

# MECCANICA DELLE ROCCE 05BPMMX

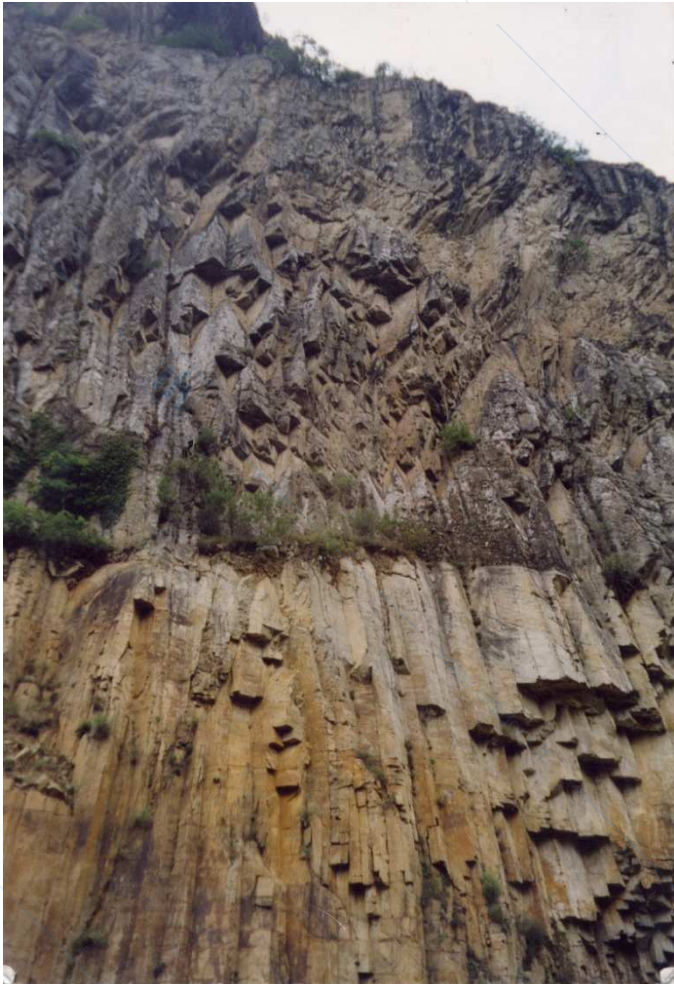
Docente

**Prof. Claudio SCAVIA (011/ 0904823)**  
*[claudio.scavia@polito.it](mailto:claudio.scavia@polito.it)*

Esercitatore

**Prof. Monica BARBERO (011/ 0904888)**  
*[monica.barbero@polito.it](mailto:monica.barbero@polito.it)*





## SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE



## SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE

I sistemi di classificazione sono applicati allo studio di ammassi rocciosi interessati da opere geotecniche come gallerie o sistemi di fondazione (pile di ponti, dighe, ecc) e vengono utilizzati per:

***Stimare le caratteristiche meccaniche (deformabilità e resistenza) dell'ammasso roccioso considerato come un mezzo continuo equivalente (omogeneo ed isotropo).***

***Strumento "progettuale" e cioè per valutare, ad esempio, nel caso della realizzazione di gallerie, gli eventuali sistemi di rinforzo e/o sostegno necessari affinché le operazioni di scavo si svolgano in sicurezza***

Nel caso in cui lo scopo della caratterizzazione dell'ammasso roccioso sia l'analisi delle condizioni di stabilità dei versanti (scivolamento planare, tridimensionale, ribaltamento blocchi, ecc) risulta più difficoltoso utilizzare sistemi di classificazione per caratterizzare l'ammasso roccioso. Infatti, in quanto in questo caso il problema deve essere affrontato considerando il mezzo come DISCONTINUO in quanto le singole discontinuità influenzano sensibilmente la stabilità dei volumi di roccia. Esistono dei sistemi di classificazione "dedicati".



## SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE

- I metodi di indagine come perforazioni di sondaggio e rilievi lungo stendimento, contribuiscono alla descrizione in termini qualitativi e quantitativi dell'ammasso roccioso e delle discontinuità.
- Si intende ora utilizzare tale descrizione, mediante la definizione di parametri caratteristici, che portano a " classificare l'ammasso roccioso suddividendolo in classi di qualità ".

I metodi di classificazione permettono di suddividere l'ammasso roccioso in **classi** di diversa qualità dal punto di vista delle loro proprietà meccaniche globali. Questi metodi esaminano alcune fondamentali caratteristiche della roccia intatta e delle discontinuità dando, a seconda delle diverse situazioni, dei valori quantitativi, per ognuna di esse.

a)	<b>RMR</b>	Rock Mass Rating, Bieniawski, (1973, 1984)
b)	<b>Q</b>	Quality system, Barton et al. 1974
c)	<b>RMi</b>	Rock Mass index, Palmostrøm, 1996
d)	<b>GSI</b>	Geological Strength Index, Hoek, 1994
e)	<b>SMR</b>	Slope Mass Rating, Romana



## RMR – ROCK MASS RATING (BIENIAWSKI)

Per la definizione del valore di RMR caratteristico, vengono considerati 5 parametri considerati maggiormente significativi per la definizione della qualità dell'ammasso roccioso.

1. Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta,  $C_0$
2. RQD
3. Spaziatura discontinuità
4. Condizione discontinuità
5. Presenza d'acqua

Ad ogni valore o stima dei parametri sopra definiti corrisponde un coefficiente numerico (Rating) che contribuisce alla definizione per somma dell'indice RMR e così all'attribuzione della relativa classe di appartenenza (classi da I a V).

L'indice così definito viene chiamato **RMR di base** ed è utilizzato per la **stima delle caratteristiche meccaniche** dell'ammasso roccioso.

RMR	100-80	80-60	60-40	40-20	<20
CLASSE	I	II	III	IV	V
Qualità ammasso	Molto buona	Buona	Media	Povera	Molto povera



## **RMR<sub>BASE</sub> – Resistenza della roccia intatta**

Può essere stimata attraverso:

1. Prove di compressione monoassiale
2. Prove di carico puntuale (Point load test)

In entrambi i casi i campioni possono essere prelevati direttamente dagli spezzoni di carota (di opportuna lunghezza) prelevati attraverso sondaggi a carotaggio continuo.

Nel primo caso, i provini devono essere preparati e le prove eseguite in laboratori opportunamente attrezzati. Nel secondo caso, possono essere utilizzati direttamente gli spezzoni di carota e le prove eseguite facilmente in sito

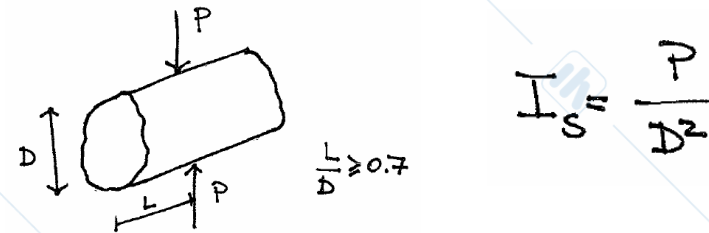


# RMR<sub>BASE</sub> – Resistenza della roccia intatta

## Resistenza a compressione monoassiale Co



## Point Load Test (prove di carico puntuale)



$Co \approx 25 Is$

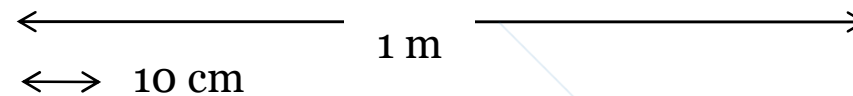
Co [MPa]	<1	1÷5	5÷25	25÷50	50÷100	100÷250	>250
Is [MPa]	Per bassi valori e preferibile la prova di compressione monoassiale			1÷2	2÷4	4÷10	>10
Punteggio	0	1	2	4	7	12	15



## RMR<sub>BASE</sub> – RQD Rock Quality Designation

Rappresenta il recupero percentuale modificato ed è dato dalla somma percentuale degli spezzoni di carota di lunghezza >10 cm e la lunghezza totale considerata

$$RQD = \frac{\sum_i L_{i>10cm}}{L_{TOT}}$$



RQD [%]	<25	25÷50	50÷75	75÷90	90÷100
Punteggio	3	8	13	17	20



## RMR<sub>BASE</sub> – Spaziatura discontinuità

Si considera la spaziatura media caratteristica dell'ammasso roccioso.

+ da rilievo lungo stendimento di lunghezza L in cui vengono rilevate N discontinuità:

$$S_m = \frac{L}{N} \text{ [m]}$$

+ se sono note le spaziature dei singoli sistemi e ricordando che la frequenza è pari al reciproco della spaziatura e che la frequenza dell'ammasso è pari alla somma delle singole frequenze

$$\lambda_m = \sum_i \lambda_i = \sum_i \frac{1}{S_i} \Leftrightarrow S_m = \frac{1}{\lambda_m}$$

<b>Spaziatura media [m]</b>	<b>&lt;0.06</b>	<b>0.06÷0.2</b>	<b>0.2÷0.6</b>	<b>0.6÷2</b>	<b>&gt;2</b>
<b>Punteggio</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>



## RMR<sub>BASE</sub> – Condizione delle discontinuità

Le condizioni generali delle discontinuità vengono esaminate considerandone differenti aspetti:

1. Scabrezza
2. Continuità (o persistenza)
3. Apertura
4. Riempimento
5. Alterazione

Tali parametri possono essere considerati in una descrizione complessiva delle condizioni generali delle discontinuità o possono essere valutati singolarmente.

