

Consulta dei Geologi della Provincia di Rimini

18 settembre 2015 Pennabilli (RN)

Geologia applicata degli ammassi rocciosi strutturalmente complessi

LA CLASSIFICAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI STRUTTURALMENTE COMPLESSI

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI STRUTTURALMENTE COMPLESSI NELLA PRATICA PROFESSIONALE

**Metodi di classificazione che permettono una
caratterizzazione geotecnica del SUBSTRATO**

Alternanze di più litotipi

Materiali intensamente deformati

Sovrapposizione di disomogeneità

**Comportamento meccanico determinato
principalmente dalla struttura e dalle discontinuità
e non dal materiale intatto**

**I substrati non dovrebbero essere considerati materiali
isotropi come le "terre".**

Applicabilità.

Definizione parametri geotecnici equivalenti

Analisi di stabilità dei versanti

**Definizione di
ammasso roccioso strutturalmente complesso**

**Materiale roccioso – substrato
(comprese le "rocce tenere")**

**Presenza di DISCONTINUITÀ
oltre alla stratificazione
*fratturazione (joint) – faglie - clivaggio***

Mezzo NON CONTINUO

**Presenza di STRUTTURE
*pieghe – strutture sedimentarie - foliazione***

Introduzione.



Classificare e definire il comportamento meccanico dell'ammasso roccioso tramite:

Resistenza materiale intatto

Resistenza lungo le discontinuità

Aspetti geologici e strutturali

Principali metodi e criteri

Indice RMR - Bieniawsky

Classificazione di Romana derivazione da RMR

Indice Q - Barton

Criterio di Hoek - Brown

**G.S.I.
Geological Strength Index**

Criterio Barton-Bandis

Modello Anisotropo

Indice RMR - Bieniawsky

Resistenza roccia intatta

RQD
(affioramento o sondaggi)

Spaziatura media per famiglia
di discontinuità

Apertura discontinuità e
riempimenti

Condizioni idrauliche

DEFINIZIONE DI CLASSI

Parametri geotecnici indicativi
Giudizio in funzione degli scavi

Metodo "minerario" – adatto a materiali resistenti con famiglie di discontinuità ben distinguibili

CLASSIFICAZIONE SECONDO BIENIAWSKY RMR

PARAMETRI DI CLASSIFICAZIONE E RELATIVI INDICI								
Parametri		Intervallo Valori						
1	Resistenza Materiale intatto	Point Load (MPa)	>10	10÷4	4÷2	2÷1	/	
		Resistenza compressione monoassiale (MPa)	>250	250 ÷ 100	100 ÷ 50	50 ÷ 25	25 ÷ 5	5 ÷ 1
	INDICE	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	100÷90	90÷75	75÷50	50÷25	>25		
	INDICE	20	17	13	8	3		
3	Spaziatura (cm)	>200	200÷60	60÷20	20÷6	<6		
	INDICE	20	15	10	8	5		
4	Condizioni delle discontinuità	Superfici molto ruvide non continue e serrate	Superfici ruvide aperture <1mm leggerm. alterate	Superfici ruvide aperture >1mm molto alterate	Superfici striate continue riempimento <5 mm o apertura 1÷5 mm	Riempimenti soffici >5 mm o aperture >5 mm		
		INDICE	30	25	20	10	0	
5	Condizioni idrauliche	Afflusso per 10 m in galleria (l/min)	/	<1	1÷25	25÷125	>125	
		Rapporto pressione acqua nelle fratture e sforzo principale	0	< 0.1	0.1 ÷ 0.2	0.2 ÷ 0.5	>0.5	
	Condizioni generali	asciutta	umido	bagnato	stillicidio	flusso		
INDICE		15	10	7	4	0		

Indice RMR – Bieniawsky

**Stima
Coesione
e
Angolo attrito interno
*parametri equivalenti***

INDICE RMR	100÷81	80÷61	60÷41	40÷21	<20
CLASSE	I	II	III	IV	V
qualità roccia	ottima	buona	mediocre	scadente	molto scadente

CLASSE	I	II	III	IV	V
Coesione (kPa)	>400	400÷300	300÷200	200÷100	<100
Angolo attrito interno	>45°	45°÷35°	35°÷25°	25°÷15°	<15°
tempo medio autoostentamento	20 anni	1 anno	1 settimana	10 ore	30 minuti

Stima Modulo di deformabilità

*Molte correlazioni
basate su set di casi tipo
poco rappresentativi*

CLASSE	I	II	III	IV	V
Modulo di deformabilità MPa	25000 50000	5000 25000	1000 5000	500 1000	50 500



	PARAMETRO	Valori tipici	INDICE RMR	NOTE
1	Resistenza materiale intatto	$q_c = 32.0 \div 50.0$ MPa	4	
2	RQD	25.0% \div 75.0%	8 \div 13	Il valore è ottenibile dalla spaziatura in affioramento oltre che da sondaggi
3	Spaziatura delle discontinuita	100 \div 400	14 \div 20	Valore riferito al totale ed alle singole famiglie di discontinuita
4	Condizioni delle discontinuita	Apertura media 5 mm frequenti riempimenti di varia natura	10 \div 20	
5	Condizioni idrauliche	Asciutto o umido no flussi idrici	10 \div 15	

Indice RMR: 46 \div 72

Classe III \div II

$\phi = 30^\circ \div 40^\circ$;

$C' = 25 \div 35$ t/m²;

$E_d = 2500 \div 12000$ Mpa

Indice Q - Barton

*Rock Mass Quality.
Metodo che tiene conto di molte variabili.
Campo di applicabilità più ampio.*

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

RQD

(affioramento o sondaggi)

J_n – numero discontinuità

J_r – scabrezza

**J_a – alterazione e
riempimenti**

J_w – condizioni idrauliche

**SFR – grado fratturazione
e stato tensionale**

CLASSIFICAZIONE SECONDO BARTON. Indice Q

Criterio di valutazione		valore
RQD	A	90 ÷ 100
	B	75 ÷ 90
	C	50 ÷ 75
	D	25 ÷ 50
	E	0 ÷ 25
Jn	A	Roccia con pochissime discontinuità 0.5 ÷ 1.0
	B	Una famiglia di discontinuità 2
	C	Una famiglia di discontinuità con ulteriori discontinuità sparse 3
	D	Due famiglie di discontinuità 4
	E	Due famiglie di discontinuità con ulteriori discontinuità sparse 6
	F	Tre famiglie di discontinuità 9
	G	Tre famiglie di discontinuità con ulteriori discontinuità sparse 12
	H	Quattro o più famiglie di discontinuità con ulteriori discontinuità sparse Ammasso suddiviso in elementi rocciosi di piccole dimensioni 15
	I	Roccia intensamente fratturata 20
Jr	A	joint discontinui 4
	B	joint scabri o irregolari, discontinui 3
	C	joint lisci ed ondulati 2
	D	joint levigati ed ondulati 1.5
	E	joint liscabri o irregolari, piani 1.5
	F	joint lisci e piani 1.0
	G	joint levigati e piani 0.5
Ja	A	Superfici delle discontinuità a contatto o contatto possibile per scorrimenti inferiori ai 10 cm Nessun contatto delle pareti anche in caso di scorrimento
	B	Assenza di contatto tra le superfici delle anche dopo scorrimento
Ja	A	Superfici delle discontinuità a contatto 0.75
	B	pareti non alterate, solo ossidazione 1.0
	C	pareti leggermente alterate 2.0
	D	pareti con copertura sottile alterata e materiale residuale 3.0
	E	pareti ricoperte di materiale residuale 4.0
	A	riempimento sabbioso o detritico senza materiale argilloso 4.0
	B	riempimento argilloso spessore <5mm 6.0
	C	riempimento argilloso spessore <5mm materiale espansivo 8.0
	D	riempimento argilloso spessore <5mm materiale espansivo e plastico 8.0+12.0
	E	zone con roccia disgregata 6.0
	zone con roccia macinata 8.0	
	limitate zone con materiale argilloso 8.0+12.0	
	diffuse zone con materiale argilloso 5.0	
	continue zone con materiale argilloso 10+20	

Jw	Fattore di riduzione per presenza di acqua lungo le discontinuità	Descrizione	Valore
A	pareti asciutte con afflusso solo in caso eccezionale	zone di debolezza multiple con materiali argillosi e roccia disgregata	1.0
B	afflusso idrico con occasionale trasporto lungo le discontinuità	zone di debolezza singole con materiali argillosi e roccia disgregata	0.66
C	flussi copiosi in pressione	zone di debolezza singole con materiali argillosi e roccia disgregata a bassa profondità	0.5
D	flussi copiosi in pressione con trasporto solido	zone multiple di rottura senza materiali argillosi	0.33
E	flussi eccezionali ad altissima pressione	zone singole di rottura senza materiali argillosi	0.2+0.1
F	flussi eccezionali ad altissima pressione e continui	zone multiple di rottura senza materiali argillosi	0.1+0.05
A	Zone di debolezza con possibili allentamenti	zone di debolezza multiple con materiali argillosi e roccia disgregata	10.0
B		zone di debolezza singole con materiali argillosi e roccia disgregata	5.0
C		zone di debolezza singole con materiali argillosi e roccia disgregata a bassa profondità	2.5
D		zone multiple di rottura senza materiali argillosi	7.5
E		zone singole di rottura senza materiali argillosi	5.0
F		zone singole di rottura senza materiali argillosi a bassa profondità	2.5
G		discontinuità allentate e aperte con zone disarticolate in blocchetti	5.0
H	Rocce compatte con possibile scarico tensionale	basse tensioni vicino al piano campagna	2.5
I		medie tensioni vicino al piano campagna	1.0
K		alte tensioni vicino al piano campagna roccia poco permeabile	0.5+2.0
L		roccia massiva moderatamente fratturata	5+10
M		roccia massiva molto fratturata	10+20
N	Rocce a comportamento plastico	roccia moderatamente plastica	5+10
O		roccia molto plastica	10+20
P		roccia moderatamente rigonfiante	5+10
Q	Rocce rigonfiante	roccia molto rigonfiante	10+20

