocchi.	4
Completa. alterata	Tutto il materiale roccioso è decomposto e/o disgregato come un terreno. La struttura massiva originaria è ancora largamente intatta.	5
Suolo residuale	Tutto il materiale roccioso è diventato un terreno. Le strutture della massa e dei materiali rocciosi sono distrutte. Vi è un forte cambiamento di volume ma il terreno non ha subito trasporti significativi.	6

Tab. 5 - Coefficiente W

## 6) Apertura

Distanza tra i lembi affacciati di una discontinuità in cui lo spazio interposto è riempito di aria o acqua (Figura 9).

Le aperture sottili possono essere misurate con calibro, mentre quelle larghe con regolo graduato in mm. Esse sono rilevate lungo l'intersezione con l'allineamento del rilievo.

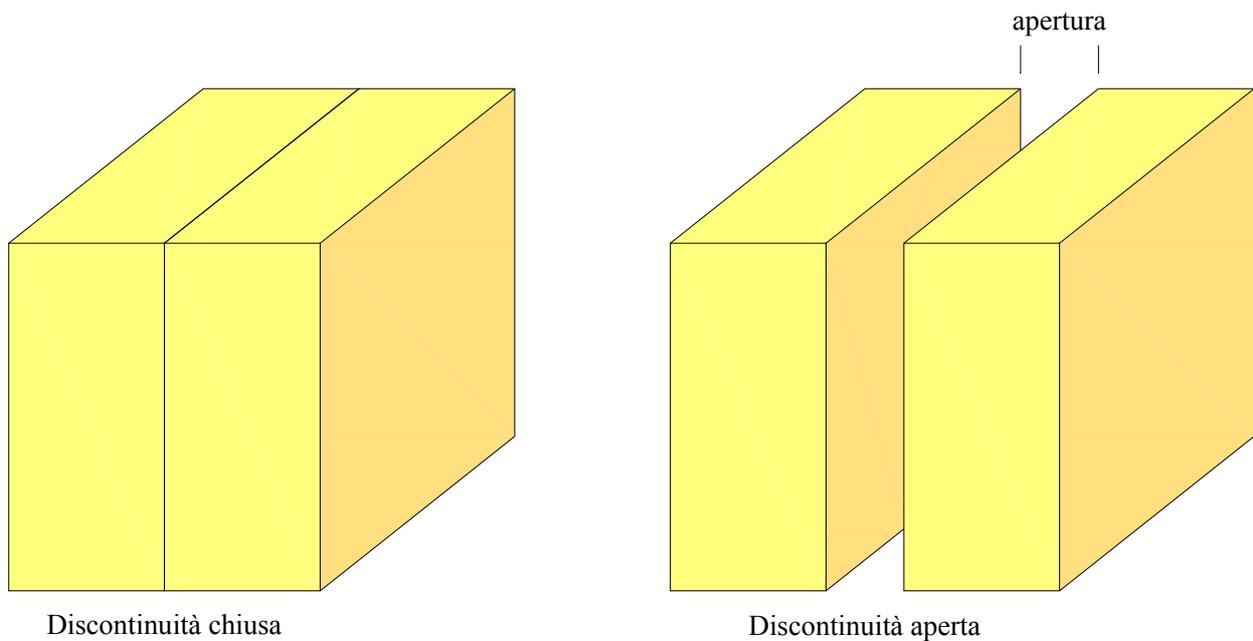


Figura 9 – Apertura di una discontinuità

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

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

> 1 m	Cavernosa	
-------	-----------	--

**Tab. 6** - Classificazione ISRM in base all'apertura

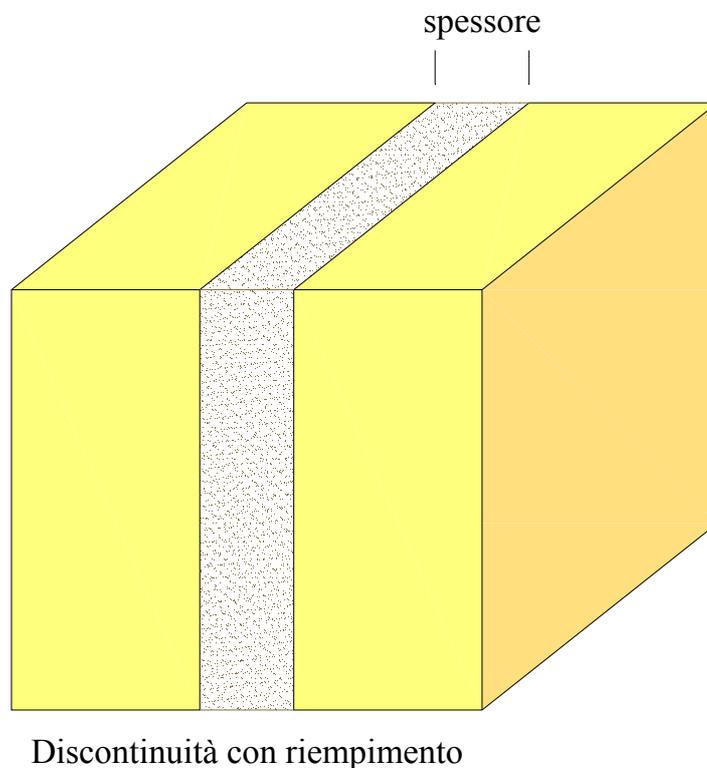
7) *Riempimento*

Materiale che separa le pareti adiacenti di una discontinuità e che è di solito meno resistente della roccia primitiva (Figura 10). Tipici materiali di riempimento sono sabbia, limi, argilla, breccia più o meno fine, milonite. Include anche sottili strati di minerali e discontinuità saldate, per esempio vene di quarzo e calcite.

La presenza di materiale di riempimento influenza il comportamento del giunto nei riguardi del movimento reciproco delle pareti della discontinuità, nel rilievo sono indicati quindi la caratteristica in riferimento alla sua durezza (R: rigido - P: plastico).

8) *Filtrazione*

Flusso d'acqua e abbondante umidità, visibile nelle singole discontinuità o nella massa rocciosa nel suo insieme. Le raccomandazioni ISRM forniscono degli schemi descrittivi per stimare la filtrazione attraverso discontinuità senza riempimento (Tab. 7), discontinuità con riempimento (Tab. 8) e una massa rocciosa (Tab. 9).



**Figura 10** – Riempimento di una discontinuità

## 9) Numero di sistemi di discontinuità

Definisce l'insieme dei sistemi presenti. La massa rocciosa può essere ulteriormente divisa da discontinuità di carattere singolare.

In fase di rilievo vengono presi in considerazione tutti i sistemi presenti nel fronte; diagrammando i poli delle discontinuità e quindi contornando con linee di ugual densità, si possono ricavare i sistemi principali.

Secondo le Raccomandazioni ISRM, le discontinuità che compaiono localmente possono essere classificati secondo la Tab. 10:

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

**Tab. 7** - Discontinuità senza riempimento

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

**Tab. 8** - Discontinuità con riempimento

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

**Tab. 9** - Massa rocciosa (es.: contorno galleria)

Altro parametro utile per la classificazione dell'ammasso roccioso è il  $J_n$  ("Joint Set Number") che dipende dal numero di sistemi di giunti presenti nell'ammasso roccioso; i valori sono riassunti nella Tab. 11:

*10) Dimensione dei blocchi*

Dimensioni del blocco roccioso risultante dalla reciproca orientazione dei sistemi di fratture che si intersecano e dalla spaziatura dei singoli sistemi. Discontinuità singolari possono ulteriormente influenzare il volume roccioso unitario e la sua forma.

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

**Tab. 10** - Classificazione ISRM in base ai sistemi di discontinuità

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

**Tab. 11** - Classificazione in base al Jn

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

$$I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$$

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

### 3.0 - Rappresentazione grafica del rilievo delle giaciture

La rappresentazione delle discontinuità nel programma è possibile secondo diverse tipologie:

- I. Reticolo di Wulff
- II. Reticolo di Schmidt-Lambert
- III. Reticolo stereografico polare

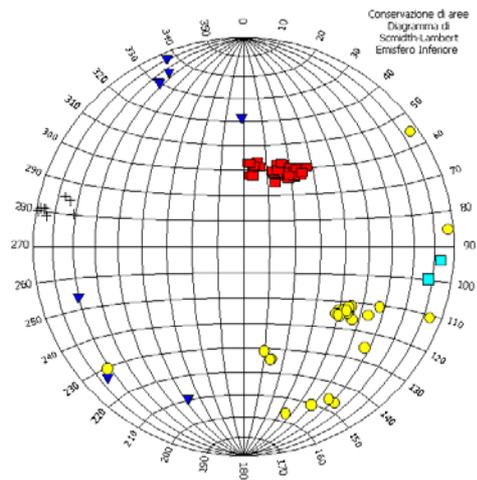
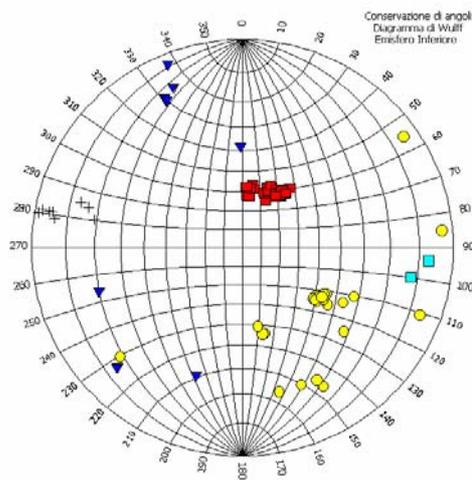
- IV. Reticolo polare equiareale
- V. diagramma a stella
- VI. Rappresentazione tramite istogrammi delle principali caratteristiche (spaziatura, apertura, persistenza).