<b>Condizioni generali discontinuità</b>	Riempimento di argilla molle di potenza > 5 mm o Discontinuità collegate aperture > 5 mm	Superfici lisce e riempimenti argillosi di potenza < 5 mm o Discontinuità collegate con aperture di 1÷5 mm	<b>Superfici poco scabre. Apertura delle discontinuità &lt; 1mm</b>	<b>Superfici scabre. Apertura delle discontinuità &lt; 1mm</b>	<b>Superfici molto scabre. Discontinuità chiuse e separate</b>
<b>Punteggio</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>



## RMR<sub>BASE</sub> – Condizione delle discontinuità

Le condizioni generali delle discontinuità vengono esaminate considerandone differenti aspetti

Parametro	Coefficiente				
Continuità	< 1 m	1 + 3 m	3 + 10 m	10 + 20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
Apertura	Chiusi	< 0.1 mm	0.1 + 1.0 mm	1.0 + 5.0 mm	> 5.0 mm
	6	5	4	1	0
Scabrezza	Molto scabri	Scabri	Poco scabri	Lisci	Levigati
	6	5	3	1	0
Riempimento	Assente	Duro		Soffice	
		< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	6	4	2	2	0
Alterazione	Assente	Debolmente alterati	Moderatamente alterati	Molto alterati	Decomposti
		6	5	3	1

**Nota:** alcune condizioni sono mutuamente escludibili. Per esempio, se è presente del riempimento il contributo della scabrezza è irrilevante, dato che il suo effetto sarà annullato dall'influenza del materiale di riempimento.



## RMR<sub>BASE</sub> – Venute d'acqua

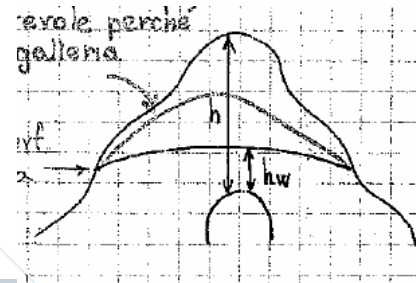
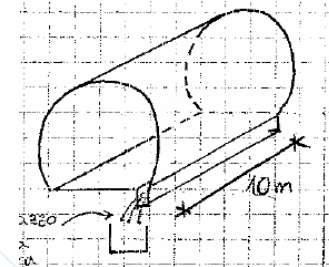
Le condizioni di flusso possono essere considerate in maniera qualitativa o quantitativa:

1. Giudizio qualitativo complessivo basato sull'esperienza di chi è incaricato della caratterizzazione (massa rocciosa asciutta, umida, bagnata, ecc)

2. Misure di portata lungo un tratto di galleria, misurando la portata nella canaletta di raccolta ed allontanamento delle acque. La misura è riferita ad un tratto di lunghezza pari a 10 m. La portata da considerare è pari alla

differenza tra la portata in entrata e quella in uscita rispetto al tratto considerato

3. Rapporto tra la tensione dell'acqua nelle discontinuità e la tensione verticale massima, calcolate nella zona di interesse degli scavi.



$$\sigma_v = h \cdot \gamma_{\text{terreno}}$$
$$u = \gamma_w \cdot h_w$$
$$\Rightarrow \text{rapporto} = \frac{u}{\sigma_v}$$



## RMR<sub>BASE</sub> – Venute d'acqua

Condizioni generali roccia	Venute d'acqua	Stillicidi	Bagnata	Umida	Asciutta
Portata d'acqua in 10 m di galleria [l/min]	>125	125÷25	25÷10	<10	0
<u>Pressione acqua</u> Tensione max	>0.5	0.5÷0.2	0.2÷0.1	<0.1	0
<b>Punteggio</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>15</b>



## RMR<sub>BASE</sub> – Classificazione

La somma dei punteggi così ottenuta fornisce il valore di base dell' RMR permette la classificazione dell'ammasso roccioso e può essere utilizzato per la STIMA dei PARAMETRI di DEFORMABILITA' e di RESISTENZA

RMR	<20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
CLASSE	V	IV	III	II	I
Qualità ammasso	Molto povera	Povera	Media	Buona	Molto buona



# RMR<sub>BASE</sub> – Parametri meccanici A.R.

## Parametri deformabilità

$$E_M [GPa] = 2RMR - 100 \quad (RMR > 50)$$

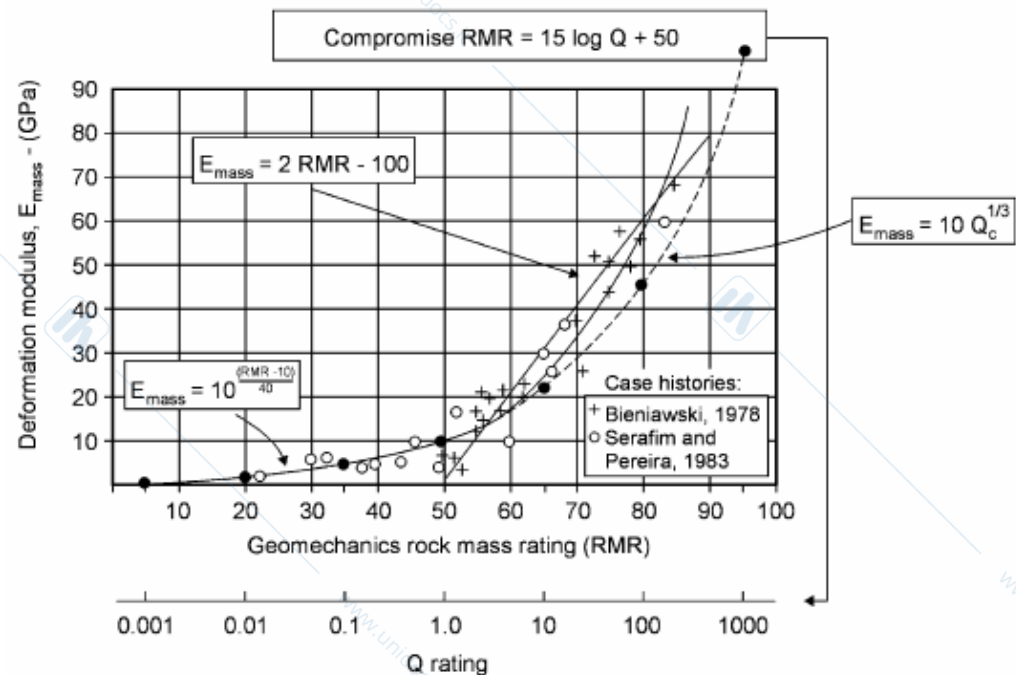
Bieniawski (1978)

$$E_M [GPa] = 10^{\frac{RMR - 10}{40}} \quad RMR < 50$$

Serafim & Pereira (1983)

## Parametri Resistenza (M.C.)

RMR	<20	21÷40	41÷60	61÷80	81÷100
Coesione [MPa]	<0.1	0.1÷0.2	0.2÷0.3	0.3÷0.4	>0.4
Angolo resistenza taglio [°]	< 15	15÷25	25÷35	35÷45	>45



Bieniawski (1984)



## RMR<sub>CORRETTO</sub> - Orientazione delle discontinuità

In relazione alla tipologia di opera geotecnica (GALLERIA, FONDAZIONE, STABILITA' VERSANTE) che interesserà l'ammasso roccioso analizzato è necessario tener conto dell'orientazione dei sistemi di discontinuità analizzata relativamente alla direzione di esecuzione dell'opera.

Analizziamo il caso di GALLERIE

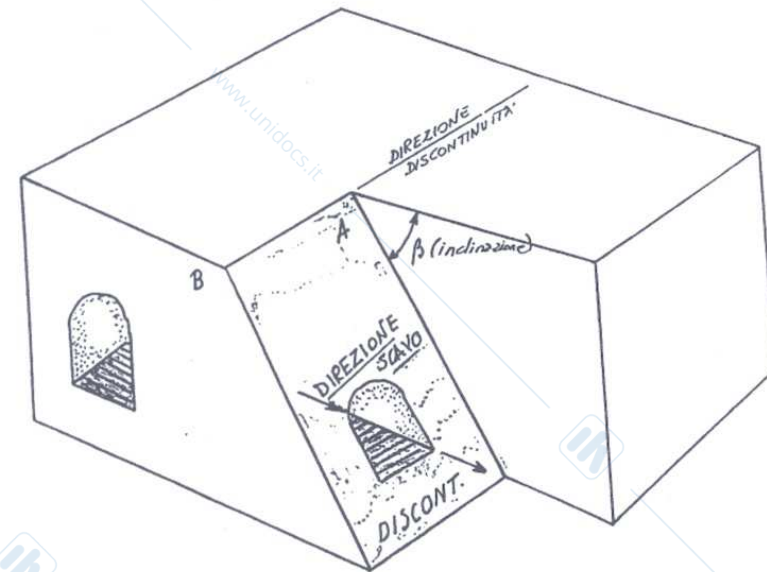
Nelle due ipotesi limite, il sistema di discontinuità può avere una

**A. Direzione di immersione PARALLELA alla direzione di scavo**

**B. Direzione di immersione PERPENDICOLARE alla direzione di scavo**

Il parametro numerico corrispondente alle condizioni di orientazione assume valori **NEGATIVI** (diminuisce il valore di RMR<sub>base</sub>)  
Tanto maggiore quanto sfavorevoli sono  
Le condizioni di giacitura.