Indice Q - Barton

DEFINIZIONE DI CLASSI

Giudizio sulla qualità dell'ammasso

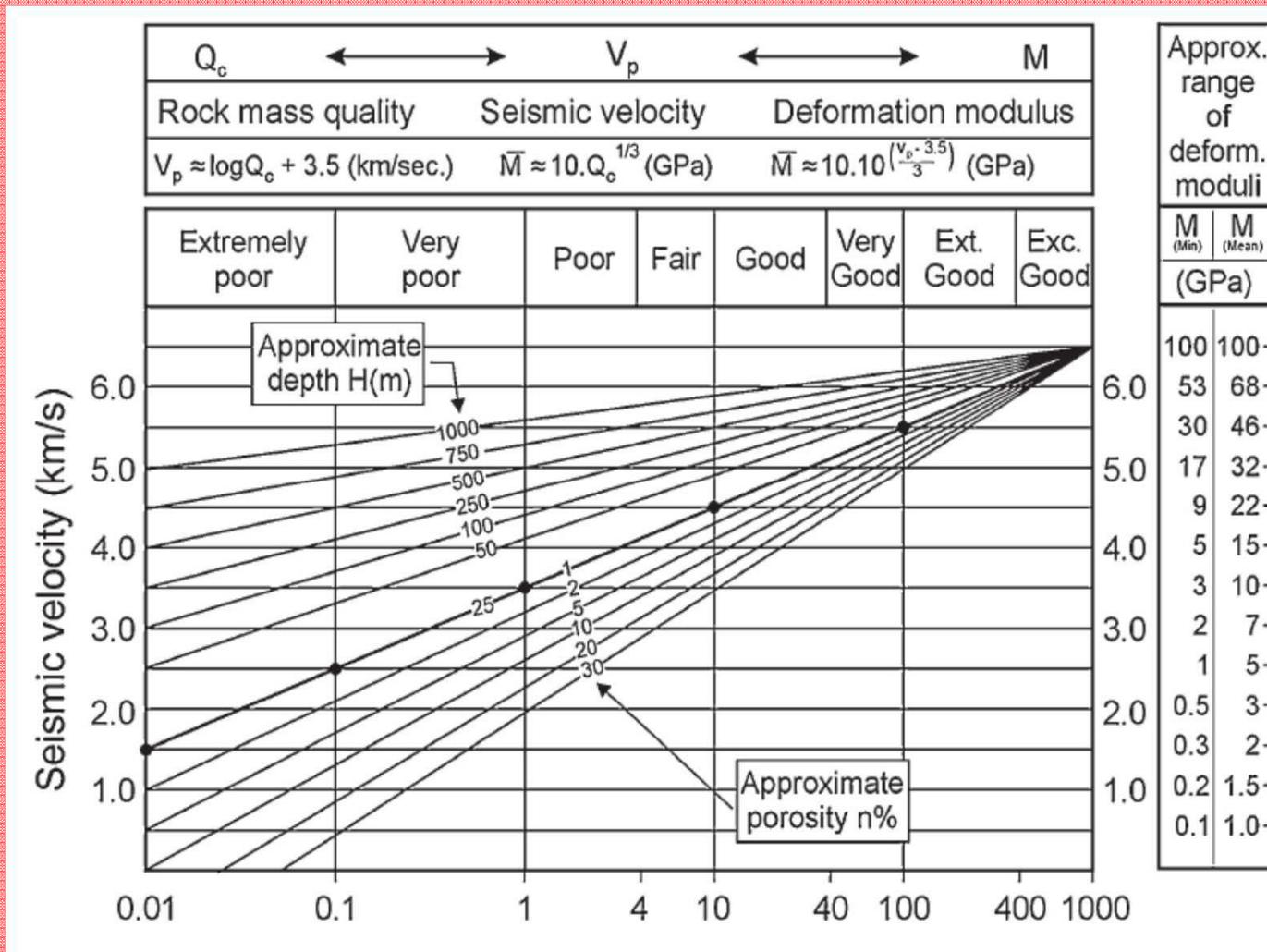
Non si ricavano valori di parametri geotecnici equivalenti

Indice Q	CLASSE QUALITÀ
1000 400	ECCEZIONALMENTE BUONA
400 100	ESTREMAMENTE BUONA
100 40	MOLTO BUONA
40 10	BUONA
10 4	MEDIA
4 1	SCADENTE
1 0,1	MOLTO SCADENTE
0,1 0,01	ESTREMAMENTE SCADENTE
0,01 0,001	ECCEZIONALEMNT SCADENTE

Indice Q – Barton

parametri equivalenti di deformabilità

(Barton 2013)





	valore		note
	da	a	
RQD	25%	75%	
Jn	12		tre famiglie di discontinuità più ulteriori discontinuità sparse
Jr	1	3	da superfici di discontinuità a contatto, scabri o irregolari, a superfici di discontinuità non a contatto con riempimento
Ja	2	6	pareti delle discontinuità da leggermente alterate e a contatto, a pareti non a contatto con riempimento
Jw	1		asciutto o afflusso minimo di acqua
SFR	10		presenza di zone multiple di debolezza contenenti materiale residuale, indipendentemente dalla profondità

Indice Q: 0,035 ÷ 0,94
 Estremamente Scadente
 Molto scadente

Correlazione RMR - Q

$$\text{RMR} = 9 \cdot \ln Q + 44$$

(Bieniawski 1984)

$$\text{RMR} = 5,9 \cdot \ln Q + 43$$

(Rutledge & Preston 1978)

$$\text{RMR} = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2$$

(Moreno Tallon 1980)

$$\text{RMR} = 5 \cdot \ln Q + 60,8$$

(Cameron Clarke Budavari 1981)

$$\text{RMR} = 10,5 \cdot \ln Q + 41,8$$

(Abad et al. 1987)

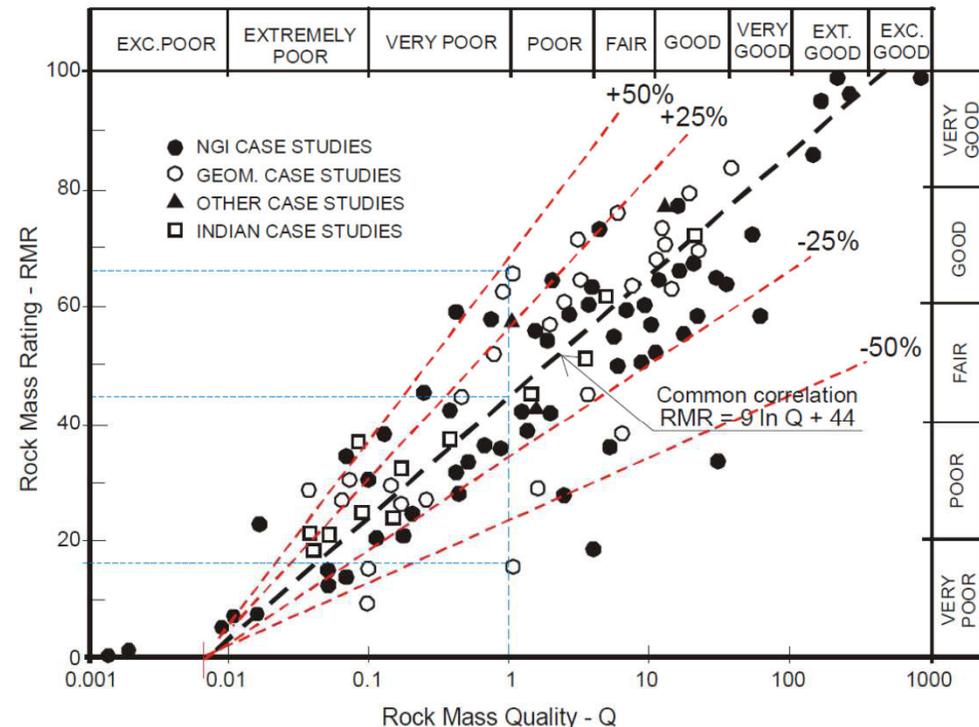


Figure 1: Correlation between the RMR and the Q-index with deviation from the common correlation. As seen, for $Q = 1$, RMR varies from less than 20 to 66. Note that the Q system applies logarithmic scale (After Bieniawski, 1976, and Jethwa et al., 1982).

Nell'esempio, se $Q = 0,035 \div 0,94$ allora $\text{RMR} = 13,8 \div 43,4$. RMR era stato valutato tra $46 \div 72$, quindi in questo caso la correlazione non è affidabile.

Limiti metodi RMR Beniauskis e Q-Barton:

**Complesso determinare e valutare alcuni parametri
(alterazione e presenza acqua)**

**Spesso le discontinuità più significative e "pericolose" sono
quelle che "non si vedono".**

**Difficoltà nell'applicabilità se non sono presenti affioramenti
sufficientemente estesi e rappresentativi.**

**Criteri sviluppati in ambito minerario e per opere in
sotterraneo (gallerie).**

**Non affidabili con discontinuità molto diffuse e non
raggruppabili o non planari.**

Spesso non sono correlabili tra loro

Criterio di Hoek - Brown

Basato su criterio di rottura empirico
Parametri equivalenti ricavati con relazioni che si fondano
su esperienze in sito ed in laboratorio

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} [m_b (\sigma'_1 / \sigma_{ci}) + s]^a$$

σ'_1 σ'_3
sforzi min e max a rottura

σ'_{ci}
resistenza compressione
monoassiale

m_b, s, a
coefficienti che dipendono
dalle caratteristiche
dell'ammasso correlati al **GSI**

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

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

D è un fattore
di disturbo che
dipende dall'uso
di esplosivi

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

PARAMETRI GEOTECNICI EQUIVALENTI

Cautelativo con ammassi integri
Adatto ai contesti con elevata
fratturazione

Il criterio di Hoek – Brown si è sviluppato ed implementato raggiungendo la sua formulazione più aggiornata nel 2002.

Il suo utilizzo è stato agevolato dall'aumento della capacità di calcolo

Publication	Coverage	Equations
Hoek & Brown 1980	Original criterion for heavily jointed rock masses with no fines. Mohr envelope was obtained by statistical curve fitting to a number of (σ'_n, τ) pairs calculated by the method published by Balmer [28]. σ'_1, σ'_3 are major and minor effective principal stresses at failure, respectively σ_T is the tensile strength of the rock mass m and s are material constants σ'_n, τ are effective normal and shear stresses, respectively.	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s}$ $\sigma_T = \frac{\sigma_{ci}}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s})$ $\tau = A \sigma_{ci} ((\sigma'_n - \sigma'_1) / \sigma_{ci})^B$ $\sigma'_n = \sigma'_3 + ((\sigma'_1 - \sigma'_3) / (1 + \partial \sigma'_1 / \partial \sigma'_3))$ $\tau = (\sigma'_n - \sigma'_3) \sqrt{\partial \sigma'_1 / \partial \sigma'_3}$ $\partial \sigma'_1 / \partial \sigma'_3 = m \sigma_{ci} / 2(\sigma'_1 - \sigma'_3)$
Hoek 1983	Original criterion for heavily jointed rock masses with no fines with a discussion on anisotropic failure and an exact solution for the Mohr envelope by Dr J.W. Bray.	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s}$ $\tau = (C \cos \phi'_i - \text{Cox} \phi'_i) m \sigma_{ci} / 8$ $\phi'_i = \arctan(1 / \sqrt{4h \cos^2 \theta - 1})$ $\theta = (90 + \arctan(1 / \sqrt{h^3 - 1})) / 3$ $h = 1 + (16(m \sigma'_n + s \sigma_{ci}) / (3m^2 \sigma_{ci}^2))$
Hoek & Brown 1988	As for Hoek 1983 but with the addition of relationships between constants m and s and a modified form of <i>RMR</i> (Bieniawski [15]) in which the Groundwater rating was assigned a fixed value of 10 and the Adjustment for Joint Orientation was set at 0. Also a distinction between <i>disturbed</i> and <i>undisturbed</i> rock masses was introduced together with means of estimating deformation modulus E (after Serafim and Pereira [18]).	<p><i>Disturbed rock masses:</i></p> $m_b / m_i = \exp((RMR - 100) / 14)$ $s = \exp((RMR - 100) / 6)$ <p><i>Undisturbed or interlocking rock masses</i></p> $m_b / m_i = \exp((RMR - 100) / 28)$ $s = \exp((RMR - 100) / 9)$ $E = 10^{((RMR - 10) / 40)}$ <p>m_b, m_i are for broken and intact rock, respectively.</p>
Hoek, Wood & Shah 1992	Modified criterion to account for the fact the heavily jointed rock masses have zero tensile strength. Balmer's technique for calculating shear and normal stress pairs was utilised	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci})^\alpha$ $\sigma'_n = \sigma'_3 + ((\sigma'_1 - \sigma'_3) / (1 + \partial \sigma'_1 / \partial \sigma'_3))$ $\tau = (\sigma'_n - \sigma'_3) \sqrt{\partial \sigma'_1 / \partial \sigma'_3}$ $\partial \sigma'_1 / \partial \sigma'_3 = 1 + \alpha m_b^\alpha (\sigma'_3 / \sigma_{ci})^{(\alpha - 1)}$
Hoek 1994 Hoek, Kaiser & Bowden 1995	Introduction of the Generalised Hoek-Brown criterion, incorporating both the original criterion for fair to very poor quality rock masses and the modified criterion for very poor quality rock masses with increasing fines content. The Geological Strength Index <i>GSI</i> was introduced to overcome the deficiencies in Bieniawski's <i>RMR</i> for very poor quality rock masses. The distinction between disturbed and undisturbed rock masses was dropped on the basis that disturbance is generally induced by engineering activities and should be allowed for by downgrading the value of <i>GSI</i> .	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c (m \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^\alpha$ <p>for $GSI > 25$</p> $m_b / m_i = \exp((GSI - 100) / 28)$ $s = \exp((GSI - 100) / 9)$ $a = 0.5$ <p>for $GSI < 25$</p> $s = 0$ $a = 0.65 - GSI / 200$

Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002

A new set of relationships between *GSI*, m_b , s and a is introduced to give a smoother transition between very poor quality rock masses ($GSI < 25$) and stronger rocks. A disturbance factor D to account for stress relaxation and blast damage is also introduced. Equations for the calculation of Mohr Coulomb parameters c and ϕ are introduced for specific ranges of the confining stress σ'_{3max} for tunnels and slopes.

All of these equations are incorporated into the Windows program RocLab that can be downloaded from the Internet site www.roscience.com. A copy of the full paper is included with the download.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^a$$

$$m_b = m_i \exp(GSI - 100 / 28 - 14D)$$

$$s = \exp(GSI - 100 / 9 - 3D)$$

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

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI - 10) / 40)}$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}]^{a-1} + m_b \sigma'_{3n} (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}}$$

where, for tunnels

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad - H \text{ is the depth below surface}$$

for slopes

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad - H \text{ is the slope height}$$

γ is the unit weight of the rock mass

Procedura iterativa

Matematicamente complessa

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} [m_b \frac{\sigma'_1}{\sigma_{ci}} + s]^a$$

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

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

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

Parametri di Input

Profondità
Peso unità volume

Resistenza materiale
intatto
Compressione monoassiale

GSI

Costante **mi**

Stima e valutazione del peso unità volume

PROVE LABORATORIO – LETTERATURA

Oltre i 30 m la profondità non influisce più

Stima e valutazione del G.S.I.
SCHEMI E ABACHI DI RIFERIMENTO

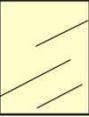
Stima e valutazione m_i
Litologia roccia
SCHEMI E ABACHI DI RIFERIMENTO

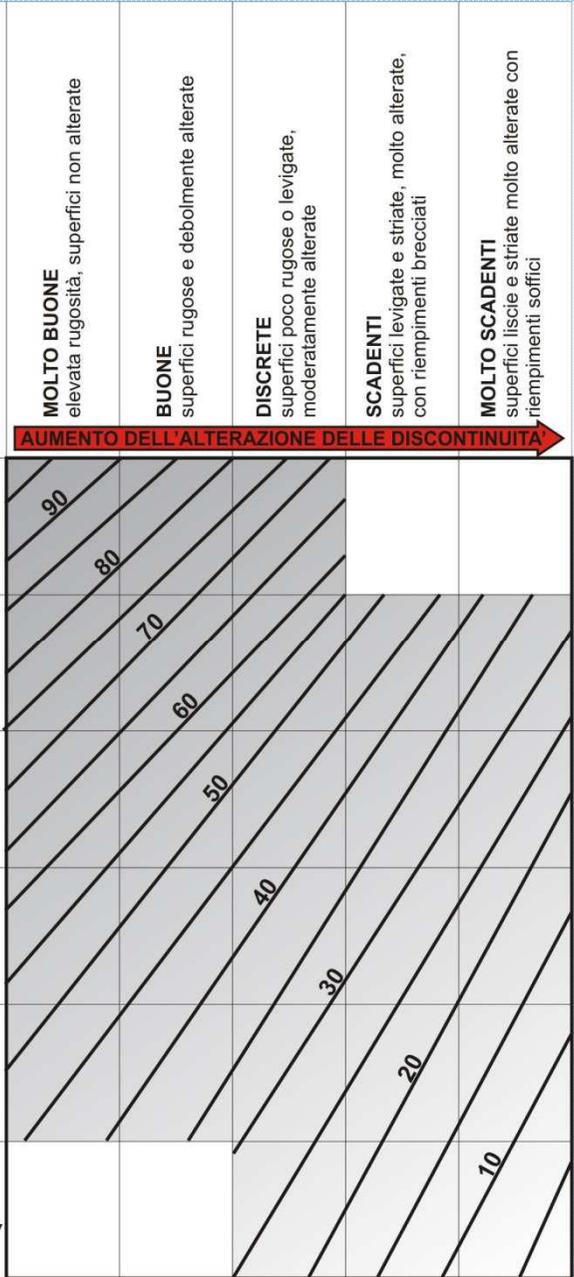
Stima e valutazione della
Resistenza materiale intatto
PROVE DI LABORATORIO
PROVE IN SITU
(martello Schmidt)
ABACHI DI RIFERIMENTO

Utilizzare intervalli piuttosto che valori definiti
GSI è il parametro più importante

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX PER ROCCE FRATTURATE (Hoek & Marinos, 2000)

Il valore del GSI si stima in base alla litologia, alla struttura e alle condizioni delle superfici di discontinuità. E' preferibile indicare un intervallo piuttosto che un valore preciso.
 Il metodo non va applicato in presenza di piani strutturali che possono determinare essi stessi instabilità

-  **INTATTA O MASSIVA**
roccia massiva in affioramento con poche discontinuità molto spaziate
-  **A BLOCCHI**
roccia dislocata da tre famiglie di discontinuità che individuano blocchi di materiale integro
-  **A BLOCCHI IRREGOLARI**
roccia dislocata da 4 o più famiglie di discontinuità che individuano blocchi e diedri di materiale parzialmente disturbato
-  **A BLOCCHI DISTURBATA**
roccia dislocata da molte famiglie di discontinuità (joint, faglie, clivaggio, scistosità) diffuse su tutto l'ammasso, con pieghe, che individuano piccoli blocchi di materiale anche molto disturbato
-  **DISINTEGRATA**
roccia pesantemente fratturata in piccoli pezzi, talora con matrice, senza poter più riconoscere le strutture originarie (stratificazione)
-  **LAMINATA FOLIATA**
roccia suddivisa da fitti piani di discontinuità molto ravvicinate in porzioni minute



G.S.I. Geological Strength Index

Assegnare un valore numerico alle caratteristiche geologiche di un ammasso roccioso
Importanza della conoscenza geologica

Struttura geologica dell'ammasso

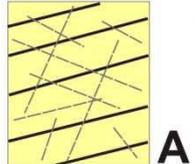
Condizioni delle discontinuità

G.S.I.
Geological Strength Index – ammassi tipo flysh

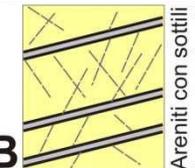
Basandosi sulla descrizione della litologia, della struttura e delle condizioni delle superfici di discontinuità (in particolare dei piani di stratificazione), si scelga una posizione dello schema dalla quale stimare il valore del GSI.

CONDIZIONI DELLE SUPERFICI DI DISCONTINUITA'

MOLTO BUONE Superfici scabre e inalterate	BUONE Superfici scabre leggermente alterate	DISCRETE Superfici levigate e moderatamente alterate	SCADENTI Superfici striate, molto alterate, con riempimenti compatti o brecciati	MOLTO SCADENTI Superfici striate, molto alterate, con riempimenti soffici e plastici
70	60	50	40	30
A	B	C	D	E
F	G	H	I	J
20	10			



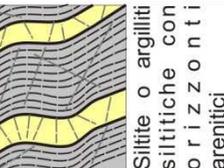
A Areniti in strati spessi dislocate in blocchi. L'effetto degli interstrati pelitici è minimizzato dal confinamento dell'ammasso roccioso.



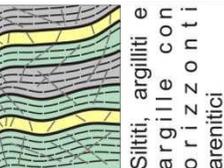
B Areniti con sottili interstrati di siltite



C Altezze di areniti e siltiti

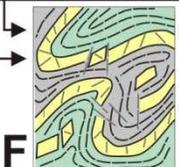


D Siltite o argilliti siltitiche con orizzonti arenitici



E Siltiti, argilliti e argille con orizzonti arenitici

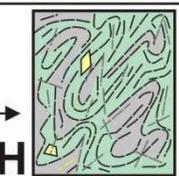
C, D ed E possono essere piegati in modo più o meno intenso, ma ciò non cambia le proprietà dell'ammasso. L'aumento della tettonizzazione portano alle categorie F ed H



F Siltiti, argilliti ed argille intensamente deformate, piegate e tettonizzate, con orizzonti deformati e disarticolati di areniti



G Argilliti, siltiti o argille indisturbate, anche con sottili livelli arenitici



H Argilliti e siltiti intensamente tettonizzate, a struttura caotica, con porzioni argillose e sottili orizzonti arenitici ridotti a scaglie

Table 8: Most common GSI range for typical granite.*

SURFACE CONDITIONS	DECREASING SURFACE QUALITY					STRUCTURE	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES													
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR									
<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR SCHISTOSE METAMORPHIC ROCKS</p> <p>From a description of the structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks or pieces is small compared with the size of the excavation under consideration. When the individual block size is more than about one quarter of the excavation size, the failure will be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.</p>	Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, aperture < 1 mm hard filling	Slightly rough, moderately weathered, aperture 1 - 5 mm, hard and soft filling	Smooth, highly weathered surfaces, aperture > 5 mm, predominantly soft fillings	Slickensided, highly weathered surfaces, aperture > 5 mm, soft fillings	<p>INTACT OR MASSIVE - complete lack of foliation and very few widely spaced discontinuities</p>	<p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	<p>SPARSELY FOLIATED - partially fractured, massive intervals prevail over foliated intervals</p>	<p>MODERATELY FOLIATED - fractured rock mass formed by massive and foliated intervals in similar proportions</p>	<p>FOLIATED - folded and/or faulted rock mass with occasional massive intervals</p>	<p>VERY FOLIATED - folded and/or faulted rock mass, highly fractured, formed by foliated rocks only</p>	<p>FAULTED/SHEARED - very folded and faulted, tectonically disturbed rock mass</p>	N/A							
	Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, aperture < 1 mm hard filling	Slightly rough, moderately weathered, aperture 1 - 5 mm, hard and soft filling	Smooth, highly weathered surfaces, aperture > 5 mm, predominantly soft fillings	Slickensided, highly weathered surfaces, aperture > 5 mm, soft fillings	90	80	70	60	50	40	30	20	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR	VERY POOR	90	80	70	60	50	40	30	20	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR	VERY POOR	90	80	70	60	50	40	30	20	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR	VERY POOR	90	80	70	60	50	40	30	20	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR	VERY POOR	90	80	70	60	50	40	30	20	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR SCHISTOSE METAMORPHIC ROCKS