### RETICOLO DI WULFF

Rappresenta la proiezione stereografica dei meridiani e paralleli terrestri su un piano passante per il centro e per i due poli.

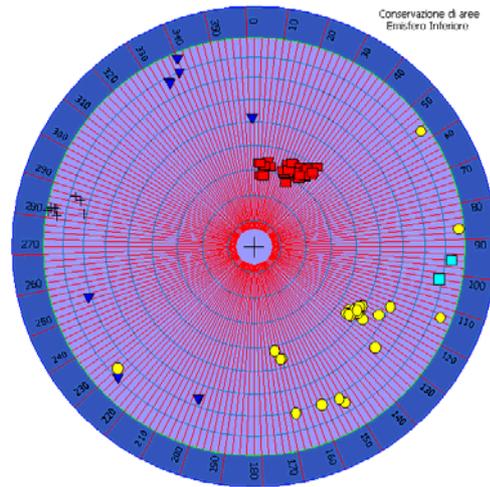
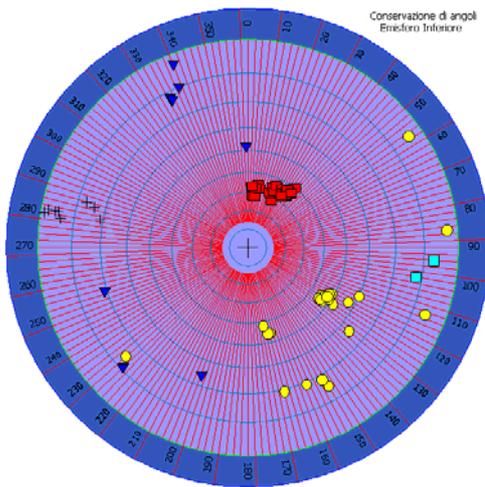
### RETICOLO DI SCHMIDT-LAMBERT

Viene utilizzato per evitare le distorsioni areali del reticolo di Wulff e quindi adatto ad interpretazioni di tipo statistico. Le ciclografiche sono rappresentate da archi di ellissi.



### RETICOLO STEREOGRAFICO POLARE EQUIANGOLARE ED EQUIAREALE

Sono simili ai precedenti, dove vengono rappresentati i poli delle discontinuità.

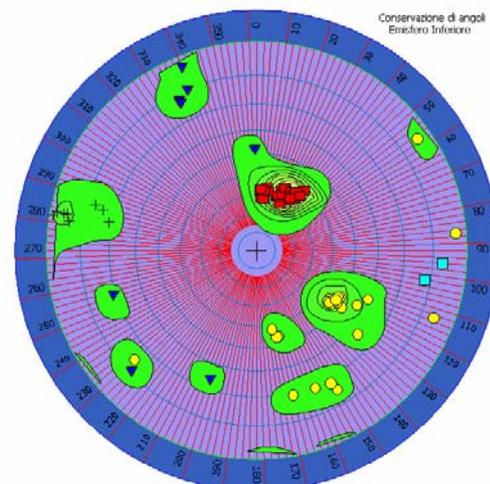
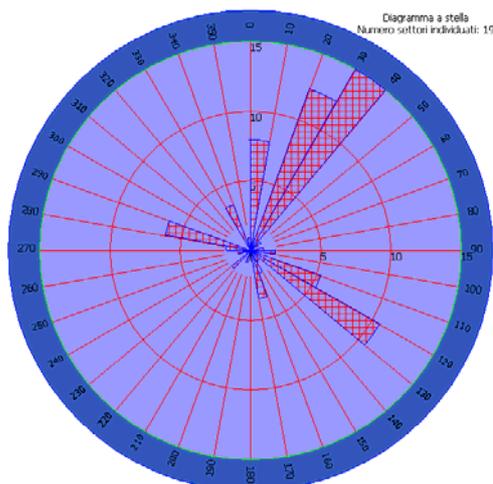


### DIAGRAMMA A STELLA

Rappresenta i dati di giacitura: le osservazioni sono presentate su un riferimento circolare segnato da 0° a 360°, con linee radiali a intervalli di 10°. Le osservazioni sono raggruppate nel settore di 10° a cui appartengono. Il numero di osservazioni è rappresentato nella direzione radiale, con cerchi concentrici numerati, ciascuno relativo a 5, 10 e 15 osservazioni.

### DIAGRAMMA DI ISODENSITA'

Dalla distribuzione sul reticolo dei poli corrispondenti ad un significativo insieme dei dati, è possibile riconoscere una serie di famiglie di discontinuità. Per raggiungere questo scopo si tracciano i diagrammi di isodensità, luogo dei centri di aree unitarie che contengono ugual numero di poli. L'area unitaria è convenzionalmente pari all'1% dell'area totale del diagramma.



Il metodo utilizzato per ricercare la distribuzione della densità dei poli è quello messo a punto da Denness che ha suddiviso la sfera di riferimento in 100 celle elementari.

Proiettata sul diagramma di Schmidh, una cella generica, assume un contorno curvilineo conservando l'area, che contiene un certo numero di poli. Per la costruzione del reticolo, Denness suddivide il cerchio secondo un certo numero

di anelli (7 per il reticolo di tipo A e 6 per il reticolo di tipo B), ciascun anello conterrà un certo numero di celle di numero crescente dal centro verso l'esterno del diagramma.

Il reticolo di tipo A è adatto per analisi nelle quali i poli si concentrano in prossimità della circonferenza esterna (famiglie subverticali), mentre il diagramma di tipo B è adatto per superfici inclinate o suborizzontali.

### TEST DI MARKLAND

Lo scopo del test di Markland è quello di quantificare la possibilità della rottura di un cuneo di roccia nel quale lo scorrimento avviene lungo la linea di intersezione di due discontinuità planari.

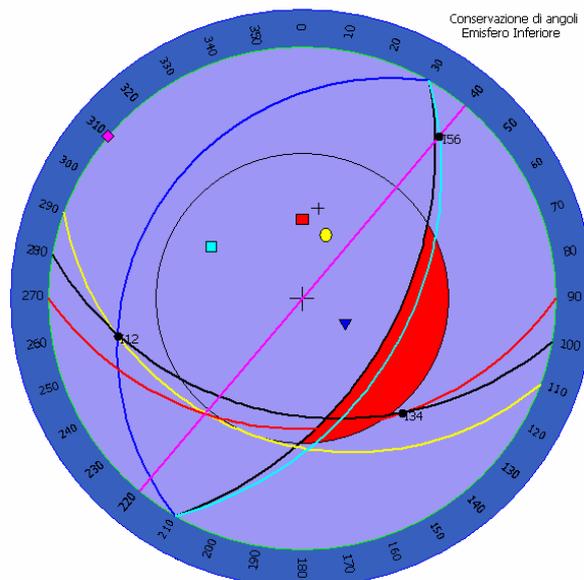
Il fattore di sicurezza del pendio dipende dalla inclinazione della linea di intersezione, dalla resistenza a taglio della superficie della discontinuità e dalla geometria del cuneo. Il caso limite si verifica quando il cuneo degenera in un piano, cioè i due piani hanno inclinazione ed immersione coincidenti e quando la resistenza a taglio di questo piano è dovuta solo all'attrito.

Lo scorrimento, in queste condizioni, si verifica quando l'inclinazione del piano è maggiore dell'angolo di attrito e si può eseguire una verifica di stabilità preliminare confrontando l'inclinazione della linea di intersezione dei due piani e l'angolo di attrito della superficie rocciosa: il pendio è potenzialmente instabile quando il punto, in un diagramma equiareale, che definisce la linea di intersezione dei due piani cade all'interno dell'area delimitata dal grande cerchio che rappresenta il pendio ed il cerchio che rappresenta l'angolo di attrito.

E' da tener presente che il test è stato implementato per valutare le discontinuità critiche, a questo test devono seguire verifiche di stabilità più approfondite.

Un ulteriore sviluppo del test di Markland è stato implementato da Hocking; il test infatti prevede la possibilità che lo scorrimento avvenga lungo uno dei piani che costituiscono il cuneo e non solo lungo la linea di intersezione dei due piani stessi.

Infatti se è soddisfatto il test di Markland e l'immersione di uno dei piani cade tra l'immersione del pendio e la direzione della linea di intersezione, lo scorrimento avverrà sul piano piuttosto che lungo la linea di intersezione.