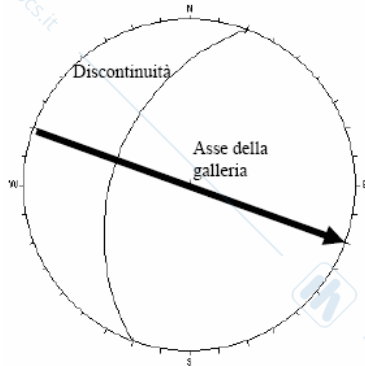
$$RMR_{\text{corretto}} = RMR_{\text{base}} - P_{\text{orientazione}}$$



# RMR<sub>CORRETTO</sub> - Orientazione delle discontinuità

## A. Direzione di immersione PARALLELA alla direzione di scavo

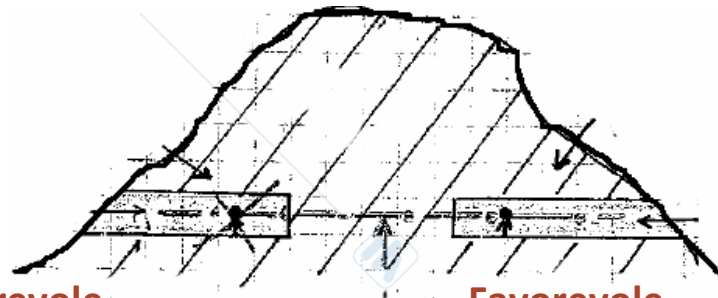
### A1. Discorde



### Sfavorevole

L'orientazione è tale che si possono distaccare blocchi prima di aver rinforzato o sostenuto lo scavo, che scivolano verso gli operatori

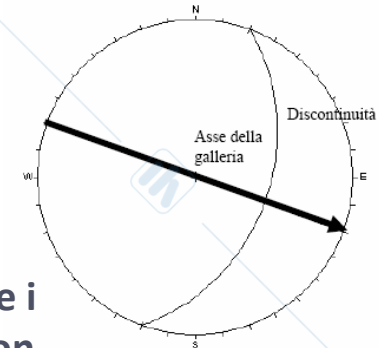
Il grado di sicurezza dipende anche dall'inclinazione delle discontinuità



### Favorevole

L'orientazione è tale che i blocchi che si isolano non possono mobilitarsi verso la parte libera del fronte

### A2. Concorde

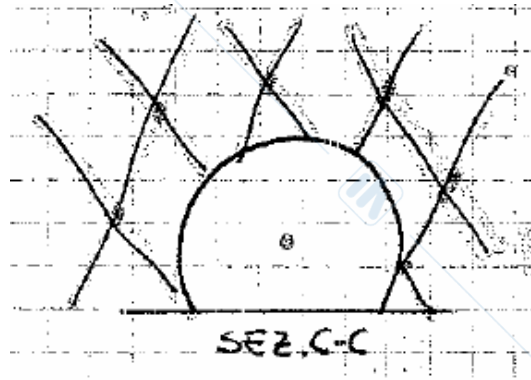
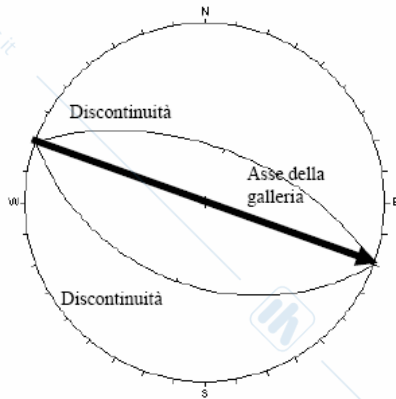


INCLINAZIONE	<20	20÷45	45÷90	
CONCORDE	Mediocre	Favorevole	Molto Favorevole	Condizione PARAMETRO
	-5	-2	0	
DISCORDE	Mediocre	Sfavorevole	Mediocre	Condizione PARAMETRO
	-5	-10	-5	



# RMR<sub>CORRETTO</sub> - Orientazione delle discontinuità

## B. Direzione di immersione PERPENDICOLARE alla direzione di scavo



L'orientazione peggiore corrisponde a discontinuità sub-verticali

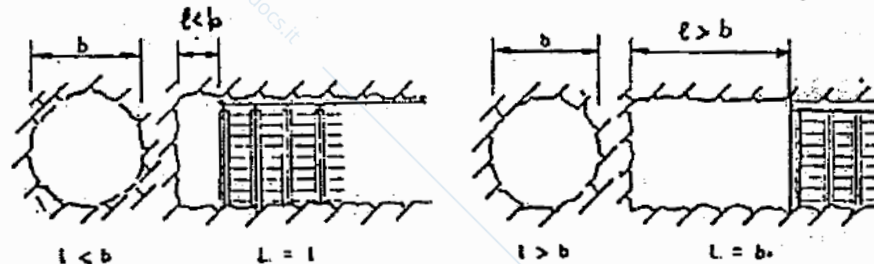
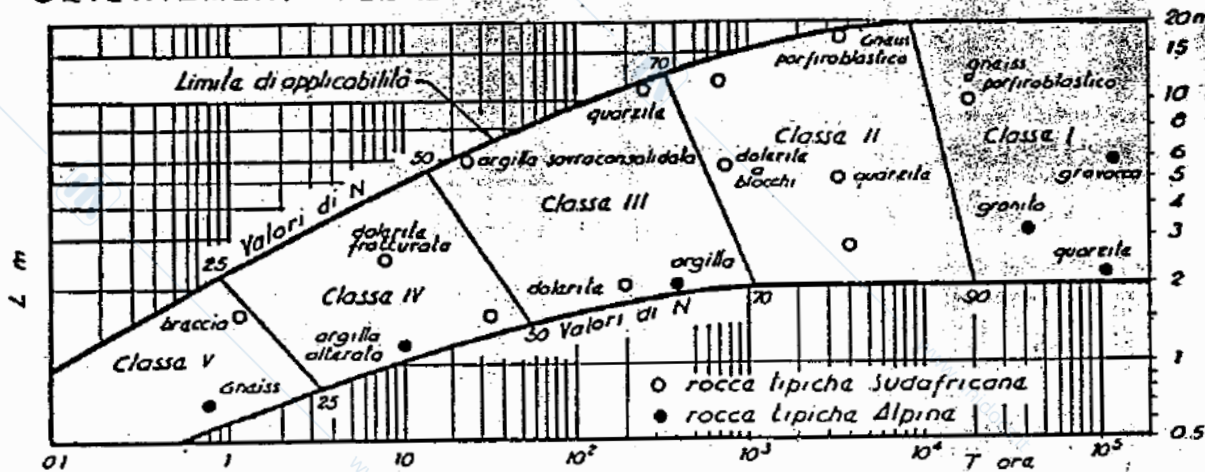
<b>INCLINAZIONE</b>	<b>&lt;20</b>	<b>20÷45</b>	<b>45÷90</b>
<b>Condizione</b>	<b>Mediocre</b>	<b>Sfavorevole</b>	<b>Molto Sfavorevole</b>
<b>PARAMETRO</b>	<b>-5</b>	<b>-10</b>	<b>-12</b>



# RMR<sub>base</sub> – Sistemi di sostegno e/o supporto

Il valore di RMR<sub>corretto</sub> può essere utilizzato per stimare il tempo di autosostegno della galleria e per effettuare un dimensionamento di massima delle opere di sostegno e/o rinforzo per assicurare le condizioni di sicurezza durante lo scavo di vuoti sotterranei.

ORIENTAMENTI PER IL PROGETTO E L'ESECUZIONE DI GALLERIE



Relazione tra la lunghezza libera dello scavo L e il tempo di autosostegno per differenti qualità dell'ammasso roccioso (da Bieniawski, 1984)



## RMR<sub>base</sub> – Sistemi di sostegno e/o supporto

Classe dell'ammasso roccioso	Avanzamento	Bulloni (diametro 20 mm iniettati su tutta la lunghezza)	Calcestruzzo proiettato	Centine
<b>I</b> Molto buono RMR: 81 – 100	A piena sezione, a 3 m dal priverivestimento	Generalmente non è richiesto alcun sostegno ad eccezione di qualche bullone isolato		
<b>II</b> Buono RMR: 61 – 80	A piena sezione, a 1 - 1.5 m dal priverivestimento. Installazione del priverivestimento ad una distanza massima di 20 m dal fronte	Localmente bulloni in calotta, lunghezza 3 m, spaziatura 2.5 m con eventuale rete metallica	50 mm in calotta dove richiesto	Non necessarie
<b>III</b> Discreto RMR: 41 – 60	A sezione parziale, avanzamento massimo in calotta di 1.5 – 3 m. Installazione del priverivestimento ad una distanza massima di 10 m dal fronte	Bulloni di lunghezza 4 m disposti regolarmente con spaziatura 1.5 – 2 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica in calotta	50 – 100 mm in calotta e 30 mm sulle pareti	Non necessarie
<b>IV</b> Scadente RMR: 21 – 40	A sezione parziale, avanzamento massimo in calotta di 1.0 – 1.5 m. Installazione del priverivestimento ad una distanza massima di 10 m dal fronte	Bulloni di lunghezza 4 – 5 m disposti regolarmente con spaziatura 1 – 1.5 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica	100 – 150 mm in calotta e 100 mm sulle pareti	Profilati leggeri ad interasse di 1.5 m dove necessari
<b>V</b> Molto scadente RMR: < 20	Avanzamento con cunicoli ed allarghi. Avanzamento massimo in calotta di 0.5 – 1.5 m. Immediata Installazione del priverivestimento. Calcestruzzo proiettato il più presto possibile dopo l'effettuazione della volata	Bulloni di lunghezza 5 – 6 m disposti regolarmente con spaziatura 1 – 1.5 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica. Bulloni in arco rovescio	150 – 200 mm in calotta, 150 mm sulle pareti e 50 mm sul fronte di scavo	Profilati pesanti in acciaio ad interasse di 0.75 m con puntone in arco rovescio



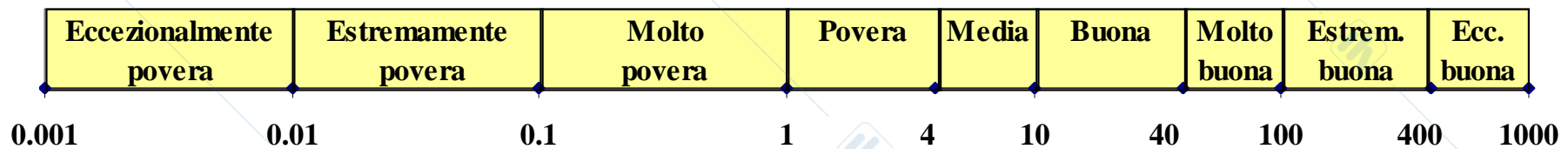
## Q system – Barton et al. (1974)