From a description of the structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks or pieces is small compared with the size of the excavation under consideration. When the individual block size is more than about one quarter of the excavation size, the failure will be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)

From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

STRUCTURE

INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities

BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets

VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets

BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity

DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces

LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes

DECREASING SURFACE QUALITY

VERY GOOD

GOOD

FAIR

POOR

VERY POOR

DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES

90

80

70

60

50

40

30

20

10

Costante mi
 Dipende dalla litologia e
 dalla composizione delle
 rocce

*Parametro relativamente
 poco importante*

**VALUTAZIONE DELLA COSTANTE mi
 (per rocce intatte)**

classe	gruppo	tessitura				
		<i>grossolana</i>	<i>media</i>	<i>fine</i>	<i>molto fine</i>	
ROCCHE SEDIMENTARIE	CLASTICHE	Conglomerati	Arenarie	Siltiti	Argilliti	
		22	19	9	4	
		Grovacche 18				
	NON CLASTICHE	Organiche	Chalk 18			
			Carbone 8 - 12			
		Carbonatiche e	Breccia	Calcarei spartiti	Calcarei micritici	
			20	10	8	
		Chimiche	Gessiti		Anidrite	
	16	13				
	ROCCHE METAMORFICHE	Non foliate	Marmo	Hornfels	Quarzite	
9		19	24			
Leggermente foliate		Migmatite	Anfibolite	Milonite		
30		25 - 31	6			
Foliate	Gneiss	Scisti	Filliti	Slate		
33	4 - 8	10	9			
ROCCHE IGNEE	Chiare	(Si - Al)	Granito	Riolite	Ossidiana	
			33	16	19	
			Granodiorite		Dacite	
			30		17	
			Diorite		Andesite	
	28		19			
	Scure	(Mg - Fe)	Gabbro	Dolerite	Basalto	
			27	19	17	
			Norite			
			22			
Piroclastici			Agglomerato piroclastico	Breccia piroclastica	Tufo	
20	18	15				

ESEMPI FORMAZIONI LOCALI

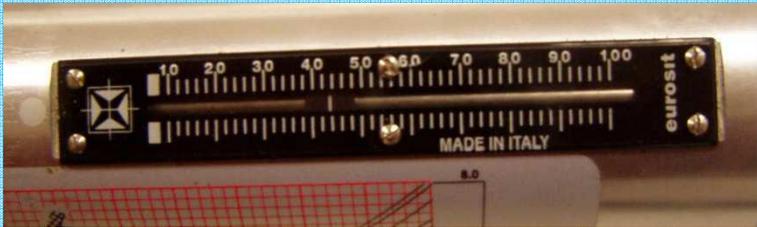
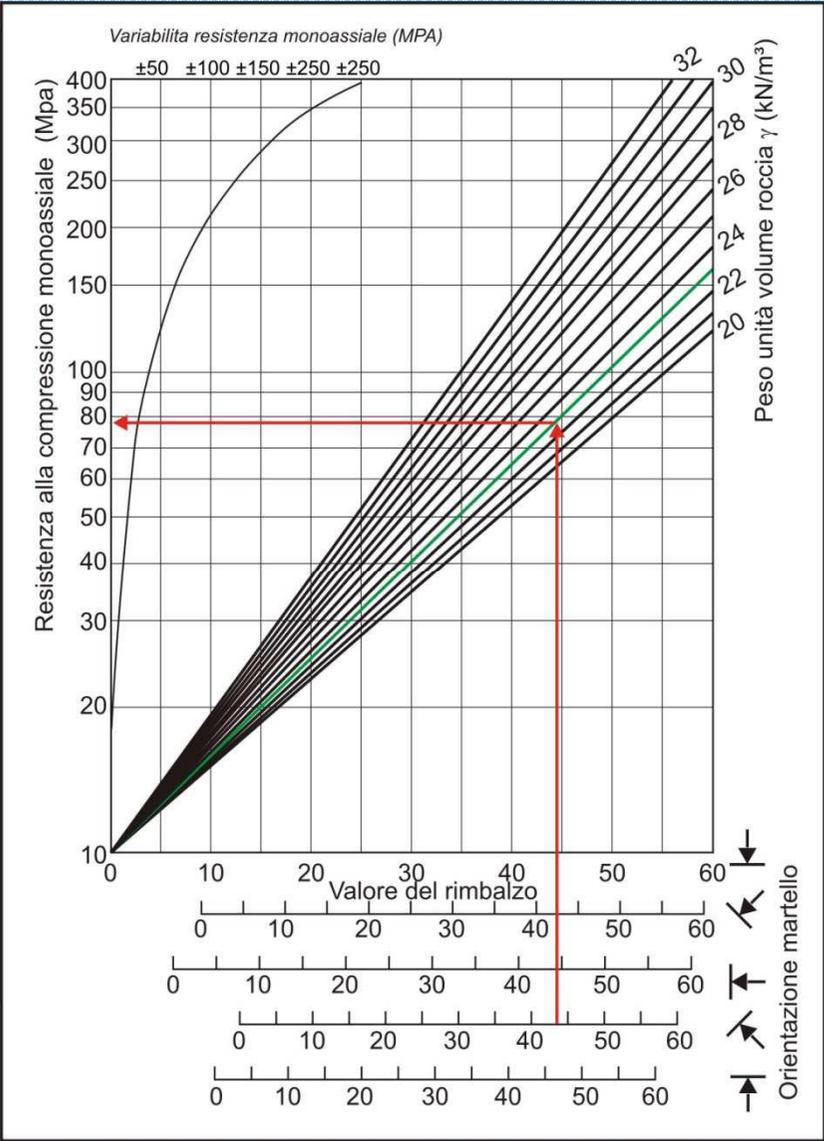
Argille Varicolori Valmarec.	4 - 6
Formazione di Monte Morello (calcarei marnosi)	8 - 10
Formazione di San Marino	14 - 18
Formazione di Monte Fumalolo	12 - 16
Formazione di Acquaviva (conglomerati)	22
Formazione di Acquaviva (arenarie)	12 - 14
Evaporiti (gessi)	14 - 16
Peliti grigio azzurre	4 - 8

Resistenza materiale intatto

Compressione monoassiale

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA COMPRESIONE MONOASSIALE						
grado	definizione	Resistenza alla compressione monoassiale (Mpa)	Point load (Mpa)	Valutazione della resistenza in situ	Esempi	
ROCCHE	R6	Estremamente resistente	>250	>10	Scheggiabile con difficoltà con un martello da geologo	Basalto, Diabase, Gneiss, Quarzite, Granito
	R5	Molto resistente	100 - 250	4 - 10	Fratturabile con numerosi colpi di martello da geologo	Anfibolite, Arenarie ben cementate, calcari compatti, marmo, criolite
	R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	Fratturabile con più di un colpo di martello da geologo	Calcere, marmo, arenarie, scisti
	R3	Mediamente resistente	25 - 50	1 - 2	Fratturabile con un singolo colpo di martello da geologo. Non si può scalfire con un coltellino	Argilliti, siltiti, scisti
	R2	Debole	5 - 25	\	Scheggiabile con difficoltà con un coltellino. Inciso con la punta di un martello da geologo	Evaporiti
	R1	Molto debole	1 - 5	\	Si sbriciola incidendo con la punta di un Martello da geologo. Si scheggia con un coltellino	Rocce alterate e fratturate
	R0	Estremamente debole	0,25 - 1	\	Si può incidere con l'unghia	riempimenti
TERRE - SEDIMENTI CONSOLIDATI	S6	dura e consistente	0,50 - 1,0	\	Si può scalfire con l'unghia ma con difficoltà	argille e siltiti di substrato sovraconsolidate e parzialmente cementate
	S5	molto consistente	0,25 - 0,50	\	Si può scalfire facilmente con l'unghia	argille e siltiti di substrato sovraconsolidate
	S4	consistente	0,10 - 0,25	\	Si può incidere con un dito ma penetrare solo con grande sforzo	argille e siltiti decomprese
	S3	compatta	0,05 - 0,10	\	Si può penetrare con un dito con moderato sforzo	coperture eluvio colluviali
	S2	soffice	0,025 - 0,05	\	Si può penetrare con un dito facilmente	argille e limi alluvionali corpi di frana inattivi
	S1	molto soffice	<0,025	\	Si strizza e si modella con le mani	fango, corpi di frana attivi (mud flow)

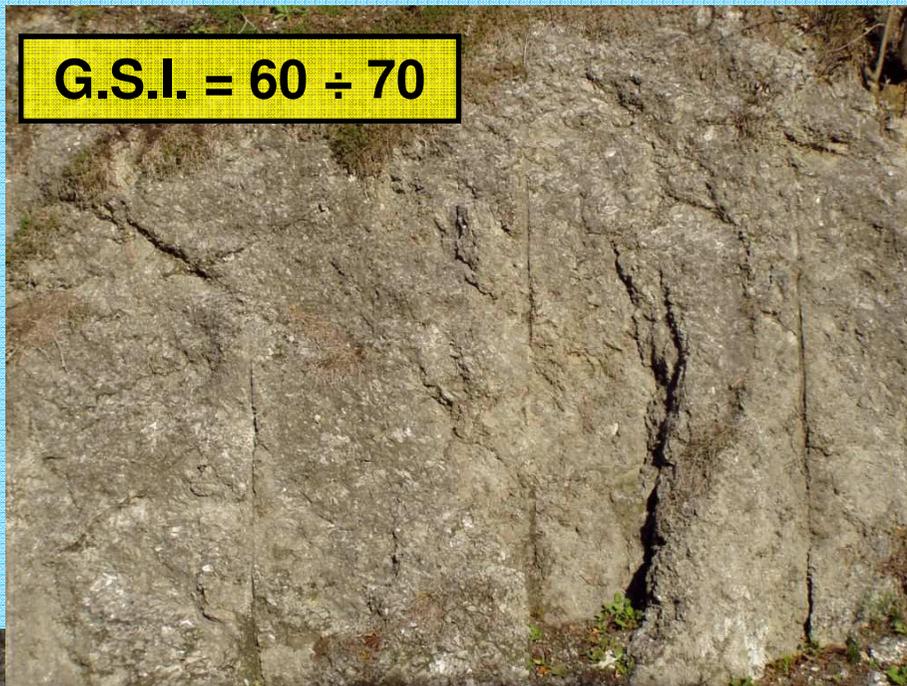
Martello di Schmidt



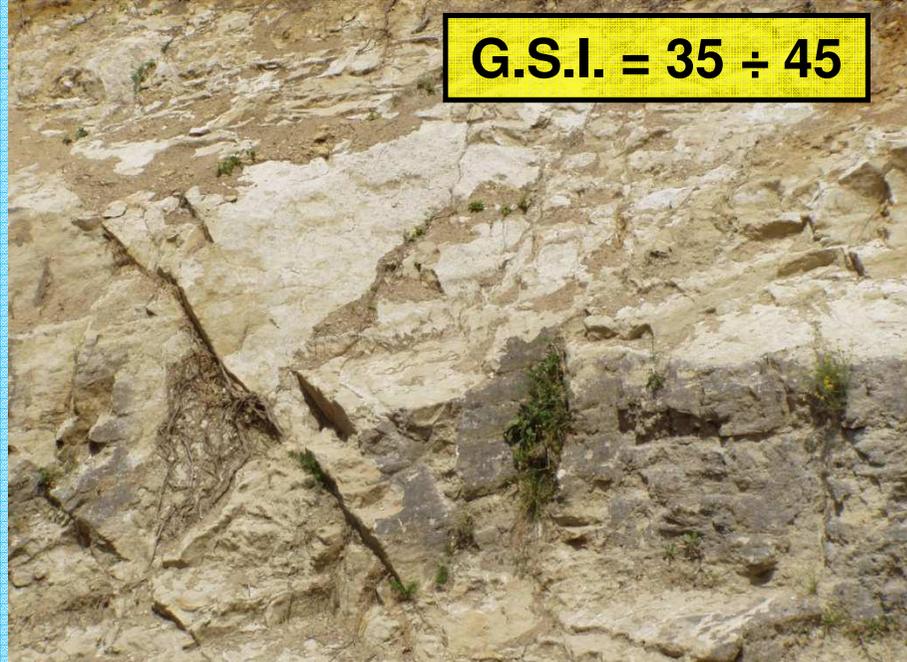
G.S.I. Geological Strength Index

ESEMPI

G.S.I. = 60 ÷ 70

A photograph of a rock face showing several vertical joints and a prominent, dark, jagged crack running down the center. The rock is light-colored and appears to be a sedimentary or metamorphic rock.