## SISTEMA Q DI BARTON

### 1.0 - Premessa

Sviluppato nel 1974 al Norwegian Geotechnical Institute essenzialmente per l'applicazione in campo sotterraneo, negli ultimi anni è stato esteso a diversi campi e di recente, nel 2002, lo stesso Barton ha proceduto ad una revisione totale del sistema.

Il valore di Q si calcola da:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

In cui i vari indici sono:

RQD (Rock Quality Designation), che tiene conto della suddivisione della massa rocciosa

J<sub>n</sub> (Joint Set Number), che dipende dal numero di famiglie di giunti presenti nell'ammasso roccioso

J<sub>r</sub> (Joint Roughness Number), che dipende dalla rugosità della famiglia più sfavorevole

J<sub>a</sub> (Joint Alteration Number), che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento, e che viene ugualmente determinato sulla famiglia più sfavorevole

J<sub>w</sub> (Joint Water Number), che dipende dalle condizioni idrogeologiche

SRF (Stress Reduction Factor), che è funzione dello stato tensionale in rocce massive o dal disturbo tettonico.

Di recente Q è stato normalizzato nei confronti della resistenza a compressione monoassiale della roccia:

$$Q_c = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{\sigma_c}{100}$$

Le tabelle che seguono indicano i coefficienti numerici che vengono assegnati ai vari parametri. Le ultime modifiche e suggerimenti di Barton vengono riportati sotto ogni tabella.

### 2.0 – Parametri della classificazione di Barton

**Parametro RQD** (Rock Quality Designation, che tiene conto della suddivisione della massa rocciosa):

Prende il suo valore nominale; se RQD risulta < 10, si assume 10.

**Parametro J<sub>n</sub>** (Joint Set Number, che dipende dal numero di famiglie di giunti presenti nell'ammasso roccioso):

DEFINIZIONE	J <sub>n</sub>
Roccia massiva, nessuna o rare discontinuità	0,5 – 1
Una serie di discontinuità	2
Una serie di discontinuità + quelle random (casuali)	3
Due serie di discontinuità	4
Due serie di discontinuità + quelle random	6
Tre serie di discontinuità	9
Tre serie di discontinuità + quelle random	12
Quattro o più serie di discontinuità	15

Roccia completamente disgregata	20
---------------------------------	----

*Nel caso di gallerie:*

*in zona di imbocco  $J_n$  va raddoppiato; in una zona di intersezione di due gallerie  $J_n$  va triplicato.*

**Parametro Jr** (Joint Roughness Number, che dipende dalla rugosità della famiglia più sfavorevole):

DEFINIZIONE	Jr
Giunti discontinui	4
Giunti scabri o irregolari, ondulati	3
Giunti lisci, ondulati	2
Giunti levigati, ondulati	1,5
Giunti scabri o irregolari, piani	1,5
Giunti lisci, piani	1
Giunti levigati, piani	0,5
Zone mineralizzate contenenti minerali argillosi a riempire la discontinuità	1
Zone mineralizzate sabbia, ghiaia, zone disgregate, a riempire la discontinuità	1

*La descrizione si riferisce alle caratteristiche a piccola e a media scala. Se la spaziatura media della famiglia principale è superiore a 3 m aumentare Jr di 1. Nel caso di giunti piani, levigati, contenenti strie o lineazioni, se queste sono orientate nella direzione più sfavorevole si utilizza 0,5.*

**Parametro Ja** (Joint Alteration Number, che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento, che viene determinato sulla famiglia più sfavorevole):

Giunti sostanzialmente chiusi (apertura 1 – 3 mm) con pareti a contatto:

DEFINIZIONE	Ja
Giunti sigillati o mineralizzati	0,75
Giunti non alterati o con lievi ossidazioni	1
Giunti leggermente alterati o con spalmature di materiale non plastico	2
Giunti con spalmature limose, frazione argillosa limitata non plastica	3
Spalmature di minerali con bassa resistenza attritiva (argille, miche, talco, grafite, clorite, gesso)	4

Giunti mediamente aperti (< 5 mm) e presenza di riempimento che permette ancora il contatto fra le pareti in caso di scorrimento:

DEFINIZIONE	Ja
Riempimento sabbioso	4
Riempimento argilloso non plastico, molto sovraconsolidato	6
Riempimento argilloso plastico, mediamente sovraconsolidato	8
Riempimento argilloso rigonfiante	8 – 12*

*\* il valore da assegnare dipende dalla percentuale della frazione argillosa rigonfiante e dalla possibilità che la stessa venga in contatto con l'acqua.*

Giunti aperti (> 5 mm) senza nessun contatto fra le pareti in caso di scorrimento:

DEFINIZIONE	Ja
Zone o fasce di argilla limosa o sabbiosa non plastica	5
Zone o fasce di roccia disgregata	6

Zone o fasce di argilla non plastica	6
Zone o fasce di argilla plastica rigonfiante	8
Zone o fasce di argilla rigonfiante	12
Zone continue molto spesse di argilla non plastica	10
Zone continue molto spesse di argilla plastica non rigonfiante	13
Zone continue molto spesse di argilla plastica rigonfiante	13 – 20*

\* il valore da assegnare dipende dalla percentuale della frazione argillosa rigonfiante e dalla possibilità che la stessa venga in contatto con l'acqua.

**Parametro Jw** (Joint water Number, che dipende dalle condizioni idrogeologiche):

DEFINIZIONE	Jw
Acqua assente o scarsa, localmente < 5 lt/min	1
Afflusso medio con occasionale dilavamento del riempimento del giunto	0,66
Afflusso forte o ad alta pressione in rocce compatte con discontinuità aperte senza riempimento	0,5
Venute forti o ad alta pressione con dilavamento del riempimento del giunto	0,33
Venute eccezionalmente forti o a pressioni molto elevate subito dopo l'avanzamento, a diminuire nel tempo	0,2 – 0,1
Venute eccezionalmente forti o a pressioni molto elevate subito dopo l'avanzamento, costanti nel tempo	0,1 – 0,05

Negli ultimi quattro casi se sono installati sistemi efficaci di drenaggio Jw va portato a 1 o a 0,66.

Per una caratterizzazione dell'ammasso lontano dall'influenza dello scavo e nel caso che  $RQD/J_n$  sia sufficientemente basso (0,5 - 25) in modo da assicurare una buona connettività idraulica, si possono assumere i valori di Jw (1,0 – 0,66 – 0,5 – 0,33) in funzione delle altezze di ricoprimento (0 – 5; 5 – 25; 25 – 250; > 250).

**Parametro SRF** (Stress Reduction Factor, che è funzione dello stato tensionale in rocce massive o dal disturbo tettonico):

Zone di debolezza intersecanti lo scavo

DEFINIZIONE	SRF
Diverse zone di debolezza con argilla o roccia chimicamente disgregata, roccia circostante molto allentata	10
Singole zone di debolezza con argilla o roccia chimicamente disgregata (altezze di copertura ≤ 50 m)	5
Singole zone di debolezza con argilla o roccia chimicamente disgregata (altezze di copertura > 50 m)	2,5
Fasce di taglio multiple in roccia competente, rilassamento della roccia circostante	7,5
Fascia di taglio singola in roccia competente (altezze di copertura ≤ 50 m)	5
Fascia di taglio singola in roccia competente (altezze di copertura > 50 m)	2,5
Zone intensamente fratturate con intersezione di discontinuità aperte e continue	5

Se le zone di debolezza o di fratturazione influenzano ma non intersecano direttamente lo scavo, SRF va ridotto del 25-50%.

Ammasso competente con problemi di tensioni geostatiche

DEFINIZIONE	$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_\theta/\sigma_c$	SRF
Basso campo tensionale in prossimità della superficie	> 200	< 0,01	2,5
Condizioni tensionali favorevoli	200 - 10	0,01 - 0,3	1
Campo tensionale alto, favorevole alla stabilità in calotta, può	10 - 5	0,3 - 0,5	0,5 - 0,2

essere sfavorevole per la stabilità dei piedritti			
Moderati colpi di tensione dopo più di un'ora in roccia massiva	5 - 2,5	0,5 - 0,65	5 - 10
Colpi di tensione quasi immediati in roccia massiva	< 2,5	0,65 - 1	10 - 20

$\sigma_c$  = resistenza a compressione della roccia

$\sigma_\theta$  = massima tensione tangenziale al contorno dello scavo

$\sigma_1$  = tensione principale maggiore agente

$\sigma_3$  = tensione principale minore agente

Se il rapporto fra le tensioni principali  $\sigma_1/\sigma_3$  è compreso fra 5 e 10, ridurre  $\sigma_c$  a  $0,75\sigma_c$ , se il rapporto è  $> 10$  ridurre a  $0,5\sigma_c$ .

Se la profondità della calotta dal piano campagna è inferiore alla larghezza dello scavo, Barton suggerisce di utilizzare  $SRF = 5$ .

Per una caratterizzazione dell'ammasso lontano dall'influenza dello scavo si possono assumere i valori di  $SRF$  (5 - 2,5 - 1,0 - 0,5) in funzione delle altezze di ricoprimento (0 - 5; 5 - 25; 25 - 250; > 250).