Per la definizione del valore di Q vengono considerati 6 parametri caratteristici dell'ammasso roccioso (non viene considerata la matrice rocciosa)

1. RQD
2. Numero dei sistemi di discontinuità **J<sub>n</sub>**
3. Scabrezza delle discontinuità **J<sub>r</sub>**
4. Alterazione delle discontinuità **J<sub>a</sub>**
5. Presenza d'acqua **J<sub>w</sub>**
6. Condizioni di sollecitazione **SRF**

Ad ogni valore o stima dei parametri sopra definiti corrisponde un coefficiente numerico che contribuisce alla determinazione del valore di Q, secondo la formula:

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



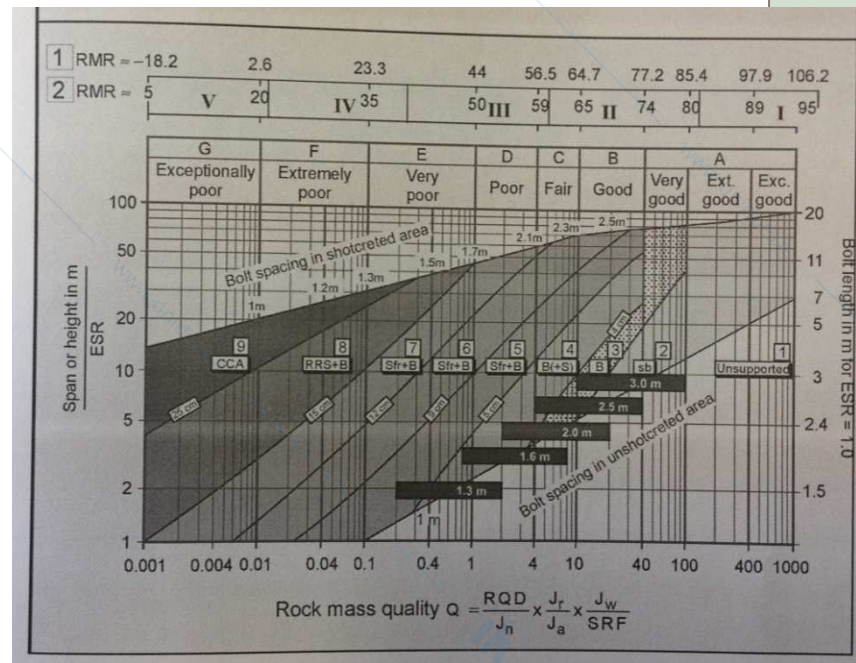
# Q system – Barton et al. (1974)

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

Dimensione relativa dei blocchi (utile per distinguere il grado di fratturazione dell'ammasso in esame)

Resistenza relativa d'attrito (del set di giunti meno favorevole o delle discontinuità riempite)

Effetto relativo della presenza di acqua, faglie, stati tensionali particolari, rocce spingenti o rigonfianti



## Q system – RQD

Rappresenta il recupero percentuale modificato ed è dato dalla somma percentuale degli spezzoni di carota di lunghezza  $>10$  cm e la lunghezza totale considerata

$$RQD = \frac{\sum_i L_{i>10cm}}{L_{TOT}}$$



Si assume proprio il valore percentuale di RQD.

Per la definizione di Q non si utilizzano valori di RQD  $< 10\%$  (in tal caso il parametro si assume proprio pari a 10).

Se non sono disponibili sondaggi, RQD è stimato ricorrendo alla correlazione con il numero di giunti per unità di volume:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad \text{dove } J_v = \text{numero di giunti per m}^3$$

( RQD = 100 per  $J_v < 4.5$  )



## Q system – Joint set number $J_n$

Dipende dal numero di sistemi di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso

Ammasso roccioso	$J_n$
Massivo – Pochi giunti	<b><math>0.5 \div 2</math></b>
Un sistema K1	<b>2</b>
Un sistema K1 + random	<b>3</b>
Due sistemi K1 e K2	<b>4</b>
Due sistemi K1 e K2+ random	<b>6</b>
Tre sistemi K1, K2 e K3	<b>9</b>
Tre sistemi K1, K2 e K3+ random	<b>12</b>
Più di tre sistemi	<b>15</b>
Roccia Molto fratturata	<b>20</b>



## Q system – Joint Roughness number Jr

Dipende dalla scabrezza delle discontinuità (si considerano quelle più sfavorevoli alla stabilità dello scavo). Si possono avere tre casi:

**A. Lembi a contatto**

**B. Lembi a contatto dopo  
uno scorrimento di 10 cm**

**C. Nessun contatto  
(nemmeno dopo scorrimenti)**

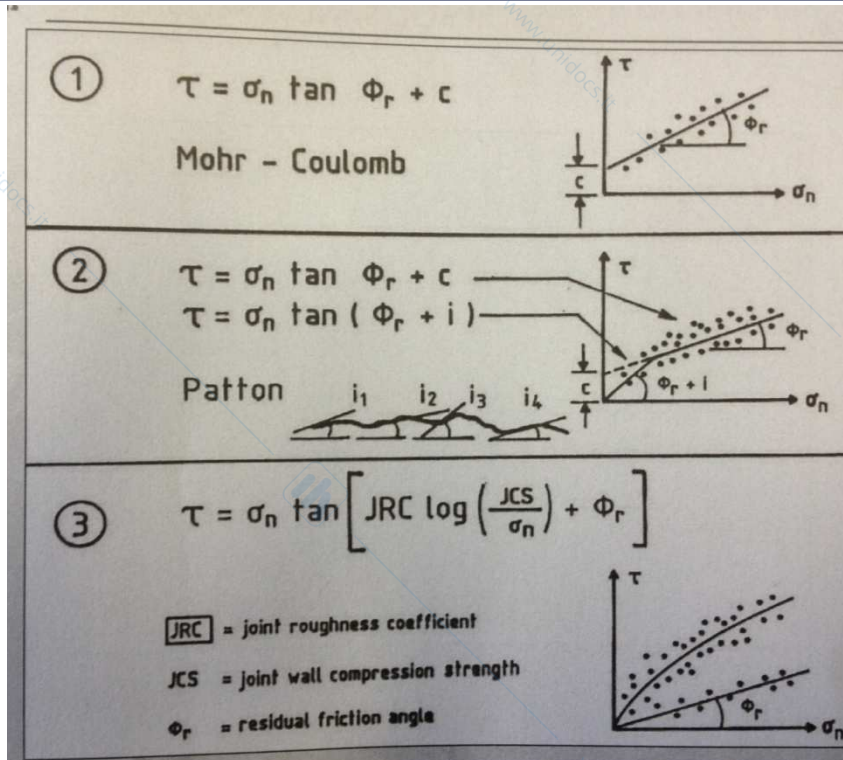
<i>Scabrezza</i>	<i>Jr</i>
Giunti discontinui	4
Scabri o irregolari e ondulati	3
Lisci e ondulati	2
Levigati (SLK) e ondulati	1.5
Scabri o irregolari e piani	1.5
Lisci e piani	1
Levigati (SLK) e piani	0.5

	<b>Jr</b>
zone con presenza di riempimenti argillosi di potenza tale da impedire il contatto	<b>1</b>
zone di roccia fratturata (assimilabile a ghiaia e sabbia di potenza tale da impedire il contatto)	

**NOTA:** si somma 1.0 quando la spaziatura media è  $> 3m$  e  $Jr = 0.5$  può essere utilizzato anche per giunti piani e levigati con lineazioni se queste sono orientate favorevolmente..