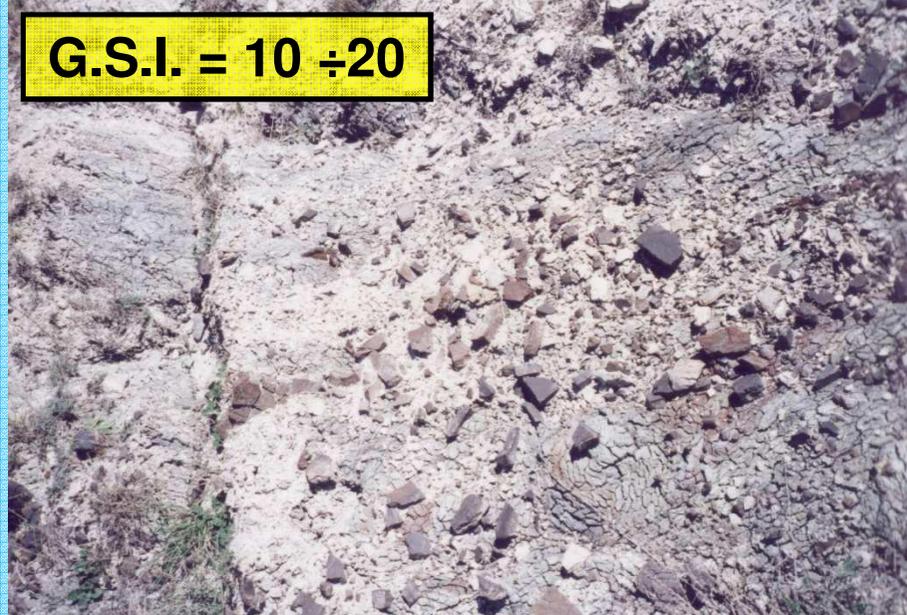
G.S.I. = 35 ÷ 45

A photograph of a rock face showing horizontal bedding planes and some small plants growing on the surface. The rock is light-colored and appears to be a sedimentary rock.

G.S.I. = 20 ÷ 30

A photograph of a rock face showing horizontal bedding planes and some small plants growing on the surface. The rock is light-colored and appears to be a sedimentary rock.

G.S.I. = 10 ÷ 20

A photograph of a rock face showing horizontal bedding planes and some small plants growing on the surface. The rock is light-colored and appears to be a sedimentary rock.

G.S.I. Geological Strength Index

A: G.S.I. = 55 ÷ 65



B: G.S.I. = 45 ÷ 55



C-D: G.S.I. = 30 ÷ 40

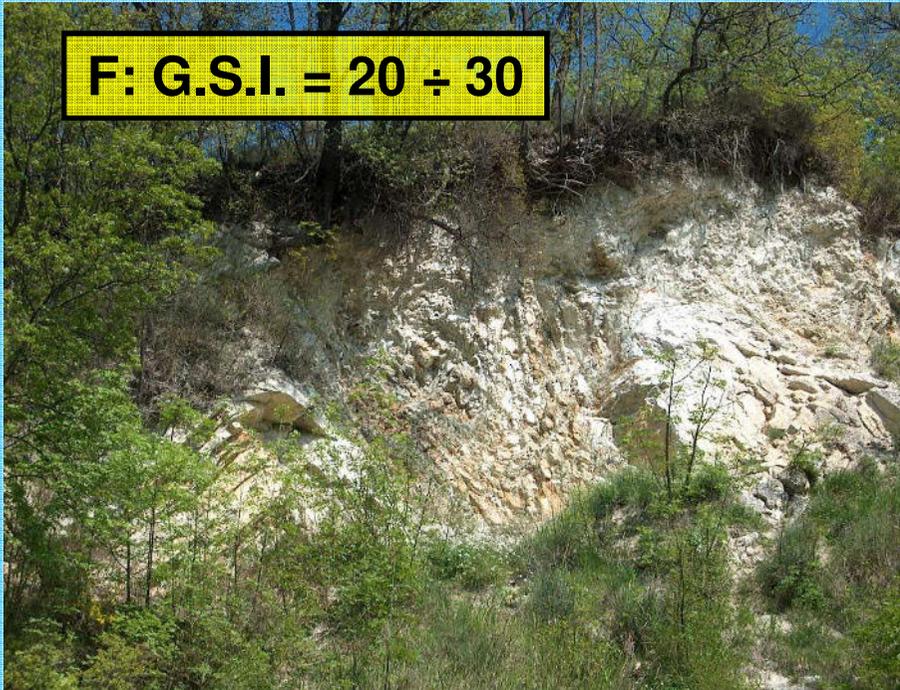


E: G.S.I. = 20 ÷ 30

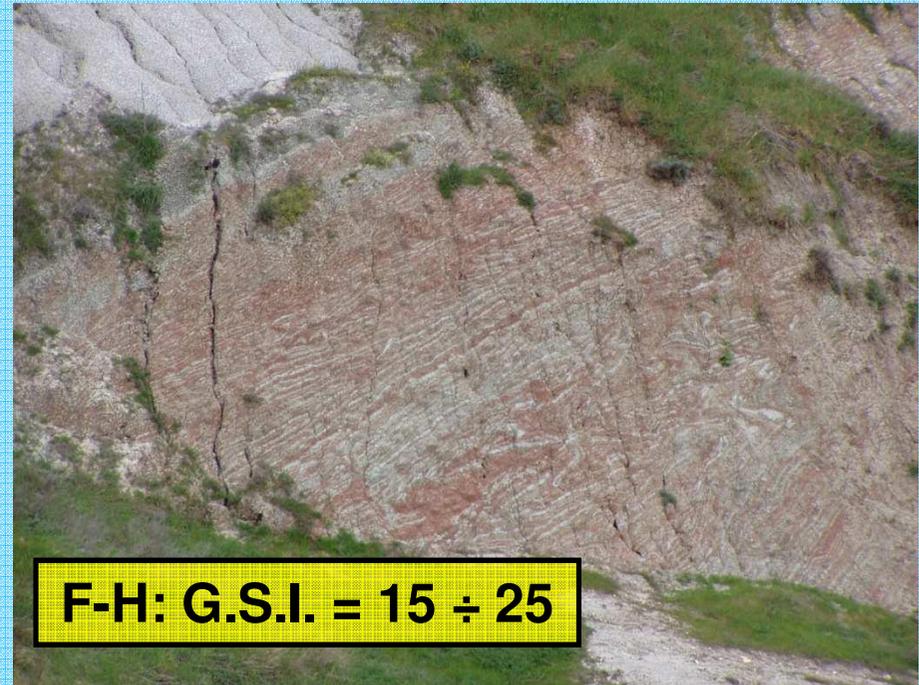


G.S.I. Geological Strength Index

F: G.S.I. = 20 ÷ 30



F-H: G.S.I. = 15 ÷ 25



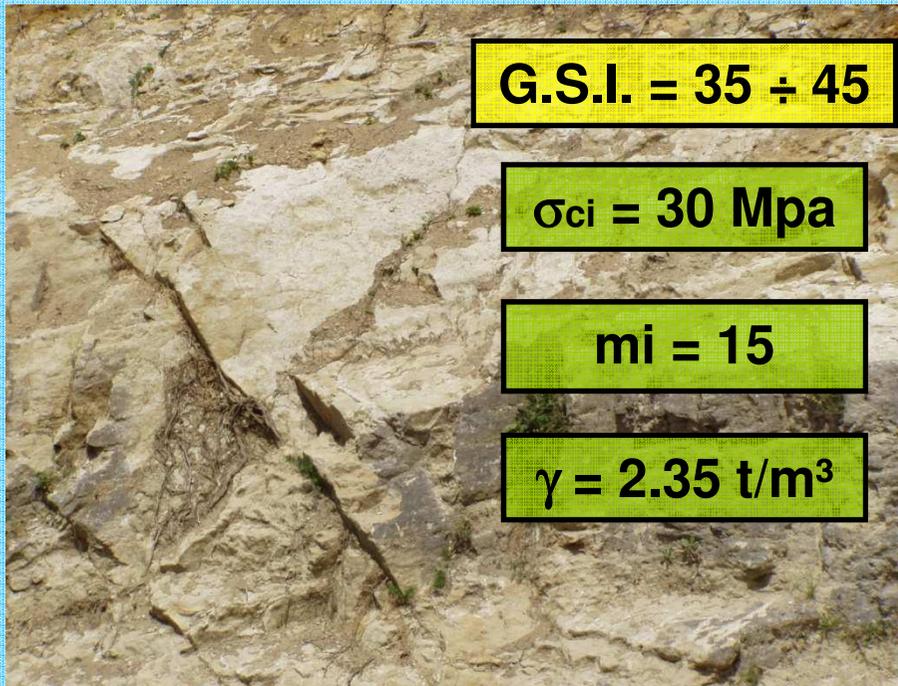
H: G.S.I. = 5 ÷ 15



G: G.S.I. = 20 ÷ 30



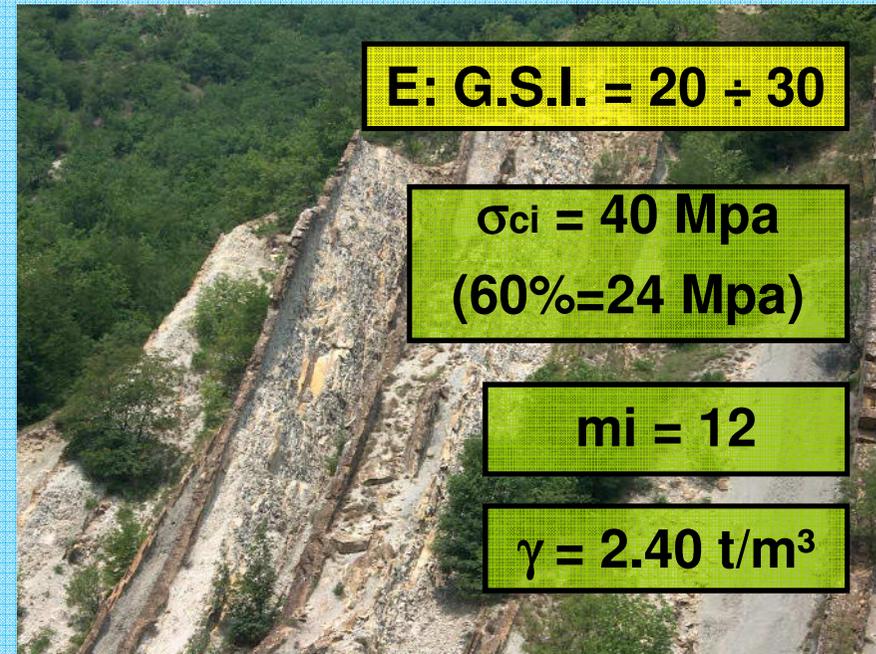
Valutazione parametri equivalenti secondo Hoek – Brown - Marinos