Le ultime tre righe nella tabella sono generalmente applicabili a rocce molto dure e massive, con valori di  $RQD/J_n$  compresi fra 50 e 200.

Ammasso spingente:

DEFINIZIONE	SRF
Ammasso moderatamente spingente	5 - 10
Ammasso fortemente spingente	10 - 20

Ammasso rigonfiante:

DEFINIZIONE	SRF
Ammasso moderatamente rigonfiante	5 - 10
Ammasso fortemente rigonfiante	10 - 20

L'indice **Q** (variabile da 0,001 a 1000), così calcolato, è diviso in 9 intervalli cui corrispondono altrettante classi di ammasso roccioso:

Q	Classe	Descrizione
0,001 - 0,01	IX	Eccezionalmente scadente
0,01 - 0,1	VIII	Estremamente scadente
0,1 - 1	VII	Molto scadente
1 - 4	VI	Scadente
4 - 10	V	Mediocre
10 - 40	IV	Buona
40 - 100	III	Molto buona
100 - 400	II	Estremamente buona
400 - 1000	I	Ottima

Inoltre è possibile estrapolare due caratteristiche di resistenza dell'ammasso:

- 1) Una componente attritiva, che può essere considerata come approssimazione dell'angolo di attrito dell'ammasso

$$FC = \tan^{-1} \left( \frac{J_r}{J_a} J_w \right)$$

2) Una componente coesiva, che può essere considerata come approssimazione della coesione dell'ammasso

$$CC = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_c}{100}$$

Invece il modulo di deformazione statico dell'ammasso può essere determinato mediante la:

$$E_M \text{ (GPa)} = 10 Q_c^{1/3}$$

in accordo con l'espressione di Serafim e Pereira derivata da RMR.

## CLASSIFICAZIONE DI BENIAWSKY E ROMANA

### 1.0 Introduzione

Nel campo della progettazione di infrastrutture di ingegneria civile, siano esse legate alla stabilità di un versante o alla stabilità di un'opera in sotterraneo, difficilmente si possono avere informazioni dettagliate sulle caratteristiche di resistenza e di deformabilità dell'ammasso roccioso interessato alla progettazione. Allora diventa importante poter utilizzare uno schema che possa soddisfare le richieste, un metodo empirico che permetta di risolvere i problemi dovuti alla scarsa conoscenza o esperienza di una determinata area.

Le classificazioni di Beniaowsky e Romana (la seconda è derivata dalla prima, che risultava troppo "conservativa") consentono di soddisfare i quesiti richiesti e le problematiche che si presentano.

La classificazione di Beniaowsky si basa sul rilievo, in campagna o in laboratorio, di sei parametri:

A1 = resistenza a compressione uniassiale;

A2 = Rock Quality Designation Index (Indice RQD);

A3 = spaziatura delle discontinuità;

A4 = condizioni delle discontinuità;

A5 = condizioni idrauliche;

A6 = orientamento delle discontinuità.

Da questi sei parametri si ricava l'**Rock Mass Rating (RMR, Beniaowsky)** e con le dovute correzioni apportate da **Romana** nel 1985 lo **Slope Mass Rating (SMR)**.

L'RMR, nella pratica, viene differenziato come:

$$\text{RMR di base} = \text{RMR}_b = A1 + A2 + A3 + A4 + A5$$

$$\text{RMR corretto} = \text{RMR}_c = (A1 + A2 + A3 + A4 + A5) + A6$$

### 2.0 Valore di A1

A1 si può ricavare sia da prove di laboratorio (Point Load Test), sia da prove di campagna mediante sclerometro o da prove speditive (Standard ISRM), definendo la resistenza a compressione uniassiale  $S_u$ .

#### 2.0.1 La prova Point Load Test

La prova Point Load ha il vantaggio di essere portatile; da essa si deriva l'indice di carico puntuale  $I_s$ , che viene correlato alla resistenza alla compressione uniassiale  $S_u$  mediante la relazione:

$$S_u = K I_s$$

K è un coefficiente moltiplicativo per il quale l'ISRM consiglia il valore 24, ma nella pratica si è evidenziato come tale valore non è univoco ma largamente variabile. Palmström suggerisce di variare K in funzione di  $I_s$  secondo lo schema seguente:

<b>I<sub>s</sub> (MPa)</b>	<b>K</b>
< 3,5	14
3,5 – 6,0	16
6,0 – 1,0	20
> 6,0	25

### 2.0.2 Le prove sclerometriche

Il martello di Schmidt, noto come sclerometro, è ampiamente utilizzato come prova non distruttiva e volta a misurare la “durezza di rimbalzo” della roccia. Dalla prova si ricava l’indice di rimbalzo R che è possibile correlare alla resistenza alla compressione uniassiale mediante la relazione di Irfan e Dearman (1978):

$$S_u = 0,775 R + 21,3$$

### 2.0.3 Standard ISRM

In una fase preliminare delle indagini, mancando prove di campagna o di laboratorio, il valore di  $S_u$  può essere stimata osservando la risposta della roccia alla sua percussione con il martello da geologo.

Dalla risposta della roccia si possono ricavare i seguenti valori:

La roccia si incide con l’unghia o si sbriciola con le mani	0,25 – 1 MPa
Si sbriciola sotto i colpi della punta, lastre sottili si rompono con facilità con le mani	1 – 5 MPa
La punta lascia deboli buchi, lastre sottili si rompono con forti pressioni delle mani	5 – 25 MPa
La roccia si frattura con un colpo	25 – 50 MPa
Si frattura dopo due-tre colpi	50 – 100 MPa
Si frattura solo dopo molti colpi	100 – 200 MPa
Si scheggia solamente	> 200 MPa

Definita la resistenza a compressione  $S_u$  è possibile ricavare il valore del primo parametro A1.

Se si utilizzano prove Point Load o prove sclerometriche risulta più agevole, rispetto alle tabelle e ai grafici proposte da Beniafsky, ricavare il valore di A1 trasformando i grafici in forma di equazioni:

VALORE DI $S_u$ (MPa)	EQUAZIONE
$\leq 44,5$	$A1 = \frac{4}{44,5} S_u + 1$
$44,5 \div 93,75$	$A1 = \frac{4}{49,25} S_u + 1,368$
$93,75 \div 140$	$A1 = \frac{3}{46,25} S_u + 2,919$
$140 \div 180$	$A1 = 0,0375 S_u + 6,75$
$180 \div 240$	$A1 = 0,025 S_u + 9$
$> 240$	$A1 = 15$

Qualora si utilizzi lo Standard ISRM si usa la tabella proposta da Beniafsky nell’ultima versione del sistema (1989):

$S_u$ (MPa)	> 200	100 - 200	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
Coefficiente A1	15	12	7	4	2	1	0

### 3.0 Valore di A2

Se si effettuano sondaggi è possibile ricavare il valore di RQD, da cui si ottiene il coefficiente A2, dal recupero di percentuale di carotaggio riferito alla somma degli spezzoni di carota con lunghezza maggiore o uguale a 100 mm:

$$RQD = \frac{\sum L_c}{L_t} \times 100$$

dove:

$L_c$  = somma delle lunghezze degli spezzoni di carota > 100 mm

$L_t$  = lunghezza totale del tratto in cui si è misurata  $L_c$ .

In mancanza di carote di sondaggio, RQD si ricava dal numero di famiglie di discontinuità caratterizzanti l'ammasso roccioso e dalla misura della loro spaziatura. Dalla relazione di Palmström (1982) si ha:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

dove  $J_v$  è il numero di fratture per metro cubo di roccia.

In forma alternativa RQD si può ricavare dalla formula di Priest e Hudson (1981):

$$RQD = 100 e^{(0,1 n)} (0,1 n + 1)$$

con  $n$  numero medio di giunti per metro.

Calcolato RQD con uno di questi metodi, si ricava il coefficiente A2 mediante le equazioni, che derivano sempre dai grafici di Beniauskis:

VALORE DI RQD %	EQUAZIONE
$\leq 26,5$	$A2 = \frac{3}{26,6} RQD + 3$
$26,5 \div 39$	$A2 = \frac{2}{12,4} RQD + 1,71$
$39 \div 76,6$	$A2 = \frac{7}{37,6} RQD + 0,739$
$> 76,6$	$A2 = \frac{5}{23,4} RQD - 1,367$

#### 4.0 Valore di A3

Una volta calcolata la spaziatura media, cioè la distanza media tra due discontinuità adiacenti, è possibile ricavare il valore del coefficiente A3, mediante le seguenti relazioni:

SPAZIATURA (m)	EQUAZIONE
$\leq 0,2$	$A3 = 15s + 5$
$0,2 \div 0,4$	$A3 = 10s + 6$
$0,4 \div 0,66$	$A3 = 7,752s + 5,9$
$0,66 \div 0,94$	$A3 = 7,067s + 7,35$
$0,94 \div 1,6$	$A3 = 6,07s + 8,288$
$1,6 \div 2,0$	$A3 = 5s + 10$
$> 2,0$	$A3 = 20$

#### 5.0 Valore di A4

Determinare dalle tavole di classificazione di Benjawsky il valore numerico relativo alla condizione delle discontinuità, invece, risulta molto soggettivo.