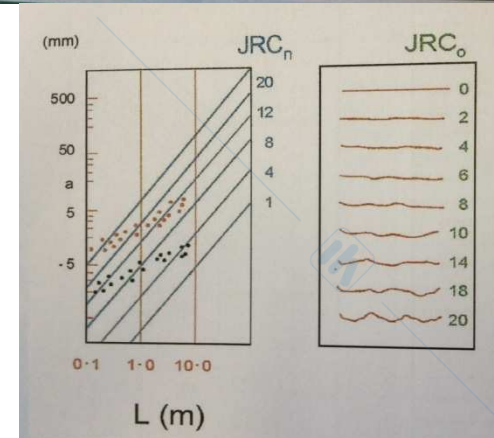


# Q system – Joint Roughness number Jr

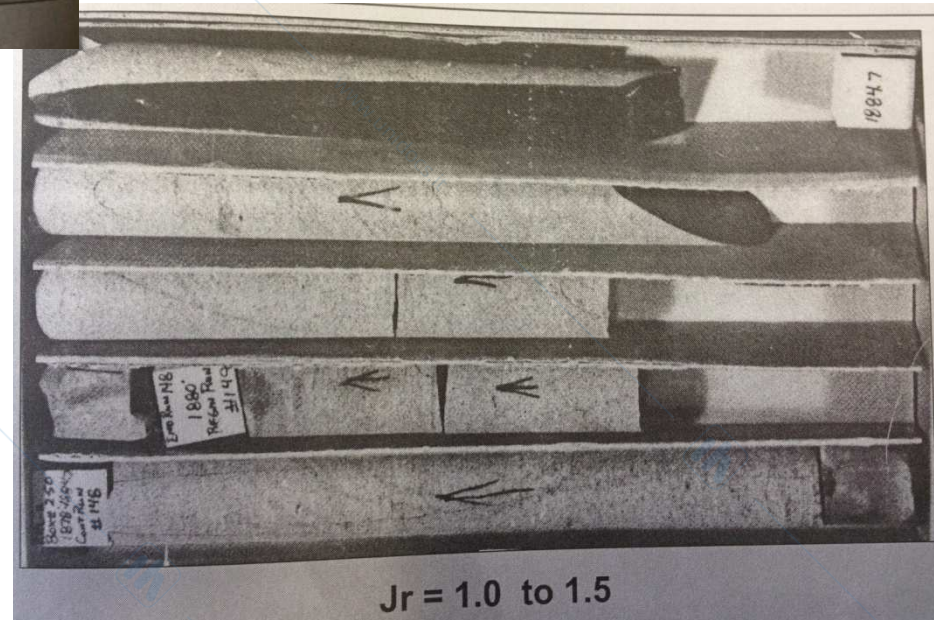
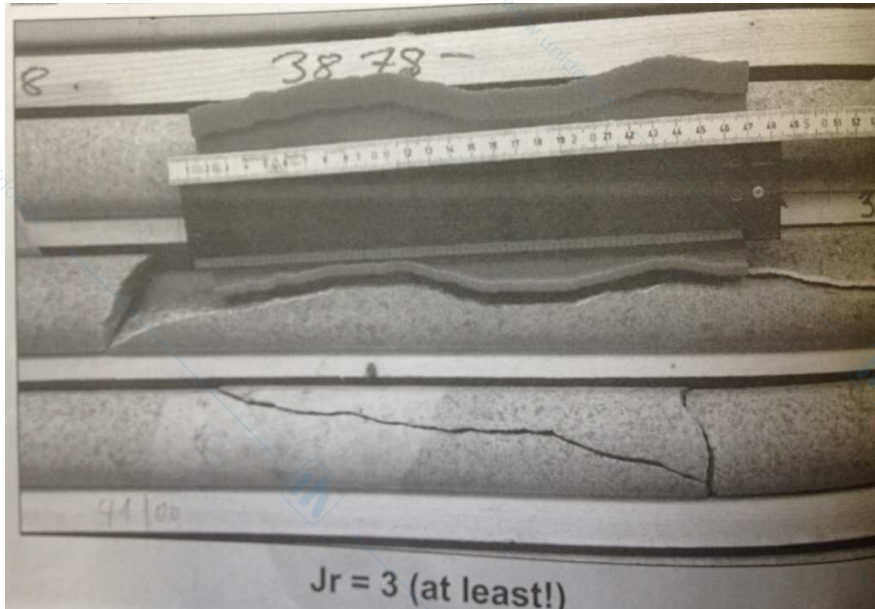


Relation between  $J_r$  and  $JRC_n$   
Subscripts refer to block size (cm)

	$J_r$	$JRC_{20}$	$JRC_{100}$
I rough	4	4	20
II smooth	3	3	14
III slickensided	2	2	11
Stepped			
IV rough	3	3	14
V smooth	2	2	11
VI slickensided	1.5	1.5	7
Undulating			
VII rough	1.5	1.5	2.5
VII smooth	1.0	1.0	1.5
IX slickensided	0.5	0.5	0.5
Planar			



## Q system – Joint Roughness number Jr



## Q system – Joint Alteration number Ja

Dipende dal grado di alterazione delle superfici dei giunti e dall'eventuale materiale di riempimento. Si distinguono i tre casi visti per il Jr:

**A. Lembi a contatto**



**B. Lembi a contatto dopo  
uno scorrimento di 10 cm**

**C. Nessun contatto  
(nemmeno dopo scorrimenti)**

	<u>Alterazione - Riempimento</u>	Ja
A	Riempimento impermeabile, non rammollente, cementante e resistente (es. quarzo)	0.75
B	Pareti non alterate, presente alterazione in tracce	1
C	Lembi debolmente alterati. Patine sui lembi con minerali non rammollenti (particelle di sabbia, roccia fratturata ma priva di argilla)	2
D	Patina siltosa – sabbioso siltosa, poca argilla (non rammollente)	3
E	Patine con poca argilla e/o simili (caolinite, mica, ...). Clorite, talco, grafite, gesso, ... oltre a piccole quantità di argilla debolmente espansiva (spessore 1-2 mm)	4



## Q system – Joint Alteration number Ja

Dipende dal grado di alterazione delle superfici dei giunti e dall'eventuale materiale di riempimento. Si distinguono i tre casi visti per il Jr:

A. Lembi a contatto

B. Lembi a contatto dopo  
uno scorrimento di 10 cm →

C. Nessun contatto  
(nemmeno dopo scorrimenti)

	Alterazione - Riempimento	Ja
F	Particelle di sabbia, roccia frantumata ma assenza di argilla	4
G	Riempimenti argillosi fortemente sovraconsolidati (continui, spessori < 5 mm)	6
H	Riempimenti argillosi mediamente o debolmente sovraconsolidati (continui, spessori < 5 mm)	8
I	Riempimenti con argilla rigonfiante (montmorillonite) (continui, spessori < 5 mm)	8 ÷ 12



## Q system – Joint Alteration number Ja

Dipende dal grado di alterazione delle superfici dei giunti e dall'eventuale materiale di riempimento. Si distinguono i tre casi visti per il Jr:

A. Lembi a contatto

B. Lembi a contatto dopo  
uno scorrimento di 10 cm

C. Nessun contatto  
(nemmeno dopo scorrimenti)

	Alterazione - Riempimento	Ja
K-L	Zone o bande di roccia disgregata	6
M	Con presenza di argilla (vedi i punti G, H ed I per le condizioni sull'argilla)	8 ÷ 12
N	Zone o bande di argilla siltosa o sabbiosa, con piccole percentuali di argilla rammollente	5
O-P	Zone potenti in argilla (vedi G, H ed I)	10 ÷ 20



## Q system – Joint Alteration number Ja

Dipende dal grado di alterazione delle superfici dei giunti e dall'eventuale materiale di riempimento. Si distinguono i tre casi visti per il Jr:

**A. Lembi a contatto**

**B. Lembi a contatto dopo  
uno scorrimento di 10 cm**

**C. Nessun contatto  
(nemmeno dopo scorrimenti)**



	<b>Alterazione - Riempimento</b>	<b>Ja</b>
<b>K-L</b>	Zone o bande di roccia disgregata	<b>6</b>
<b>M</b>	Con presenza di argilla (vedi i punti G, H ed I per le condizioni sull'argilla)	<b>8 ÷ 12</b>
<b>N</b>	Zone o bande di argilla siltosa o sabbiosa, con piccole percentuali di argilla rammollente	<b>5</b>
<b>O-P</b>	Zone potenti in argilla (vedi G, H ed I)	<b>10 ÷ 20</b>



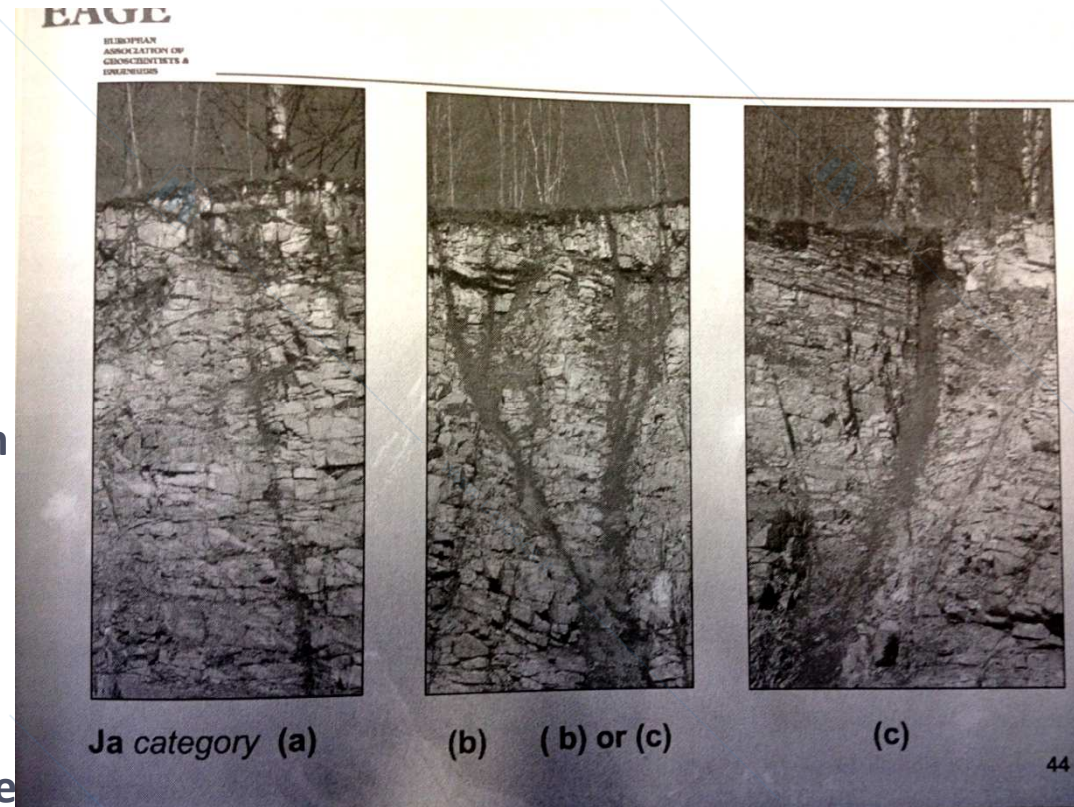
## Q system – Joint Alteration number Ja

Dipende dal grado di alterazione delle superfici dei giunti e dall'eventuale materiale di riempimento. Si distinguono i tre casi visti per il Jr:

**A. Lembi a contatto**

**B. Lembi a contatto dopo  
uno scorrimento di 10 cm**

**C. Nessun contatto  
(nemmeno dopo scorrime**



## Q system – Joint Alteration number $J_a$

4. Joint alteration number		$\Phi_r$ approx.	$J_a$
<b>a) Rock-wall contact (no mineral fillings, only coatings)</b>			
A	Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote.	--	0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only.	25-35°	1.0
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	2.0
D	Silty- or sandy-clay coatings, small clay fraction (non-softening).	20-25°	3.0
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, talc, gypsum, graphite, etc., and small quantities of swelling clays.	8-16°	4.0
<b>b) Rock-wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)</b>			
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	4.0
G	Strongly over-consolidated non-softening clay mineral fillings (continuous, but < 5 mm thickness).	16-24°	6.0
H	Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, but < 5 mm thickness).	12-16°	8.0
J	Swelling-clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, but < 5 mm thickness). Value of $J_a$ depends on per cent of swelling clay-size particles, and access to water, etc.	6-12°	8-12
<b>c) No rock-wall contact when sheared (thick mineral fillings)</b>			
KL M	Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see G, H, J for description of clay condition).	6-24°	6, 8, or 8-12
N	Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction (non-softening).	--	5.0
OP R	Thick, continuous zones or bands of clay (see G, H, J for description of clay condition).	6-24°	10, 13, or 13-20



## Q system – Joint water reduction factor Jw

Dipende dalla pressione dell'acqua nei giunti. Si può fare riferimento ad una condizione generale dell'ammasso (descrittiva) o, se si conosce il livello piezometrico di un'eventuale falda, rispetto al centro della galleria, calcolare la pressione agente sul rivestimento Pw.