$$\phi'_{eq} = 49,8^\circ \div 51,8^\circ$$

$$C'_{eq} = 0,26 \div 0,35 \text{ Mpa}$$

$$E' = 2300 \div 4100 \text{ Mpa}$$

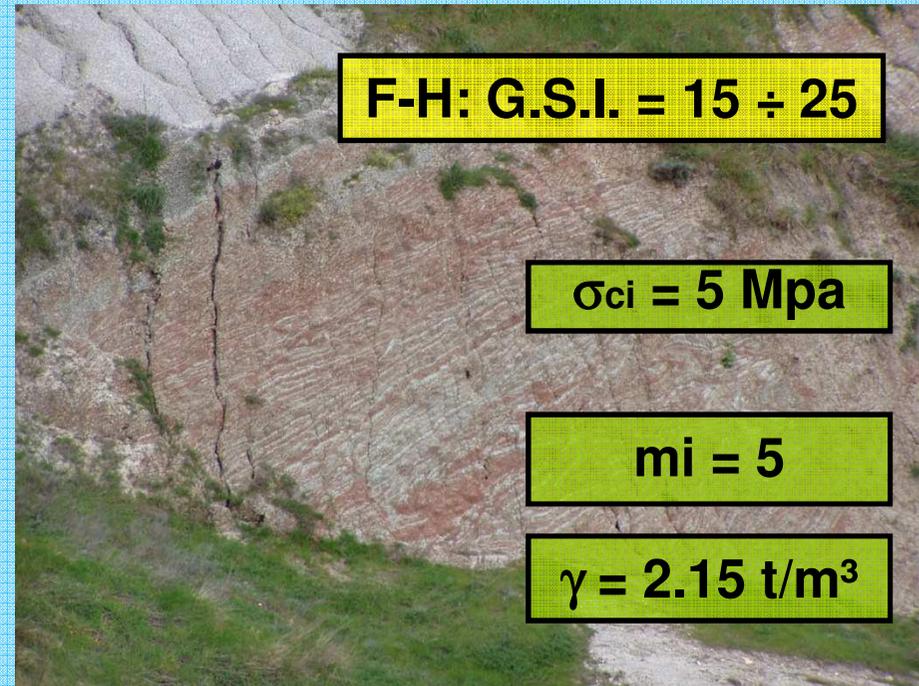
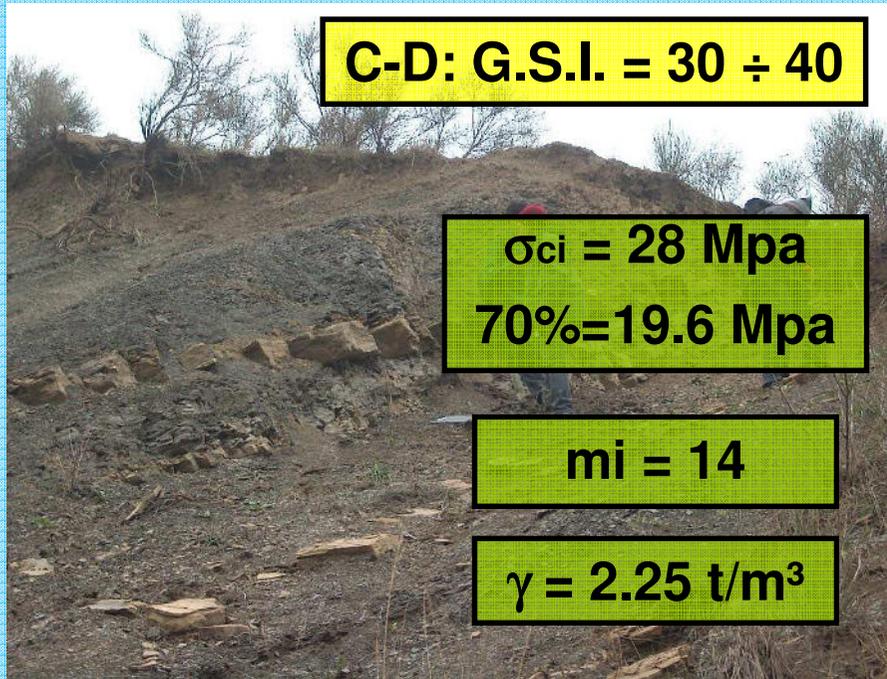


$$\phi'_{eq} = 40,2^\circ \div 44,8^\circ$$

$$C'_{eq} = 0,10 \div 0,21 \text{ Mpa}$$

$$E' = 871 \div 1550 \text{ Mpa}$$

Valutazione parametri equivalenti secondo Hoek – Brown - Marinos



$$\phi'_{eq} = 45,1^\circ \div 47,5^\circ$$

$$C'_{eq} = 0,19 \div 0,24 \text{ Mpa}$$

$$E' = 1400 \div 2490 \text{ Mpa}$$

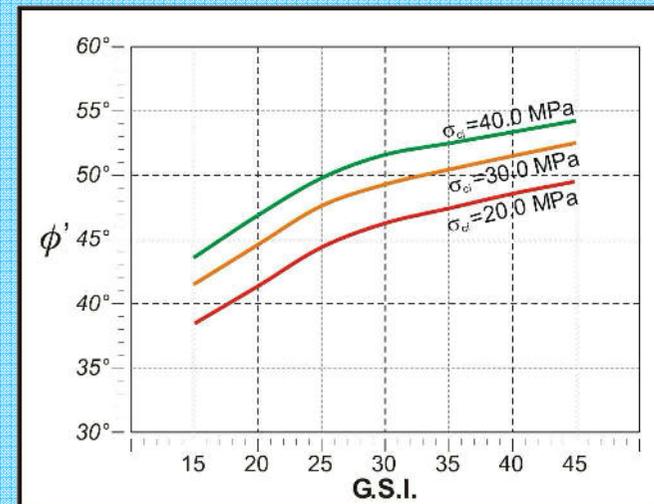
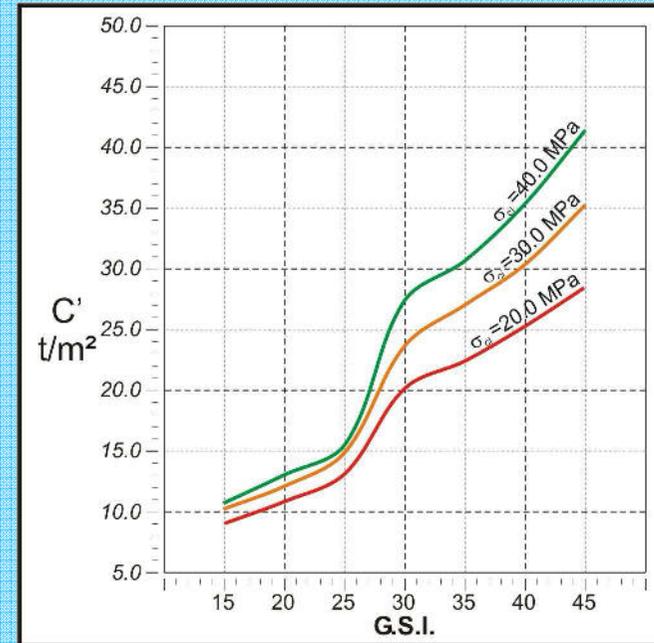
$$\phi'_{eq} = 19,2^\circ \div 24,1^\circ$$

$$C'_{eq} = 0,036 \div 0,055 \text{ Mpa}$$

$$E' = 298 \div 520 \text{ Mpa}$$

Valutazione parametri equivalenti secondo Hoek – Brown - Marinos

peso unità di volume γ (t/m ³)	costante di Hoek-Brown mi	resistenza compressione roccia intatta σ_{ci} (MPa)	GSI	parametri equivalenti	
				angolo di resistenza al taglio ϕ'	coesione C' (t/m ²)
2.35	16	20.0	15	38.5°	9.0
			20	41.6°	10.9
			25	44.5°	13.1
			30	46.1°	20.1
			35	47.4°	22.3
			40	48.5°	25.1
			45	49.6°	28.5
		30.0	15	41.5°	10.0
			20	44.7°	12.2
			25	47.7°	14.7
			30	49.2°	23.9
			35	50.4°	26.9
			40	51.4°	30.6
			45	52.4°	35.3
			40.0	15	43.6°
20	46.9°	13.1			
25	49.9°	15.9			
30	51.3°	27.2			
35	52.3°	30.9			
40	53.3°	35.5			
45	54.2°	41.5			



Correlazioni tra GSI – RMR – Q

$$GSI = RMR_{drenato} - 5$$

$$GSI = 9 \log_e Q' + 44$$

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

Poco attendibili, specialmente quando uno dei metodi risulta più adatto alla tipologia dell'ammasso

Il criterio di Hoek-Brown, nei casi in cui risulta adatto, rappresenta un efficace modo di rappresentare il comportamento geotecnico di un ammasso roccioso, riconducendolo ad una parametrizzazione in termini *equivalenti* (angolo di resistenza al taglio e coesione).

La resistenza al taglio dipende da numerosi fattori e varia anche in funzione dello sforzo normale efficace quindi della profondità.

Il metodo non richiede un rilievo geomeccanico esteso, il ricorso a prove di laboratorio non è indispensabile (ma è consigliato) ed i dati relativi ai fattori di base sono di determinazione relativamente facile.