Perciò per valutare correttamente A4 conviene procedere sommando alcuni parametri numerici attribuibili alla persistenza del giunto, all'apertura del giunto, alla rugosità dello stesso, all'alterazione delle pareti, e al materiale di riempimento:

$$A4 = V1 + V2 + V3 + V4 + V5$$

I valori da assegnare sono:

##### V1 – Persistenza del giunto

PERSISTENZA (m)	V1
$< 1$	6
$1 \div 3$	4
$3 \div 10$	2
$10 \div 20$	1
$> 20$	0

##### V2 – Apertura del giunto

APERTURA (mm)	V2
Completamente chiuso	6
$< 0,1$	5
$0,1 \div 1$	4
$1 \div 5$	1
$> 5$	0

##### V3 – Rugosità del giunto

RUGOSITA'	V3
Molto Rugosa	6
Rugosa	5
Leggermente rugosa	3
Liscia	1
Levigata	0

**V4 – Alterazione delle pareti**

ALTERAZIONE	V4
Non alterate	6
Leggermente alterate	5
Mediamente alterate	3
Molto alterate	1
Decomposte	0

**V5 – Riempimento delle discontinuità**

RIEMPIMENTO (mm)	RIEMPIMENTO	V5
-	Assente	6
< 5	Compatto	4
> 5	Compatto	2
< 5	Soffice	2
> 5	Soffice	0

**6.0 Valore di A5**

Questo valore viene derivato dalle condizioni idrauliche riferite ad un fronte di 10 m. Dalle tabelle fornite da Beniawsky si ottiene:

Venute d'acqua su 10 m di lunghezza	Nessuna	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
Condizione	Asciutta	Umida	Bagnata	Deboli venute	Forti venute
Coefficiente A5	15	10	7	4	0

**7.0 Valore di A6**

Per l'orientamento delle discontinuità si applica un coefficiente di correzione A6, a seconda che si tratti di gallerie o fondazioni.

APPLICAZIONE	Molto favorevole	Favorevole	Mediocre	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Gallerie	0	-2	-5	-10	-12
Fondazioni	0	-2	-7	-15	-25

Per quanto riguarda i versanti il coefficiente A6 proposto da Beniawsky risulta troppo "conservativo" e pertanto nel calcolo di RMR si utilizza la metodologia proposta da Romana.

**8.0 Valore di RMR (rock mass rating) e parametri caratteristici dell'ammasso**

Attribuiti tutti i coefficienti, sulla base del valore  $RMR_c$  calcolato si identificano 5 intervalli a cui corrispondono 5 classi di ammasso roccioso e altrettante valutazioni di qualità della roccia:

$RMR_c$	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	$\leq 20$
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione	Molto buono	Buono	Mediocre	Scadente	Molto scadente

Dal valore di  $RMR_b$  si derivano i parametri caratteristici dell'ammasso, che secondo Beniawsky assumono il valore:

$$\text{coesione di picco } c_p \text{ (kPa)} = 5 RMR_b$$

$$\text{angolo di attrito di picco } \phi_p = 0,5 RMR_b + 5$$

$$\text{modulo di deformazione } E \text{ (GPa)} = 2 RMR_b - 100$$

I valori della coesione residua e dell'angolo di attrito residuo si ricavano introducendo nelle formule sopra indicate un valore di  $RMR_b$  modificato secondo la:

$$RMR_b = RMR_b(\text{originario}) - [0,2 \times RMR_b(\text{originario})] \text{ (Priest, 1983)}$$

La formula di E è però da considerare valida per valori di RMR superiori di 50, mentre per valori inferiori si utilizza la formula di Serafim e Pereira (1983):

$$E \text{ (GPa)} = 10^{(RMR_b - 10 / 40)}$$

Il valore di GSI (Geological Strength Index) viene ricavato dalla:

$$GSI = RMR - 5$$

dove RMR viene calcolato tenendo conto dei punteggi assegnati ai primi quattro parametri e assumendo condizioni idrauliche asciutte ( $A_5 = 15$ ). Tale relazione è da ritenersi valida per  $RMR > 23$ .

**9.0 SLOPE MASS RATING (SMR, Romana 1985)**

Romana propone di aggiungere al valore di RMR (di base), alcuni fattori di aggiustamento sulla base dell'orientamento relativo fra discontinuità e fronte del versante e aggiungere un ulteriore fattore che tiene conto del metodo di scavo:

$$SMR = RMR_b + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Il primo fattore di aggiustamento è il prodotto di tre fattori:

F1 dipende dal parallelismo fra l'immersione del fronte e l'immersione dei giunti.

F2 è riferito all'inclinazione del giunto nell'ipotesi di rottura planare.

F3 mantiene le relazioni proposte da Beniawsky per l'inclinazione fra fronte e giunti.

F4 rappresenta un fattore di correzione legato al metodo di scavo ed è stato fissato empiricamente.

Le condizioni di stabilità verificate sono relative rotture planari e per ribaltamento (toppling); il metodo è stato esteso anche alle rotture a cuneo di recente da Anbalagan et al..

Sulla base della tabella che segue si attribuiscono i valori ai fattori:

CASO		Molto favorevole	Favorevole	Mediocre	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Planare Toppling Cuneo	$\alpha_j - \alpha_f$ $\alpha_j - \alpha_f - 180^\circ$ $\alpha_i - \alpha_f$	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Planare Cuneo	$\beta_j$ $\beta_i$	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	F2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Toppling	F2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Planare Cuneo	$\beta_j - \beta_f$ $\beta_i - \beta_f$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
Toppling	$\beta_j - \beta_f$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
	F3	0	-6	-25	-50	-60

dove:

$\alpha_j$  = immersione del giunto

$\alpha_i$  = immersione della retta di intersezione di due piani per la rottura a cuneo

$\alpha_f$  = immersione del fronte del versante

$\beta_j$  = inclinazione del giunto

$\beta_i$  = inclinazione della retta di intersezione di due piani per la rottura a cuneo

$\beta_f$  = inclinazione del fronte

Il fattore F4 vale invece:

METODO DI SCAVO	F4
Scarpata naturale	15
Abbattimento con pretaglio	10
Abbattimento controllato	8
Abbattimento normale	0
Abbattimento non controllato	-8

Calcolato il valore di SMR, si possono avere indicazioni generali, fornite da Romana, sul grado di stabilità della scarpata, sul tipo di cinematismo di rottura che si può instaurare e su quanto possano pesare eventuali interventi di stabilizzazione:

SMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0
CLASSE	I	II	III	IV	V
DESCRIZIONE	Molto buona	Buona	Mediocre	Scadente	Molto scadente
STABILITA'	Sicuramente stabile	Stabile	Parzialmente stabile	Instabile	Sicuramente instabile
MODO DI ROTTURA	Assente	Possibili blocchi	Lungo piani o per cunei	Lungo piani o su grandi cunei	Su grandi piani o rototraslazionali
STABILIZZAZIONE	Nessuna	Occasionale	Sistematica	Estesa	Riprofilare la scarpata

**CLASSIFICAZIONE DI JASAREVIC E KOVACEVIC****1.0 - Introduzione**

Il metodo è stato sviluppato sulle formazioni carbonatiche della Croazia ed ha una evidente derivazione dal sistema RMR.

Il sistema di classificazione è semplice e si sviluppa attribuendo almeno tre coefficienti numerici relativi a proprietà geomeccaniche dell'ammasso roccioso e di almeno altrettanti relativi a proprietà geologico-ingegneristiche.

Ad ogni parametro viene assegnato un valore  $n_i$  variabile da 1 a 5 come riportato nella seguente tabella:

PROPRIETA' GEOMECCANICHE					PROPRIETA' GEOLOGICO-INGEGNERISTICHE						$n_i$
Su (MPa)	Is $\perp$ (MPa)	Is // (MPa)	Vp (km/sec)	Vp/Vo	$\alpha$ (°)	Acqua	RQD (%)	Jv	S (cm)	Proprietà dei giunti	
> 130	> 5,7	> 0,8	> 6,5	> 0,8	70-90	A	> 65	1-2	> 50	JRC: 16-20	1
100	5,3	0,7	4,7	0,6	0-20	U	45	2-5	20-50	JRC: 12-16	2
-	-	-	-	-			-				
130	5,7	0,8	6,5	0,8	20-35	B	65	5-10	10-20	JRC: 8-12	3
70	4,7	0,6	3,0	0,4			-				
-	-	-	-	-			-				
100	5,3	0,7	4,7	0,6	35-50	S	45	10-15	6-10	JRC: 4-8	4
40	4,3	0,5	1,2	0,2			25				
-	-	-	-	-			-				
70	4,7	0,6	3,0	0,4	50-70	F	35	> 15	< 6	JRC < 4 o riempiti	5
< 40	< 4,3	< 0,5	< 1,2	< 0,2			< 25				

- Su = resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta  
 Is  $\perp$  = indice point load misurato perpendicolarmente alla discontinuità principale  
 Is // = indice point load misurato parallelamente alla discontinuità principale  
 Vp = velocità sismica delle onde longitudinali  
 Vo = velocità sismica di riferimento (roccia intatta) delle onde longitudinali  
 $\alpha$  = inclinazione della discontinuità più sfavorevole  
 Acqua = A: assente – U: umido – B: bagnato – S: deboli venute – F: forti venute  
 Jv = numero di giunti per m<sup>3</sup>  
 S = spaziatura delle discontinuità

Se i valori non sono univoci si prende il coefficiente numerico intermedio, ad esempio per Jv variabile fra 5 e 15 si prende 3,5.