<b>Presenza di acqua</b>	<b>Pw [MPa]</b>	<b>Jw</b>
Scavo in assenza di acqua o venute ridotte (5 l/min, localizzate)	< 0.1	1
Venute d'acqua medie o pressione occasionale nei giunti con dilavamento del materiale di riempimento	0.1 ÷ 0.25	0.66
Venute d'acqua notevoli o pressione elevata in giunti senza riempimento	0.25 ÷ 1	0.5
Venute d'acqua notevoli o pressione elevata, dilavamento del materiale di riempimento	0.25 ÷ 1	0.33
Venute d'acqua eccezionali o pressione che decresce nel tempo	>1	0.2 ÷ 0.1
Venute d'acqua eccezionali o pressione che non tende a decrescere nel tempo	>1	0.1 ÷ 0.05



## Q system – Stress Reduction Factor SRF

Dipende dallo stato di sollecitazione caratteristico della zona ove verrà realizzato lo scavo sotterraneo. Si distinguono quattro casi: (possono causare distensione e rilasci nella massa rocciosa durante lo scavo della galleria)

**A. Zone di debolezza che interessano lo scavo (possono causare distensione e rilasci nella massa rocciosa durante lo scavo della galleria)**

**B. Massa rocciosa competente** (problema affrontato dal p.to di vista tensionale)

**C. Roccia Spingente (Squeezing)** (comportamento plastico della massa rocciosa in presenza di elevate tensioni naturali)

**D. Roccia rigonfiante (Swelling)** (attività di rigonfiamento chimico in presenza di acqua)

CASO A	SRF
Molte zone di debolezza con argilla o roccia fratturata-degradata chimicamente, roccia molto distesa, indipendentemente dalla profondità	10.0
Zone singolari, discontinuità maggiori con argilla, o roccia chimicamente degradata (profondità di scavo $\leq 50$ m)	5.0
Zone singolari, discontinuità maggiori con argilla, o roccia chimicamente degradata (profondità di scavo $>50$ m)	2.5
Molte zone con discontinuità interessate da precedenti scorrimenti (nessuna traccia di argilla), roccia distesa e rilasciata (indipendentemente dalla profondità), matrice competente	7.5
Discontinuità maggiori (faglie e sup. di scorrimento) in roccia competente, in assenza di argilla (profondità di scavo $\leq 50$ m)	5.0
Discontinuità maggiori (faglie e sup. di scorrimento) in roccia competente, in assenza di argilla (profondità di scavo $> 50$ m)	2.5
Discontinuità aperte e rilasciate, massa rocciosa molto fratturata, a blocchi (indipendentemente dalla profondità)	5.0



## Q system – Stress Reduction Factor SRF

Dipende dallo stato di sollecitazione caratteristico della zona ove verrà realizzato lo scavo sotterraneo. Si distinguono quattro casi: possono causare distensione e rilasci nella massa rocciosa durante lo scavo della galleria)

**A. Zone di debolezza che interessano lo scavo**

(possono causare distensione e rilasci nella massa rocciosa durante lo scavo della galleria)

**B. Massa rocciosa competente**

(problema affrontato dal p.to di vista tensionale)

**C. Rocca Spingente (Squeezing)**

(comportamento plastico della massa rocciosa in presenza di elevate tensioni naturali)

**D. Rocca rigonfiante (Swelling)**

(attività di rigonfiamento chimico in presenza di acqua)

CASO B	$Co / \sigma_1$	$To / \sigma_1$	SRF
Sforzi naturali deboli, vicino alla superficie	>200	>13	2.5
Sforzi naturali medi	10 - 200	0.66 – 13	1
Sforzi naturali elevati, strutture chiuse	5 - 10	0.33 – 0.66	0.5 - 2
Massa rocciosa di tipo massivo (possibili colpi di tensione di debole intensità)	2.5 - 5	0.16 – 0.33	5 – 10
Massa rocciosa di tipo massivo (possibili colpi di tensione di notevole intensità)	<2.5	< 0.16	10 - 20

**Nota :**  $Co$  e  $To$  sono, rispettivamente la resistenza a compressione e trazione della roccia intatta, mentre  $s_1$  rappresenta la tensione principale massima (nella maggior parte dei casi è quella verticale, ma non è detto)



## Q system – Stress Reduction Factor SRF

Dipende dallo stato di sollecitazione caratteristico della zona ove verrà realizzato lo scavo sotterraneo. Si distinguono quattro casi: possono causare distensione e rilasci nella massa rocciosa durante lo scavo della galleria)

**A. Zone di debolezza che interessano lo scavo**

(possono causare distensione e rilasci nella massa rocciosa durante lo scavo della galleria)

**B. Massa rocciosa competente**

(problema affrontato dal p.to di vista tensionale)

**C. Roccia Spingente (Squeezing)**

(comportamento plastico della massa rocciosa in presenza di elevate tensioni naturali)

**D. Roccia rigonfiante (Swelling)**

(attività di rigonfiamento chimico in presenza di acqua)

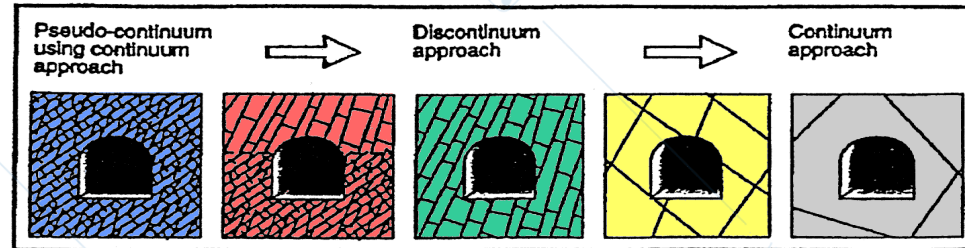
<b>CASO C</b>	<b>SRF</b>
<b>Pressioni deboli</b>	<b>5 - 10</b>
<b>Pressioni elevate</b>	<b>10 - 20</b>
<b>CASO D</b>	
<b>Pressioni deboli</b>	<b>5 - 10</b>
<b>Pressioni elevate</b>	<b>10 - 15</b>



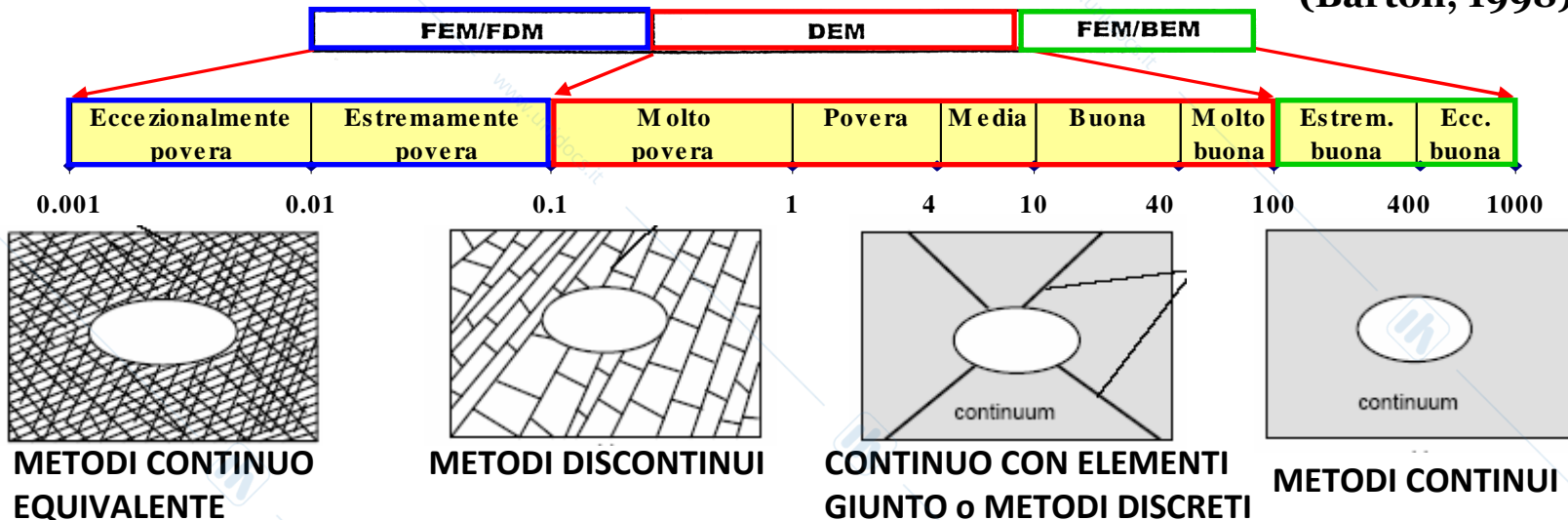
# Q system – Stress Reduction Factor SRF

Il valore di Q determinato dall'applicazione della formula permette la classificazione dell'ammasso roccioso, la determinazione dei parametri di deformabilità, la progettazione di massima degli scavi in sotterraneo. La definizione del tipo di modello (continuo o discontinuo) che "meglio" si addice allo studio dell'ammasso roccioso in oggetto.