E' invece richiesta una buona conoscenza "sul campo" dei materiali indagati

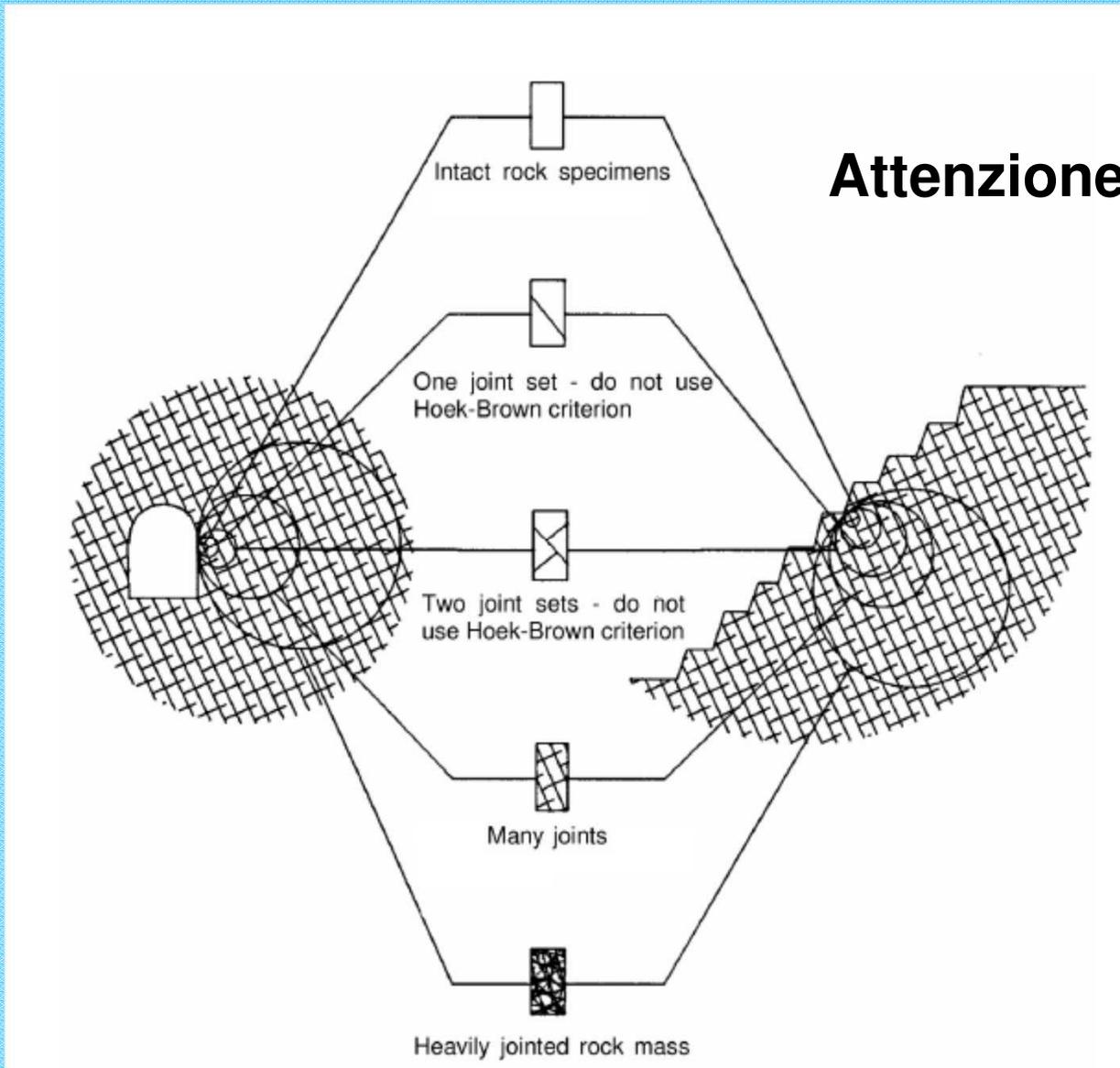
ed una notevole capacità di giudizio qualitativo delle rocce per determinare il GSI (*GSI. A geologically friendly tool for rock mass strength estimation* Marinos & Hoek, 2000 –. *Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne*).

Utilizzabile per la caratterizzazione geotecnica e per le analisi di stabilità.

Algoritmi complessi.

Tendenza a sovrastimare i parametri di deformabilità

Attenzione alla scala!!



Criterio Barton-Bandis

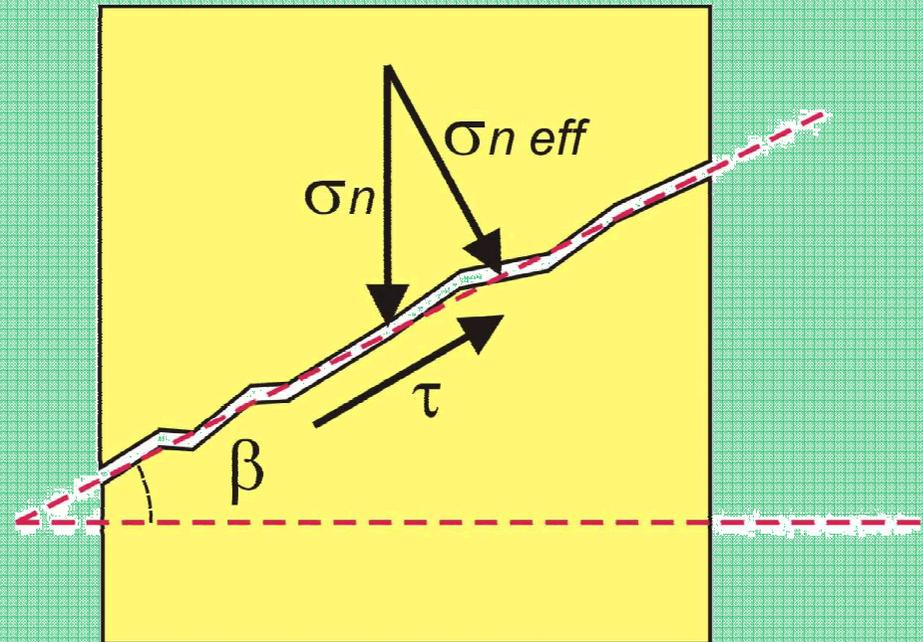
Parametri geotecnici istantanei lungo le discontinuità
Stabilità lungo i piani delle discontinuità

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_{ci} + JRC \log_{10} (JCS / \sigma_n))$$

ϕ_{ci}
angolo base di resistenza al taglio

JRC
Joint Roughness Coefficient

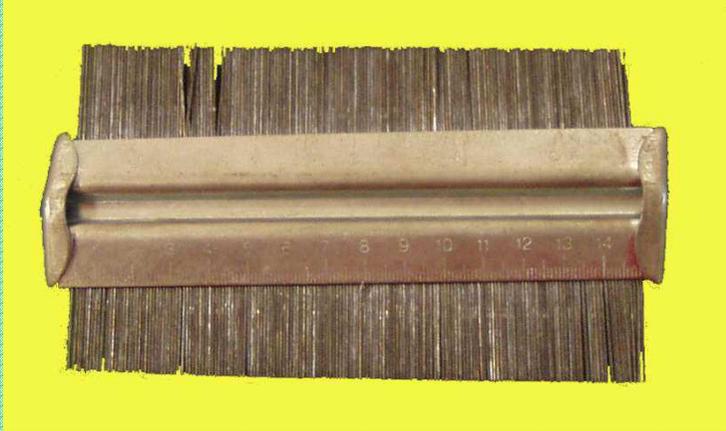
JCS
Joint wall Compressive Strength
Assimilabile alla resistenza alla
compressione monoassiale



Parametri geotecnici istantanei
Adatto alle analisi di stabilità a
blocchi

Criterio Barton-Bandis

INDICE JRC



IN AFFIORAMENTO	Indice JRC
discontinuità 3 - affioramento 1 - piano di strato	8
discontinuità 20 - affioramento 3 - piano di strato	10
discontinuità 22 - affioramento 3 - joint	10
discontinuità 32 - affioramento 4 - piano di strato	6

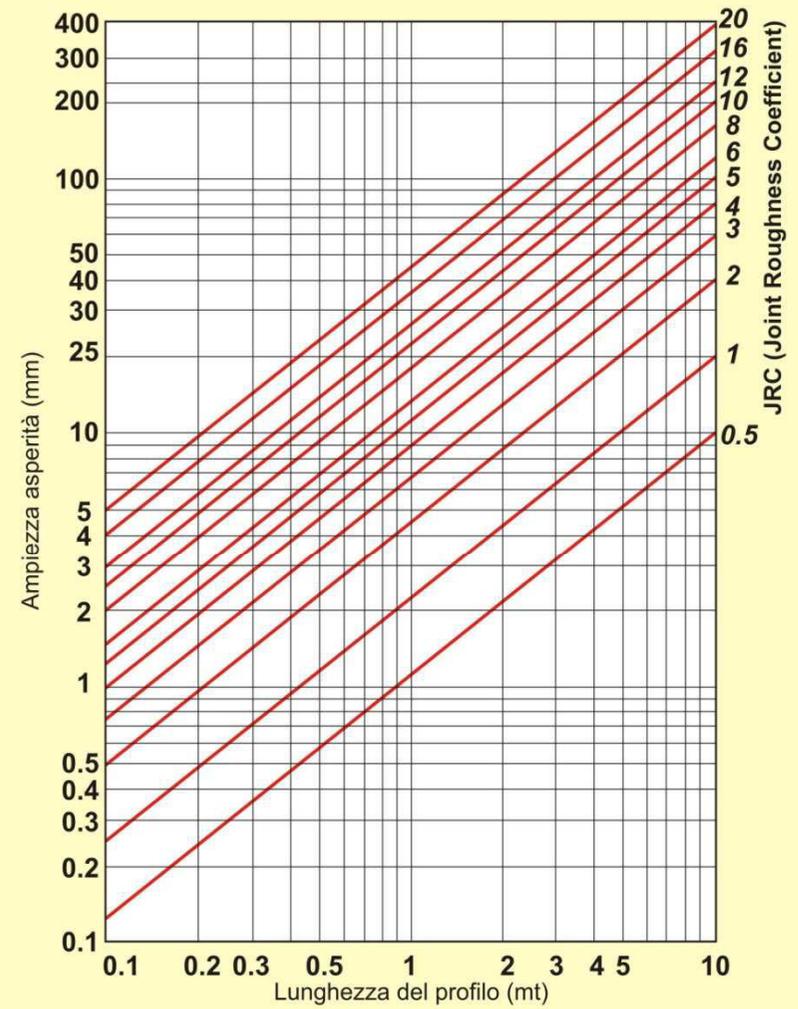
Profili di comparazione per la valutazione del valore di JRC in sito (secondo Barton)

	JRC
	0 ÷ 2
	2 ÷ 4
	4 ÷ 6
	6 ÷ 8
	8 ÷ 10
	10 ÷ 12
	12 ÷ 14
	14 ÷ 16
	16 ÷ 18
	18 ÷ 20

0 5 10 cm

Criterio Barton-Bandis

INDICE JRC

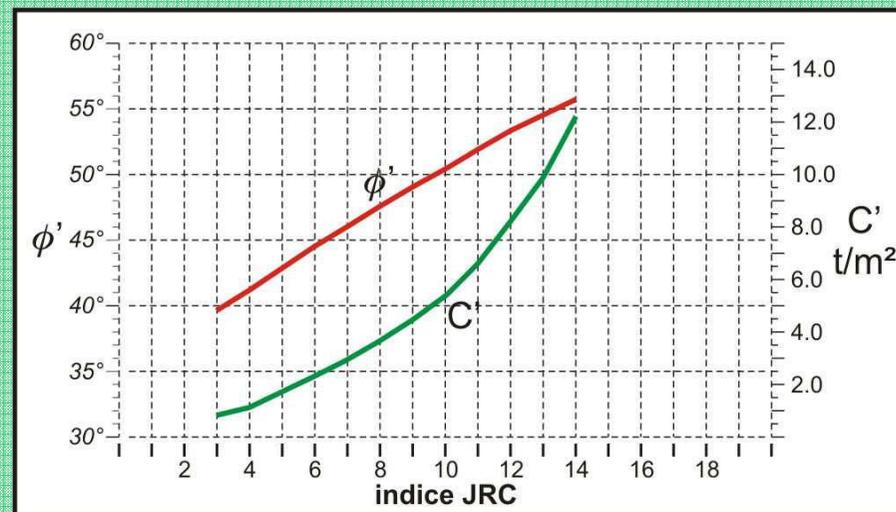


Mod. e ridiseg. Da Barton 1982

Criterio Barton-Bandis



peso unità di volume γ (t/m ³)	angolo di resistenza al taglio di base	JCS (MPa)	JRC	parametri lungo le discontinuità	
				angolo di resistenza al taglio ϕ'	coesione C' (t/m ²)
2.35	35°	25.0	3	39.7°	0.9
			4	41.3°	1.3
			5	42.9°	1.8
			6	44.4°	2.3
			7	46.0°	2.9
			8	47.5°	3.6
			9	49.0°	4.4
			10	50.5°	5.4
			11	51.9°	6.6
			12	53.3°	8.1
			13	54.6°	9.9
			14	55.8°	12.3



Il criterio di Barton Bandis è molto adatto ad analisi di stabilità a blocchi in rocce compatte, dove il movimento può avvenire lungo una discontinuità.