Quindi il valore dell'indice n sarà dato dalla:

$$n = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^{NT} n_i$$

dove NT è il numero delle proprietà considerate (minimo 6) nell'attribuzione dei coefficienti numerici.

Gli autori suggeriscono inoltre la seguente correlazione fra n e RMR<sub>c</sub>:

$$RMR = 110 - 20n$$

Dal calcolo di RMR è possibile derivare la classe e la qualità dell'ammasso, simile a quella di Beniawsky:

Indice n	< 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 3,5	3,5 – 4,5	> 4,5
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<= 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione	Molto buono	Buono	Mediocre	Scadente	Pessimo

Dal valore di RMR si derivano i parametri caratteristici dell'ammasso con le seguenti:

$$c \text{ (kPA)} = 3,625 \text{ RMR (Sen)}$$

$$\phi \text{ (}^\circ\text{)} = 25 (1 + 0,01 \text{ RMR}) \text{ per RMR} > 20 \text{ (Sen)}$$

$$\phi \text{ (}^\circ\text{)} = 1,5 \text{ RMR per RMR} < 20 \text{ (Sen)}$$

$$E \text{ (MPa)} = \text{Exp}(4,407 + 0,081 \text{ RMR}) \text{ (Jasarevic \& Kovacevic)}$$

Gli autori ritengono che la formula utilizzata per il calcolo di E sia più corretta rispetto a quella di Serafim e Pereira.

**CLASSIFICAZIONE DI SEN (RMR Modificato)****1.0 - Introduzione**

Sen et al., nel 2003, apportano una modifica alla determinazione di RMR proposta da Beniawki, senza modificare in alcun modo la classificazione, proponendo di calcolare RMR mediante un'equazione semplificata a partire dai soli parametri di RQD, della resistenza della roccia  $S_u$  (MPa), della spaziatura  $s$  (m), esprimendo le condizioni idrauliche in funzione della portata (G) e mantenendo i coefficienti numerici indicati da Beniawki per la condizione ( $A_4$ ) e l'orientamento delle discontinuità ( $A_6$ ).

**2.0 - Valore di A1**

A1 si può ricavare sia da prove di laboratorio (Point Load Test), sia da prove di campagna mediante sclerometro o da prove speditive (Standard ISRM), definendo la resistenza a compressione uniassiale  $S_u$ .

**2.0.1 - La prova Point Load Test**

La prova Point Load ha il vantaggio di essere portatile; da essa si deriva l'indice di carico puntuale  $I_s$  che viene correlato alla resistenza alla compressione uniassiale  $S_u$  mediante la relazione:

$$S_u = K I_s$$

K è un coefficiente moltiplicativo per il quale l'ISRM consiglia il valore 24, ma nella pratica si è evidenziato come tale valore non è univoco ma largamente variabile. Palmström suggerisce di variare K in funzione di  $I_s$  secondo lo schema seguente:

$I_s$ (MPa)	K
< 3,5	14
3,5 – 6,0	16
6,0 – 1,0	20
> 6,0	25

**2.0.2 - Le prove sclerometriche**

Il martello di Schmidt, noto come sclerometro, è ampiamente utilizzato come prova non distruttiva e volta a misurare la "durezza di rimbalzo" della roccia. Dalla prova si ricava l'indice di rimbalzo R che è possibile correlare alla resistenza alla compressione uniassiale mediante la relazione di Irfan e Dearman (1978):

$$S_u = 0,775 R + 21,3$$

Se si utilizzano prove Point Load o prove sclerometriche risulta più agevole, rispetto alle tabelle e ai grafici proposte da Beniawsky, ricavare il valore di A1 trasformando i grafici in forma di equazioni:

VALORE DI $S_u$ (MPa)	EQUAZIONE
$\leq 44,5$	$A1 = \frac{4}{44,5} S_u + 1$

44,5 ÷ 93,75	$A1 = \frac{4}{49,25} S_u + 1,368$
93,75 ÷ 140	$A1 = \frac{3}{46,25} S_u + 2,919$
140 ÷ 180	$A1 = 0,0375 S_u + 6,75$
180 ÷ 240	$A1 = 0,025 S_u + 9$
> 240	$A1 = 15$

### 3.0 - Valore di A2

Se si effettuano sondaggi è possibile ricavare il valore di RQD, da cui si ottiene il coefficiente A2, dal recupero di percentuale di carotaggio riferito alla somma degli spezzoni di carota con lunghezza maggiore o uguale a 100 mm:

$$RQD = \frac{\sum L_c}{L_t} \times 100$$

dove:

$L_c$  = somma delle lunghezze degli spezzoni di carota > 100 mm

$L_t$  = lunghezza totale del tratto in cui si è misurata  $L_c$ .

In forma alternativa RQD si può ricavare dalla formula di Priest e Hudson (1981):

$$RQD = 100 e^{(0,1 n)} (0,1 n + 1)$$

con n numero medio di giunti per metro.

Calcolato RQD con uno di questi metodi, si ricava il coefficiente A2 mediante le equazioni, che derivano sempre dai grafici di Beniawsky:

VALORE DI RQD %	EQUAZIONE
$\leq 26,5$	$A2 = \frac{3}{26,6} RQD + 3$
26,5 ÷ 39	$A2 = \frac{2}{12,4} RQD + 1,71$
39 ÷ 76,6	$A2 = \frac{7}{37,6} RQD + 0,739$
> 76,6	$A2 = \frac{5}{23,4} RQD - 1,367$

### 4.0 - Valore di A3

Una volta calcolata la spaziatura media, cioè la distanza media tra due discontinuità adiacenti, è possibile ricavare il valore del coefficiente A3, mediante le seguenti relazioni:

SPAZIATURA (m)	EQUAZIONE
$\leq 0,2$	$A3 = 15 s + 5$
0,2 ÷ 0,4	$A3 = 10 s + 6$
0,4 ÷ 0,66	$A3 = 7,752 s + 5,9$

0,66 ÷ 0,94	$A3 = 7,067s + 7,35$
0,94 ÷ 1,6	$A3 = 6,07s + 8,288$
1,6 ÷ 2,0	$A3 = 5s + 10$
> 2,0	$A3 = 20$

### 5.0 - Valore di A4

Determinare dalle tavole di classificazione di Beniawsky il valore numerico relativo alla condizione delle discontinuità, invece, risulta molto soggettivo.

Perciò per valutare correttamente A4 conviene procedere sommando alcuni parametri numerici attribuibili alla persistenza del giunto, all'apertura del giunto, alla rugosità dello stesso, all'alterazione delle pareti, e al materiale di riempimento:

$$A4 = V1 + V2 + V3 + V4 + V5$$

I valori da assegnare sono:

#### V1 – Persistenza del giunto

PERSISTENZA (m)	V1
< 1	6
1 ÷ 3	4
3 ÷ 10	2
10 ÷ 20	1
> 20	0

#### V2 – Apertura del giunto

APERTURA (mm)	V2
Completamente chiuso	6
< 0,1	5
0,1 ÷ 1	4
1 ÷ 5	1
> 5	0

#### V3 – Rugosità del giunto

RUGOSITA'	V3
Molto Rugosa	6
Rugosa	5
Leggermente rugosa	3
Liscia	1
Levigata	0

#### V4 – Alterazione delle pareti

ALTERAZIONE	V4
Non alterate	6
Leggermente alterate	5
Mediamente alterate	3

Molto alterate	1
Decomposte	0

**V5 – Riempimento delle discontinuità**

RIEMPIMENTO (mm)	RIEMPIMENTO	V5
-	Assente	6
< 5	Compatto	4
> 5	Compatto	2
< 5	Soffice	2
> 5	Soffice	0

**6.0 - Valore di A5**

Questo valore viene derivato dalle condizioni idrauliche riferite ad un fronte di 10 m. Dalle tabelle fornite da Beniaowsky si ottiene:

Venute d'acqua su 10 m di lunghezza	Nessuna	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
Condizione	Asciutta	Umida	Bagnata	Deboli venute	Forti venute
Coefficiente A5	15	10	7	4	0

**7.0 - Valore di A6**

Per l'orientamento delle discontinuità si applica un coefficiente di correzione A6, a seconda che si tratti di gallerie o fondazioni.