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



(Barton, 1998)



## Q system - Parametri di deformabilità

$$E_M = 25 \cdot \log Q$$

Barton (1980)

$$E_M = 10 \cdot \sqrt[3]{Q_c} = 10 \cdot \sqrt[3]{Q \frac{\sigma_c}{100}}$$

Barton (1995)



## Q system – Elementi di sostegno e/o supporto

Il valore di Q può essere utilizzato per prevedere gli elementi di supporto-sostegno necessari alla sicurezza degli scavi, definendo la dimensione equivalente degli scavi.

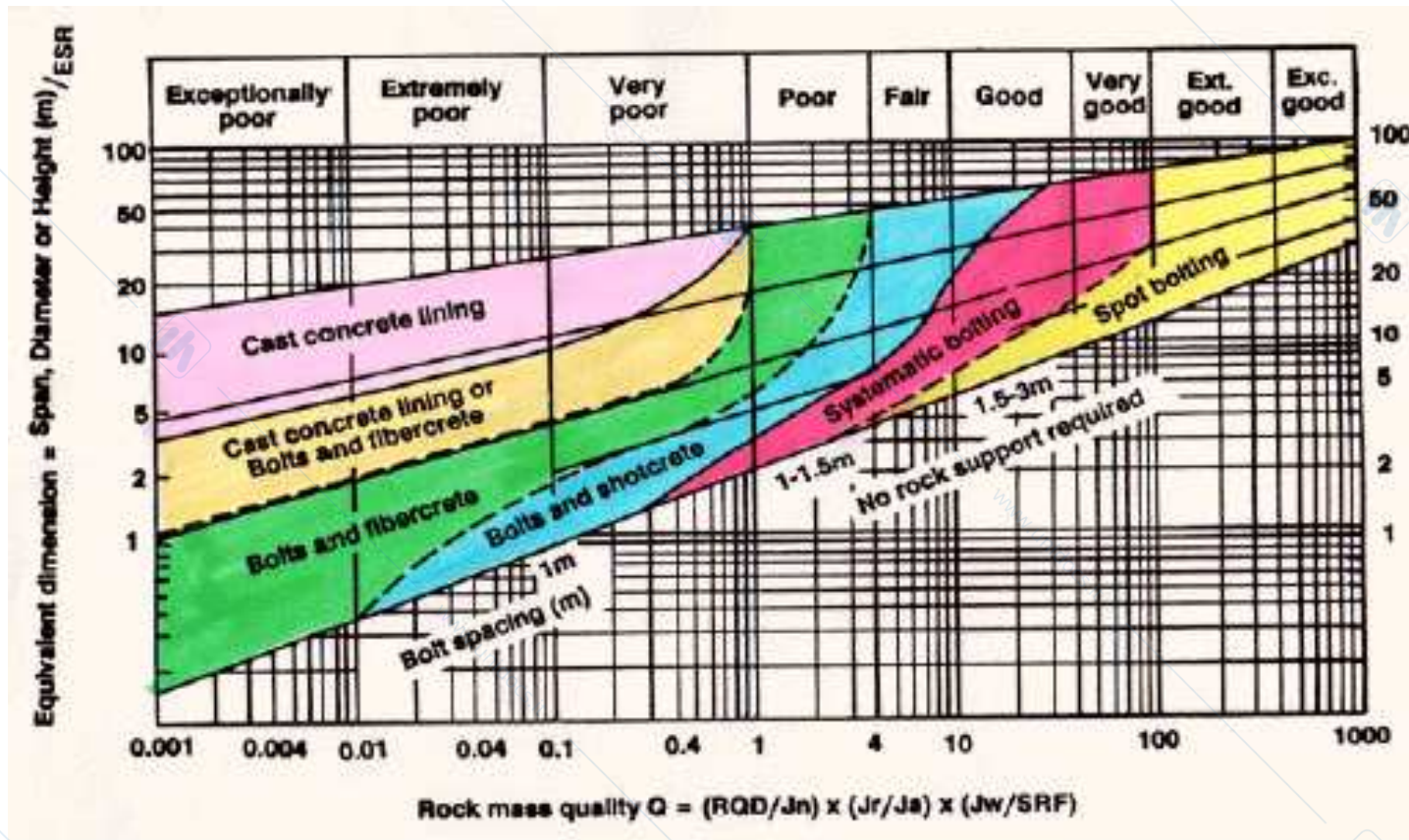
La **dimensione equivalente** dipende sia dalle dimensioni dello scavo (ampiezza, diametro, altezza) sia da un valore, chiamato **ESR** (excavation support ratio) che dipende dalle tipologie di scavo e dal livello di sicurezza richiesto

$$\text{dim equivalente} = \frac{\text{dimensione scavo}}{\text{ESR}}$$

		ESR
Scavi sotterranei	temporanei	3-5
Pozzo verticale	(circolare)	2.5
	(rettangolare)	2.0
Scavi sotterranei permanenti		1.6
Depositi sotterranei, gallerie stradali secondarie ecc.	1.3	
Centrali elettriche (sotterranee), gallerie stradali principali		1.0
Centrali nucleari, stazioni ferroviarie		0.8



# Q system – Elementi di sostegno e/o supporto



## GSI- Geological Strength Index (Hoek et al., 1994)

L'indice di resistenza geologica GSI fornisce un sistema per la stima della riduzione della resistenza dell'ammasso roccioso in relazione a differenti condizioni geologiche. Il valore di GSI è ottenuto tramite una valutazione qualitativa dell'ammasso roccioso basata sull'impressione visiva della struttura dell'ammasso, in relazione a

- **Caratteristiche di interconnessione tra i blocchi**
- **Condizioni delle superfici di contatto espresse in termini di rugosità ed alterazione**

Ad ogni combinazione di questi due parametri è associato un indice numerico (il valore di GSI) variabile tra 0 e 100.

Tale parametro è utilizzato solamente per stimare indirettamente le caratteristiche di deformabilità e resistenza dell'ammasso roccioso

Pick GSI Value

Rock Type:

GSI Selection:

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		29
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					10
		N/A	N/A			

DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓



# GSI

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS				
Rock Type:	General	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection:	45	DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		29
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes				20	
		N/A	N/A			10

## Surface conditions

**Very good:** molto rugose, fresche ed inalterate

**Good:** rugose e poco alterate  
**Fair:** Lisce e moderatamente alterate

**Poor:** levigate, altamente alterate, rivestite di patine o riempite con frammenti spigolosi  
**Very poor:** levigate, altamente alterate, rivestite di patine o riempite con materiale argilloso



## CORRELAZIONI TRA INDICI

Gli indici RMR e Q possono essere correlati mediante la relazione proposta da Bieniawski e Orr (1976):

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$$

che ha limiti, superiore ed inferiore rispettivamente, espressi dalle:

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 62$$

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 26$$

o per mezzo di quella proposta da Rutledge e Preston (1978):

$$RMR = 13,5 \cdot \text{Log}Q + 43$$

La prima relazione, confermata da diversi autori negli anni successivi, fornisce valori di RMR inattendibili e a volte impossibili ( $RMR < 0$ ) per bassi valori dell'indice Q. Il superamento di tale limitazione è previsto nella relazione proposta da Barton (1995):

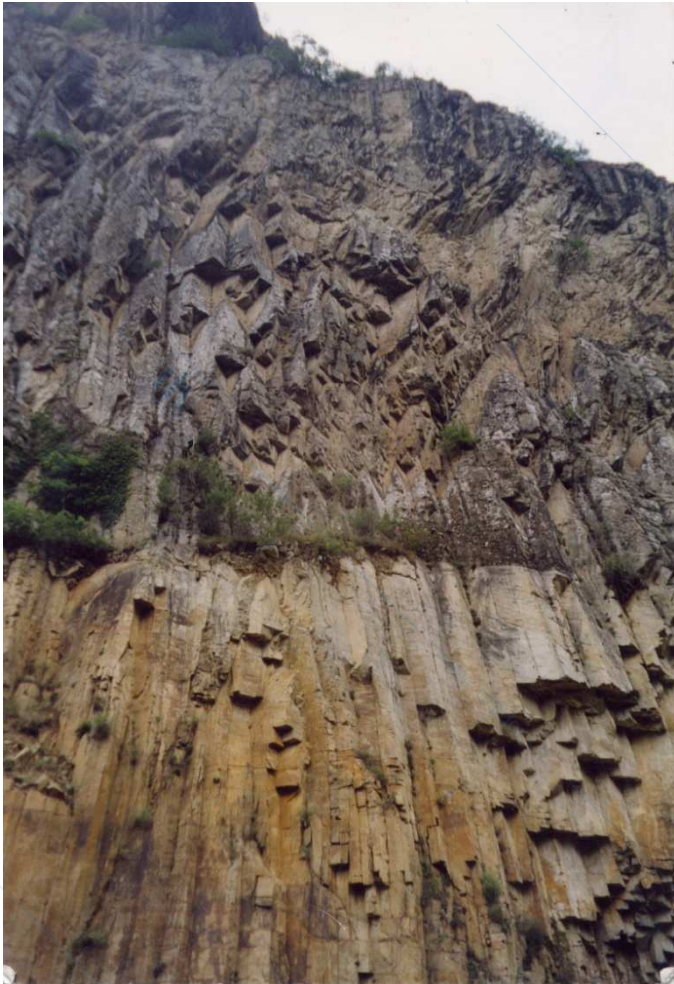
$$RMR = 50 + 15 \cdot \text{Log}Q$$

Qualora l'ammasso roccioso presenti un GSI maggiore di 25, è possibile determinare il valore in funzione dell'indice RMR opportunamente modificato, ossia valutato ponendo l'indice relativo alle venute d'acqua pari a 15 (se si utilizzano gli indici relativi alla versione di RMR del 1989) ed il sesto parametro, relativo all'orientazione dei giunti, pari a zero; la relazione che lega GSI a RMR modificato è:

$$GSI = RMR_{\text{mod}} - 5$$

Tale formula non può essere utilizzata per ammassi rocciosi di bassa qualità in quanto risulta molto difficoltosa una stima corretta dell'indice RMR.