Non sempre agevole valutare correttamente la scabrezza JRC, che è il parametro più importante.

**Complicato valutare JRC in tre dimensioni.
Difficile stimare il ruolo dei ponti di roccia.**

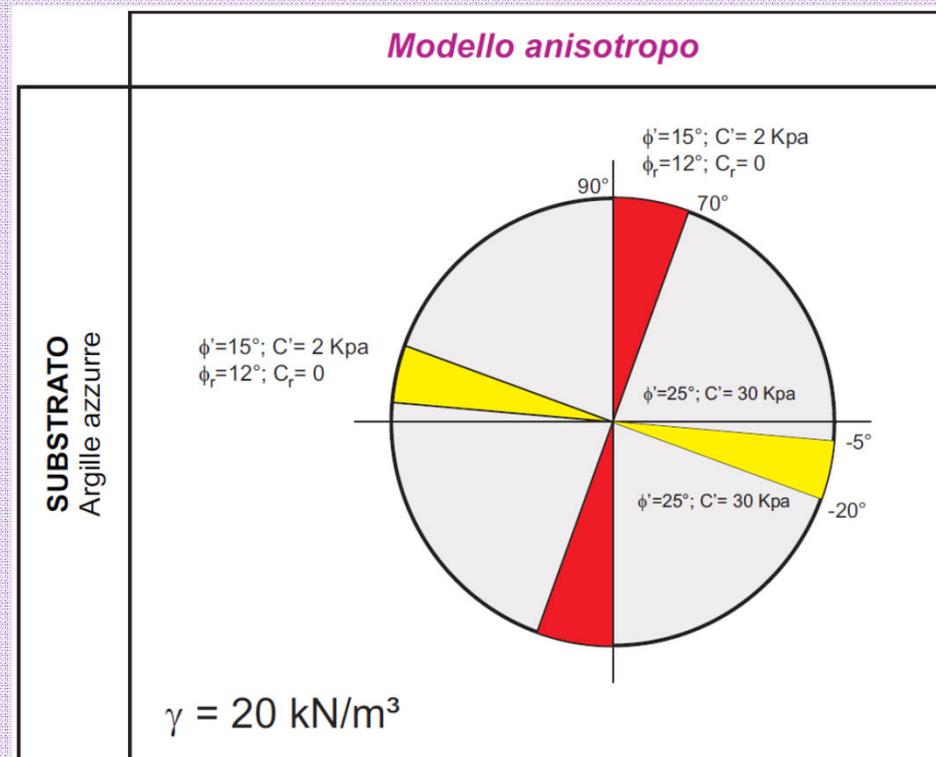
Modello Anisotropo

Identificare direzioni in cui i parametri geotecnici assumono valori differenti rispetto al materiale intatto.

Adatto a simulare rocce tenere stratificate e con una o due famiglie di discontinuità.

Discontinuità planari.

Utilizzo di prove di taglio diretto "orientate" per ottenere i valori di resistenza lungo le discontinuità



CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Quale metodo usare?

Poche famiglie discontinuità
(max 4 ÷ 5)

Materiale intatto molto
resistente

Assenza strutture tipo pieghe

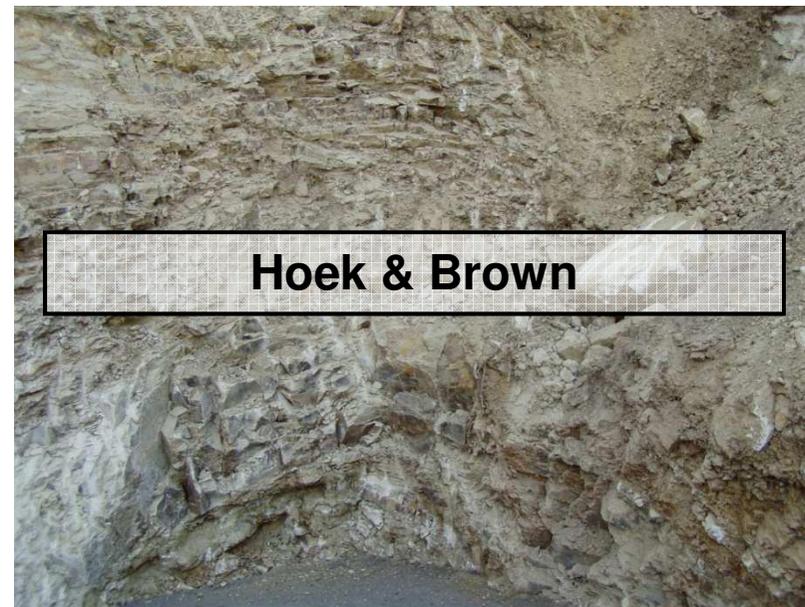
GSI elevato

Discontinuità diffuse non ben
raggruppabili in famiglie

Materiale intatto più scadente

Strutture geologiche articolate

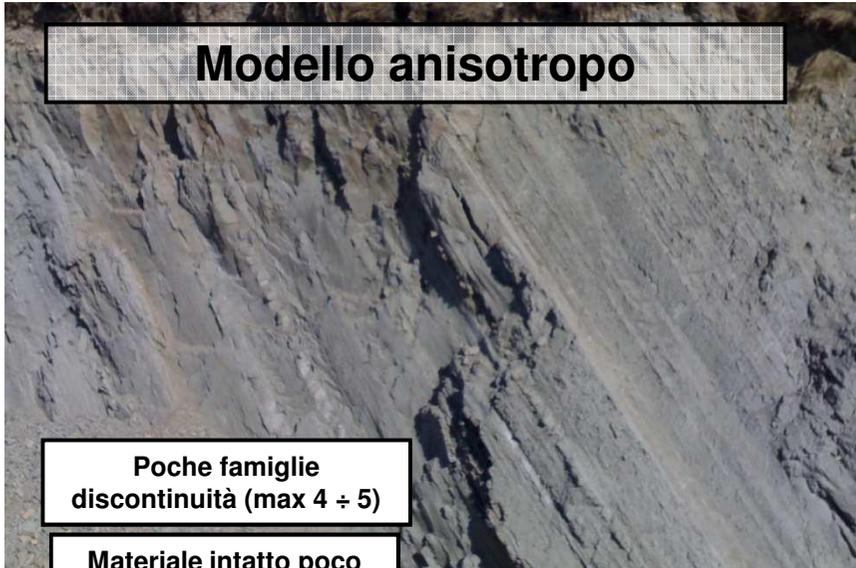
GSI basso



ANALISI STABILITA'

Quale metodo usare?

Modello anisotropo



Poche famiglie
discontinuità (max 4 ÷ 5)

Materiale intatto poco
resistente
ROCCE TENERE

Assenza strutture tipo
pieghe

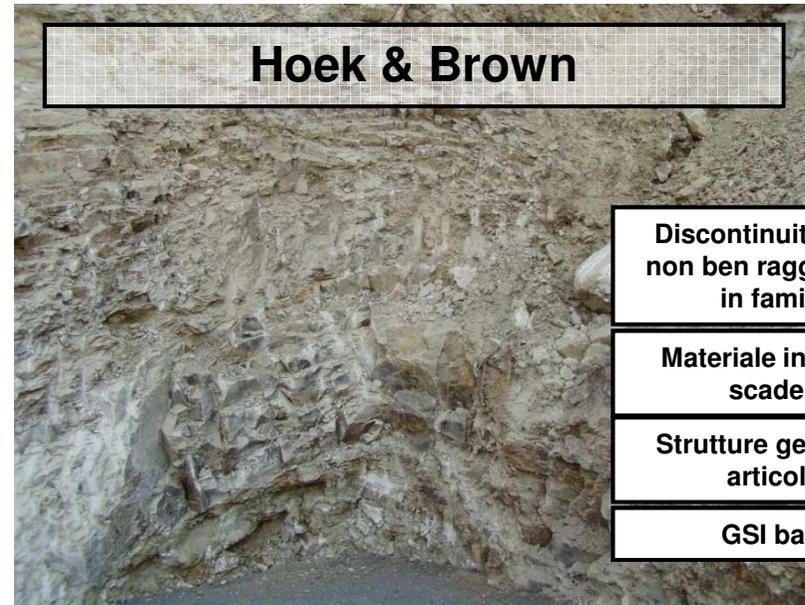
GSI basso

*IN OGNI CASO E' FONDAMENTALE
SCEGLIERE UNA GEOMETRIA
ADEGUATA, GEOLOGICAMENTE COERENTE,
DELLE SUPERFICI DI SCORRIMENTO*

Criterio Barton-Bandis



Hoek & Brown



Discontinuità diffuse
non ben raggruppabili
in famiglie

Materiale intatto più
scadente

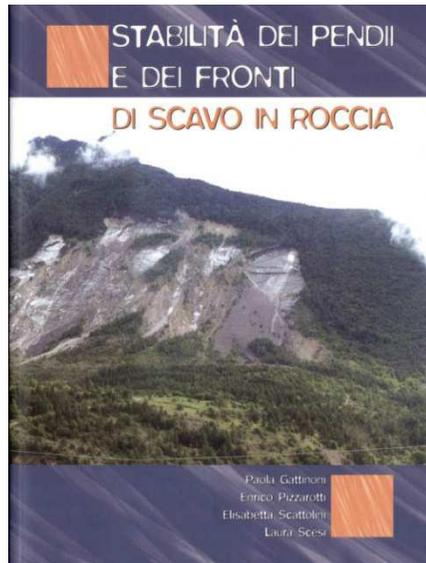
Strutture geologiche
articolate

GSI basso

Riferimenti bibliografici e testi consigliati

ROCK ENGINEERING

Course notes by Evert Hoek



<http://www.rocscience.com/hoek/Hoek.asp>

<http://www.geoengineer.org/books-rockmechanics.html>

<http://www.geoengineer.org/index.html>

http://www.icivilengineer.com/Geotechnical_Engineering/Rock_Engineering/

<http://ggaci.units.it/meccanica/proprie.pps>

<http://www.programgeo.it/FormulaGeo/Caduta%20massi.html>

http://www.grow.arizona.edu/rock/rock_eng_fundamentals/rockengfundamentals.shtml

Consulta dei Geologi della Provincia di Rimini

18 settembre 2015 Pennabilli (RN)

Geologia applicata degli ammassi rocciosi strutturalmente complessi

Grazie per l'attenzione