APPLICAZIONE	Molto favorevole	Favorevole	Mediocre	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Gallerie	0	-2	-5	-10	-12
Fondazioni	0	-2	-7	-15	-25

Secondo la formulazione degli Autori il valore  $RMR_c$  si calcola mediante la seguente:

$$RMR_c = 0,2 RQD + 15 \log(s) + 0,075 S_u - 2,9 \log(G) + 34 + (A_5 + A_6)$$

Qualora manchi un sondaggio da cui derivare RQD, si introduce il valore di n (numero medio di giunti) e  $RMR_c$  viene calcolato dalla:

$$RMR_c = 20 (1 + 0,1 n) e^{-0,1n} - 15 \log(n) + 0,075 S_u - 2,9 \log(G) + 34 + (A_5 + A_6)$$

Sulla base del valore  $RMR_c$  calcolato si identificano gli intervalli a cui corrispondono le classi di ammasso roccioso e altrettante valutazioni di qualità della roccia:

$RMR_c$	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	$\leq 20$
Classe	I	II	III	IV	V

Descrizione	Molto buono	Buono	Mediocre	Scadente	Molto scadente
-------------	-------------	-------	----------	----------	----------------

Dal valore di  $RMR_c$  si derivano i parametri caratteristici dell'ammasso, che secondo Sen et al. assumono i seguenti valori:

$$\text{coesione } c \text{ (kPA)} = 3,625 RMR_c$$

$$\text{angolo di attrito } \phi = 25 (1 + 0,01 RMR_c) \text{ per } RMR_c > 20$$

$$\text{angolo di attrito } \phi = 1,5 RMR_c \text{ per } RMR_c < 20$$

**CLASSIFICAZIONE DI ROBERTSON****1.0 - Introduzione**

Il metodo, applicabile solo alla stabilità di versanti in roccia, è derivato da RMR ed è stato sviluppato dallo Studio di Consulenza Steffen Robertson & Kirsten, i quali partono dalla constatazione che il sistema RMR, quando applicato in scavi di cava in ammassi teneri con valori di RMR inferiori a 40, porta ad una stima non corretta dei parametri di resistenza.

Il valore di SRMR si ricava da:

$$SRMR = A1 + A2 + A3 + A4$$

A1 = valore derivato dalla resistenza della roccia intatta;

A2 = valore derivato da Rock Quality Designation Index (Indice RQD);

A3 = valore derivato dalla spaziatura delle discontinuità;

A4 = valore derivato dalle condizioni delle discontinuità.

**2.0 - Valore di A1**

Is (MPa)	> 10	4	2	1	Non applicabile – usare Su						
		-	-	-							
		10	4	2							
Su (MPa)	> 250	100	50	25	5	1	0,6	0,15	0,08	0,04	< 0,04
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		250	100	50	25	5	1	0,6	0,15	0,08	
Coefficiente	30	27	22	19	17	15	10	6	2	1	0

**3.0 - Valore di A2**

Se si effettuano sondaggi è possibile ricavare il valore di RQD, da cui si ottiene il coefficiente A2, dal recupero di percentuale di carotaggio riferito alla somma degli spezzoni di carota con lunghezza maggiore o uguale a 100 mm:

$$RQD = \frac{\sum L_c}{L_t} \times 100$$

dove:

$L_c$  = somma delle lunghezze degli spezzoni di carota > 100 mm

$L_t$  = lunghezza totale del tratto in cui si è misurata  $L_c$ .

In mancanza di carote di sondaggio, RQD si ricava dal numero di famiglie di discontinuità caratterizzanti l'ammasso roccioso e dalla misura della loro spaziatura. Dalla relazione di Palmström (1982) si ha:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

dove  $J_v$  è il numero di fratture per metro cubo di roccia.

In forma alternativa RQD si può ricavare dalla formula di Priest e Hudson (1981):

$$RQD = 100 e^{(0,1 n)} (0,1 n + 1)$$

con n numero medio di giunti per metro.

Calcolato RQD con uno di questi metodi, si ricava il coefficiente A2 mediante la tabella seguente:

RQD	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25
Coefficiente	20	17	13	8	3

#### 4.0 - Valore di A3

s (m)	> 2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	< 0,06
Coefficiente	20	15	10	8	5

#### 5.0 - Valore di A4

Condizione	Molto scabre Non continue Chiuse Pareti non alterate	Leggermente scabre Continue Apertura < 1 mm Pareti leggermente alterate	Leggermente scabre Continue Apertura < 1 mm Pareti alterate	Piane o lisce Continue Apertura 1 - 5 mm Riempimento < 5 mm	Continue Apertura > 5 mm Riempimento > 5 mm (da applicare sempre se Su < 1 MPa)
Coefficiente	30	25	20	10	0

Il fattore legato alle condizioni idrauliche non viene considerato dato che la quantità di acqua presente nell'ammasso roccioso non ne influenza la sua resistenza. Essendo però l'acqua una forza destabilizzante, va inserita come tale nella verifica di stabilità.

Per valori di SRMR inferiori a 40 la rottura è funzione delle sole caratteristiche meccaniche dell'ammasso, ai quali Robertson attribuisce i seguenti valori identificando una ulteriore suddivisione di classi:

SRMR	Classe	Coesione (kPa)	Angolo di attrito (°)
40 - 35	IVa	138	40
35 - 30	IVa	86	36
30 - 25	IVb	50 - 72	30 - 34
25 - 20	IVb	50 - 70	26 - 30
20 - 15	Va	50 - 60	24 - 27,5
15 - 5	Vb	14 - 50	21 - 24

## CLASSIFICAZIONE DI SINGH E GOEL

### 1.0 - Introduzione

Sing & Goel nel 1999, per l'applicazione nel campo delle gallerie, propongono di calcolare il valore dell'indice N (Rock Mass Number) dalla classificazione Q di Barton, mediante la formula:

$$N = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_w$$

esprimendo cioè N come valore di Q escluso l'effetto tensionale.

Nella formula i vari indici sono:

RQD (Rock Quality Designation), che tiene conto della suddivisione della massa rocciosa

$J_n$  (Joint Set Number), che dipende dal numero di famiglie di giunti presenti nell'ammasso roccioso

$J_r$  (Joint Roughness Number), che dipende dalla rugosità della famiglia più sfavorevole

$J_a$  (Joint Alteration Number), che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento, e che viene ugualmente determinato sulla famiglia più sfavorevole

$J_w$  (Joint Water Number), che dipende dalle condizioni idrogeologiche

### 2.0 – parametri della classificazione di Singh e Goel

**Parametro RQD** (Rock Quality Designation, che tiene conto della suddivisione della massa rocciosa):

Prende il suo valore nominale; se RQD risulta < 10, si assume 10.

Se si effettuano sondaggi è possibile ricavare il valore di RQD dal recupero di percentuale di carotaggio riferito alla somma degli spezzoni di carota con lunghezza maggiore o uguale a 100 mm:

$$RQD = \frac{\sum L_c}{L_t} \times 100$$

dove:

$L_c$  = somma delle lunghezze degli spezzoni di carota > 100 mm

$L_t$  = lunghezza totale del tratto in cui si è misurata  $L_c$ .

In mancanza di carote di sondaggio, RQD si ricava dal numero di famiglie di discontinuità caratterizzanti l'ammasso roccioso e dalla misura della loro spaziatura. Dalla relazione di Palmström (1982) si ha:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

dove  $J_v$  è il numero di fratture per metro cubo di roccia.

In forma alternativa RQD si può ricavare dalla formula di Priest e Hudson (1981):

$$RQD = 100 e^{(0,1 n)} (0,1 n + 1)$$

con n numero medio di giunti per metro.

**Parametro Jn** (Joint Set Number, che dipende dal numero di famiglie di giunti presenti nell'ammasso roccioso):

DEFINIZIONE	Jn
Roccia massiva, nessuna o rare discontinuità	0,5 – 1
Una serie di discontinuità	2
Una serie di discontinuità + quelle random (casuali)	3
Due serie di discontinuità	4
Due serie di discontinuità + quelle random	6
Tre serie di discontinuità	9
Tre serie di discontinuità + quelle random	12
Quattro o più serie di discontinuità	15
Roccia completamente disgregata	20

*Nel caso di gallerie:*

*in zona di imbocco Jn va raddoppiato; in una zona di intersezione di due gallerie Jn va triplicato.*

**Parametro Jr** (Joint Roughness Number, che dipende dalla rugosità della famiglia più sfavorevole):

DEFINIZIONE	Jr
Giunti discontinui	4
Giunti scabri o irregolari, ondulati	3
Giunti lisci, ondulati	2
Giunti levigati, ondulati	1,5
Giunti scabri o irregolari, piani	1,5
Giunti lisci, piani	1
Giunti levigati, piani	0,5
Zone mineralizzate contenenti minerali argillosi a riempire la discontinuità	1
Zone mineralizzate sabbia, ghiaia, zone disgregate, a riempire la discontinuità	1

*La descrizione si riferisce alle caratteristiche a piccola e a media scala. Se la spaziatura media della famiglia principale è superiore a 3 m aumentare Jr di 1. Nel caso di giunti piani, levigati, contenenti strie o lineazioni, se queste sono orientate nella direzione più sfavorevole si utilizza 0,5.*

**Parametro Ja** (Joint Alteration Number, che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento, che viene determinato sulla famiglia più sfavorevole):

Giunti sostanzialmente chiusi (apertura 1 – 3 mm) con pareti a contatto:

DEFINIZIONE	Ja
Giunti sigillati o mineralizzati	0,75
Giunti non alterati o con lievi ossidazioni	1
Giunti leggermente alterati o con spalmature di materiale non plastico	2
Giunti con spalmature limose, frazione argillosa limitata non plastica	3
Spalmature di minerali con bassa resistenza attritiva (argille, miche, talco, grafite, clorite, gesso)	4

Giunti mediamente aperti (< 5 mm) e presenza di riempimento che permette ancora il contatto fra le pareti in caso di scorrimento:

DEFINIZIONE	Ja
Riempimento sabbioso	4
Riempimento argilloso non plastico, molto sovraconsolidato	6
Riempimento argilloso plastico, mediamente sovraconsolidato	8
Riempimento argilloso rigonfiante	8 – 12*

\* il valore da assegnare dipende dalla percentuale della frazione argillosa rigonfiante e dalla possibilità che la stessa venga in contatto con l'acqua.