## CRITERIO DI RESISTENZA DI HOEK E BROWN





## GRADO DI DISTURBO D

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of $D$
	<p>Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.</p>	<p><math>D = 0</math></p>
	<p>Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.</p> <p>Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.</p>	<p><math>D = 0</math></p> <p><math>D = 0.5</math> No invert</p>
	<p>Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.</p>	<p><math>D = 0.8</math></p>



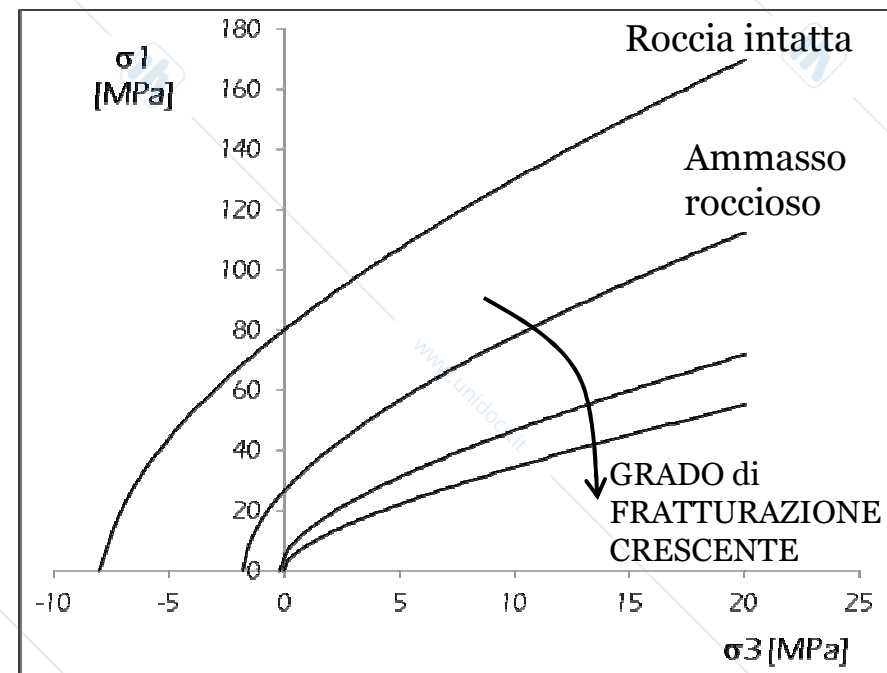
## GRADO DI DISTURBO D

	<p>Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.</p>	<p><math>D = 0.7</math> Good blasting</p> <p><math>D = 1.0</math> Poor blasting</p>
	<p>Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.</p> <p>In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.</p>	<p><math>D = 1.0</math> Production blasting</p> <p><math>D = 0.7</math> Mechanical excavation</p>



## CRITERIO DI RESISTENZA DI HOEK E BROWN

E' il criterio di resistenza maggiormente utilizzato per gli ammassi rocciosi, anche se può essere utilizzato per la roccia intatta.

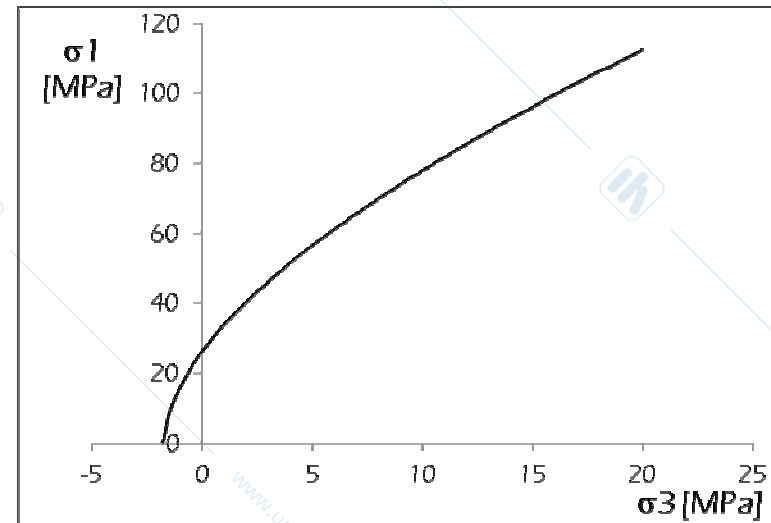


# CRITERIO DI RESISTENZA DI HOEK E BROWN – **Versione originale**

**(1980)**

Il criterio di Hoek e Brown è un criterio di resistenza **NON LINEARE** espresso nel piano delle tensioni principali  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ .

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$



dove  $\sigma_1'$  e  $\sigma_3'$  sono le tensioni principali efficaci a rottura

$\sigma_{ci}$  è la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta ( $\sigma_c$ )

$m$  ed  $s$  sono due costanti caratteristiche del materiale

$m$ : litotipo

$s$ : qualità

dell'ammasso roccioso ( $s=1$  per roccia

intatta)



## CRITERIO DI RESISTENZA DI HOEK E BROWN – **Versione generalizzata (2002)**

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

E' analogo all'originale ma, negli anni, sono state introdotte alcune modifiche per ottenere dati sempre più corrispondenti alle evidenze sperimentali.

### DIFFERENZE:

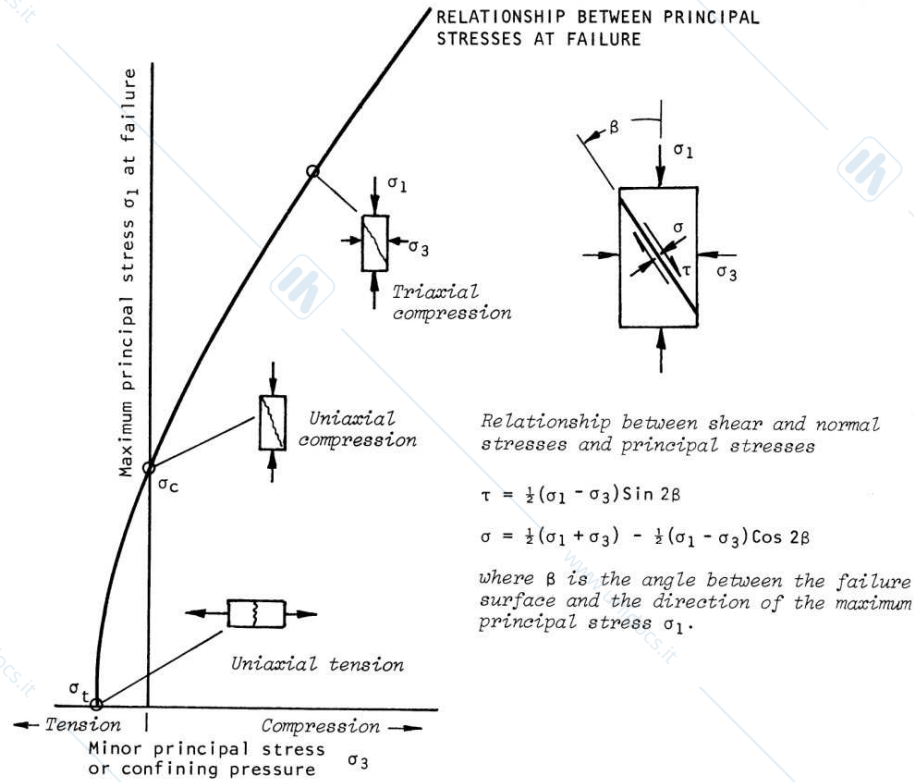
-Esponente a e parametri m ed s dipendono dalla qualità dell'ammasso roccioso (GSI) e dal grado di disturbo D.

Il parametro  $m_b$  esprime le caratteristiche del Litotipo di cui è costituito l'ammasso ( $m_i$ ) in relazione alla qualità dell'ammasso roccioso, mentre s ed a sono costanti della massa rocciosa

Rock Type	Mi Value
Anhydrite	12 ± 2
Breccias	20 ± 2
Chalk	7 ± 2
Claystones	4 ± 2
Conglomerates	21 ± 3
Crystalline Limestone	12 ± 3
Dolomites	9 ± 3
Greywackes	18 ± 3
Gypsum	10 ± 2
Marls	7 ± 2
Micritic Limestones	8 ± 3
Sandstones	17 ± 4
Shales	6 ± 2
Siltstones	7 ± 2
Sparitic Limestones	10 ± 5



# RESISTENZE CARATTERISTICHE



## Resistenza a compressione triassiale ammasso

$$\sigma_1 \neq 0$$

$$\sigma_3 \neq 0$$

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

## Resistenza a compressione monoassiale ammasso

$$\sigma_1 = \sigma_c$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a$$

## Resistenza a trazione biassiale ammasso

$$\sigma_1 = \sigma_3$$

$$\sigma_t = -\frac{s \sigma_{ci}}{m_b}$$