Giunti aperti (> 5 mm) senza nessun contatto fra le pareti in caso di scorrimento:

DEFINIZIONE	Ja
Zone o fasce di argilla limosa o sabbiosa non plastica	5
Zone o fasce di roccia disgregata	6
Zone o fasce di argilla non plastica	6
Zone o fasce di argilla plastica rigonfiante	8
Zone o fasce di argilla rigonfiante	12
Zone continue molto spesse di argilla non plastica	10
Zone continue molto spesse di argilla plastica non rigonfiante	13
Zone continue molto spesse di argilla plastica rigonfiante	13 – 20*

\* il valore da assegnare dipende dalla percentuale della frazione argillosa rigonfiante e dalla possibilità che la stessa venga in contatto con l'acqua.

**Parametro Jw** (Joint water Number, che dipende dalle condizioni idrogeologiche):

DEFINIZIONE	Jw
Acqua assente o scarsa, localmente < 5 lt/min	1
Afflusso medio con occasionale dilavamento del riempimento del giunto	0,66
Afflusso forte o ad alta pressione in rocce compatte con discontinuità aperte senza riempimento	0,5
Venute forti o ad alta pressione con dilavamento del riempimento del giunto	0,33
Venute eccezionalmente forti o a pressioni molto elevate subito dopo l'avanzamento, a diminuire nel tempo	0,2 – 0,1
Venute eccezionalmente forti o a pressioni molto elevate subito dopo l'avanzamento, costanti nel tempo	0,1 – 0,05

Negli ultimi quattro casi se sono installati sistemi efficaci di drenaggio Jw va portato a 1 o a 0,66.

Per una caratterizzazione dell'ammasso lontano dall'influenza dello scavo e nel caso che  $RQD/J_n$  sia sufficientemente basso (0,5 - 25) in modo da assicurare una buona connettività idraulica, si possono assumere i valori di Jw (1,0 – 0,66 – 0,5 – 0,33) in funzione delle altezze di ricoprimento (0 – 5; 5 – 25; 25 – 250; > 250).

### Valore del coefficiente A1

A1 si può ricavare sia da prove di laboratorio (Point Load Test), sia da prove di campagna mediante sclerometro o da prove speditive (Standard ISRM), definendo la resistenza a compressione uniassiale  $S_u$ .

#### a) La prova Point Load Test

La prova Point Load ha il vantaggio di essere portatile; da essa si deriva l'indice di carico puntuale  $I_s$  che viene correlato alla resistenza alla compressione uniassiale  $S_u$  mediante la relazione:

$$S_u = K I_s$$

K è un coefficiente moltiplicativo per il quale l'ISRM consiglia il valore 24, ma nella pratica si è evidenziato come tale valore non è univoco ma largamente variabile. Palmström suggerisce di variare K in funzione di  $I_s$  secondo lo schema seguente:

$I_s$ (MPa)	K
< 3,5	14
3,5 – 6,0	16
6,0 – 1,0	20
> 6,0	25

### b) Le prove sclerometriche

Il martello di Schmidt, noto come sclerometro, è ampiamente utilizzato come prova non distruttiva e volta a misurare la “durezza di rimbalzo” della roccia. Dalla prova si ricava l'indice di rimbalzo R che è possibile correlare alla resistenza alla compressione uniassiale mediante la relazione di Irfan e Dearman (1978):

$$S_u = 0,775 R + 21,3$$

Definita la resistenza a compressione  $S_u$  è possibile ricavare il valore del parametro A1.

Se si utilizzano prove Point Load o prove sclerometriche risulta più agevole ricavare il valore di A1 trasformando i grafici proposti da Beniawsky in forma di equazioni:

VALORE DI $S_u$ (MPa)	EQUAZIONE
$\leq 44,5$	$A1 = \frac{4}{44,5} S_u + 1$
$44,5 \div 93,75$	$A1 = \frac{4}{49,25} S_u + 1,368$
$93,75 \div 140$	$A1 = \frac{3}{46,25} S_u + 2,919$
$140 \div 180$	$A1 = 0,0375 S_u + 6,75$
$180 \div 240$	$A1 = 0,025 S_u + 9$
$> 240$	$A1 = 15$

### Valore del coefficiente A6

Per l'orientamento delle discontinuità si applica un coefficiente di correzione A6.

Molto favorevole	Favorevole	Mediocre	Sfavorevole	Molto sfavorevole
0	-2	-5	-10	-12

### 3.0 - Risultati derivati dal calcolo di N

Ricavato il valore di N, si ottiene il valore di RCR (Rock Condition Rating) come proposto da Singh-Goel:

$$RCR = 8 \ln(N) + 30$$

Dal valore di RCR si derivano tutti gli altri parametri:

$$RMR_{\text{corretto}} = RCR + (A1 + A6)$$

$$RMR_{\text{base}} = RCR + A1$$

dove

RMR<sub>corretto</sub> = Rock Mass Rating (RMR) corretto

RMR<sub>base</sub> = Rock Mass Rating (RMR) di base

Dalla formula:

$$RMR = 9 \ln(Q) + 44$$

proposta da Beniawsky, si ottiene invece l'indice Q di Barton:

$$Q = \text{Exp} \left( \frac{RMR - 44}{9} \right)$$

e perciò:

$$SRF = \frac{N}{Q}$$

$$Q_c = \frac{N}{SRF} \times \frac{S_u}{100}$$

dove

SRF = Stress Reduction Factor, che è funzione dello stato tensionale in rocce massive o dal disturbo tettonico

Q<sub>c</sub> = Indice Q normalizzato nei confronti della resistenza a compressione monoassiale della roccia

Inoltre dal calcolo di RMR è possibile derivare:

RMR <sub>c</sub>	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<= 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione	Molto buono	Buono	Mediocre	Scadente	Molto scadente

Dal valore di RMR<sub>b</sub> si derivano i parametri caratteristici dell'ammasso, che secondo Beniawsky assumono il valore:

$$\text{coesione di picco } c_p \text{ (kPa)} = 5 RMR_b$$

$$\text{angolo di attrito di picco } \phi_p = 0,5 RMR_b + 5$$

$$\text{modulo di deformazione } E \text{ (GPa)} = 2 RMR_b - 100$$

I valori della coesione residua e dell'angolo di attrito residuo si ricavano introducendo nelle formule sopra indicate un valore di  $RMR_b$  modificato secondo la:

$$RMR_b = RMR_b(\text{originario}) - [0,2 \times RMR_b(\text{originario})] \text{ (Priest, 1983)}$$

La formula di E è però da considerare valida per valori di RMR superiori di 50, mentre per valori inferiori si utilizza la formula di Serafim e Pereira (1983):

$$E \text{ (GPa)} = 10^{(RMR_b - 10 / 40)}$$

Mentre da Q:

Q	Classe	Descrizione
0,001 - 0,01	IX	Eccezionalmente scadente
0,01 - 0,1	VIII	Estremamente scadente
0,1 - 1	VII	Molto scadente
1 - 4	VI	Scadente
4 - 10	V	Mediocre
10 - 40	IV	Buona
40 - 100	III	Molto buona
100 - 400	II	Estremamente buona
400 - 1000	I	Ottima

Ed è possibile estrapolare due caratteristiche di resistenza dell'ammasso:

- 3) Una componente attritiva, che può essere considerata come approssimazione dell'angolo di attrito dell'ammasso

$$FC = \tan^{-1} \left( \frac{J_r}{J_a} J_w \right)$$

- 4) Una componente coesiva, che può essere considerata come approssimazione della coesione dell'ammasso

$$CC = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_c}{100}$$

Invece il modulo di deformazione statico dell'ammasso può essere determinato mediante la:

$$E_M \text{ (GPa)} = 10 Q_c^{1/3}$$

in accordo con l'espressione di Serafim e Pereira derivata da RMR.