

Mecánica de suelos y geología (84.07)-M2

Clasificación de macizos rocosos. Ejercicios resueltos y cuestionario guía.

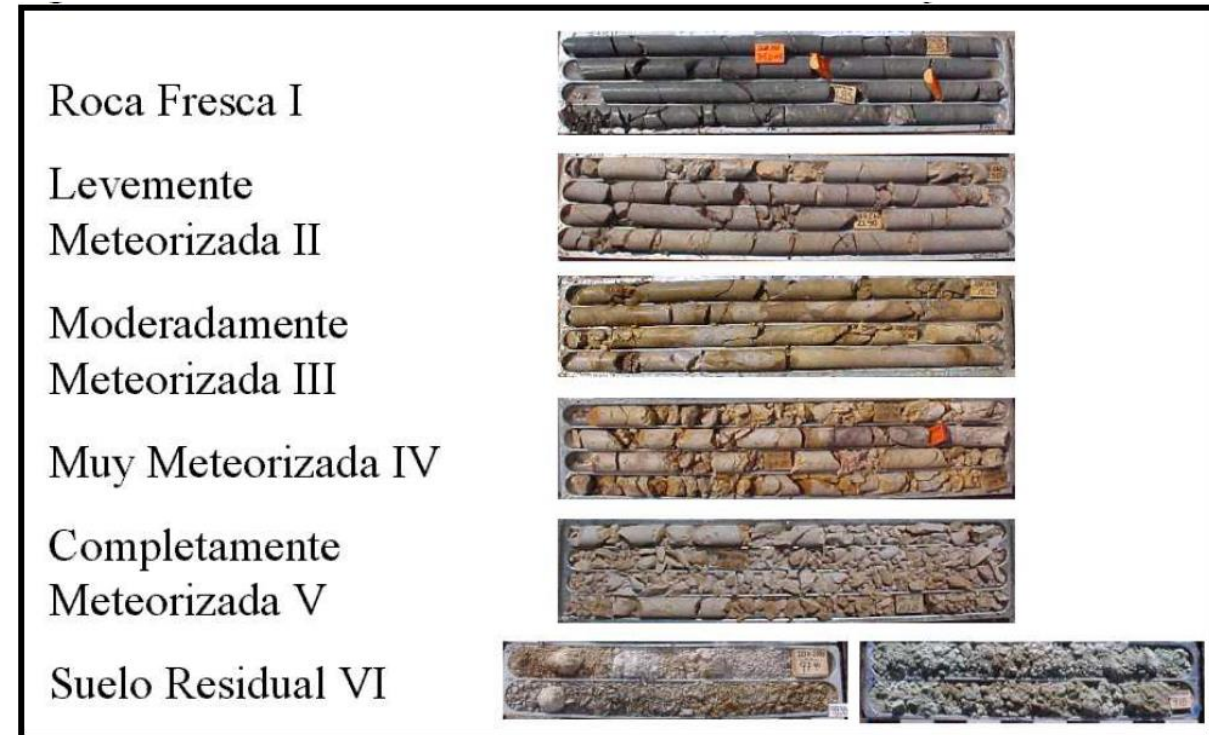


1- Índice RQD (Rock Quality Designation, Deere, 1967, 1989)

- **Proporción de roca sólida y dura, fresca a poco o moderadamente meteorizada, que se recupera en cada tramo de la perforación.**

Meteorización y alteración → Cambios en la composición mineralógica de la roca ↔ disminución de la resistencia mecánica del MR. Deterioro por meteorización y alteración afecta principalmente las paredes de las discontinuidades.

- **Parámetro de entrada para otras clasificaciones.**
- Etapa exploratoria del sitio.
- Testigos de perforaciones o pozos de sondeo.
- Fracturas naturales entre fragmentos de roca > 10 cm.
- A mayor RQD, mejor calidad y menor fracturación del MR.
- No considera: fracturas paralelas a la perforación ni producidas por la herramienta.



https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/GL5201/1/material_docente/bajar?id=391885

Deere, D.U. and Miller, D.W. (1967) The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 91-101: <https://doi.org/10.1520/STP48465S>

Deere, D.U. 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station: <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/6945/>

Calcular la recuperación porcentual (R) y el índice RQD de los testigos esquematizados en las figuras 1.1 y 1.2. Indique cuál de ellos presenta mejor calidad.

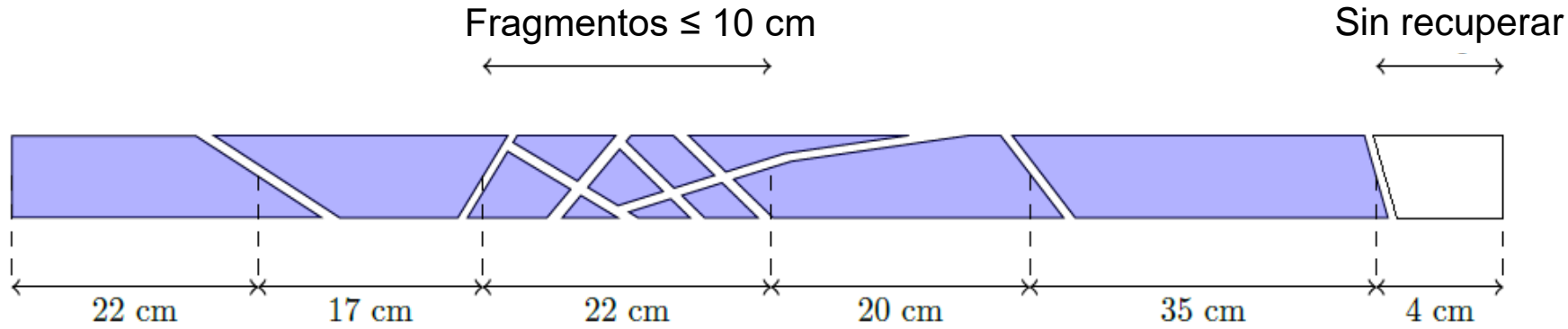


Figura 1.1

$$R = \frac{\sum L_{iR}}{L_C}$$

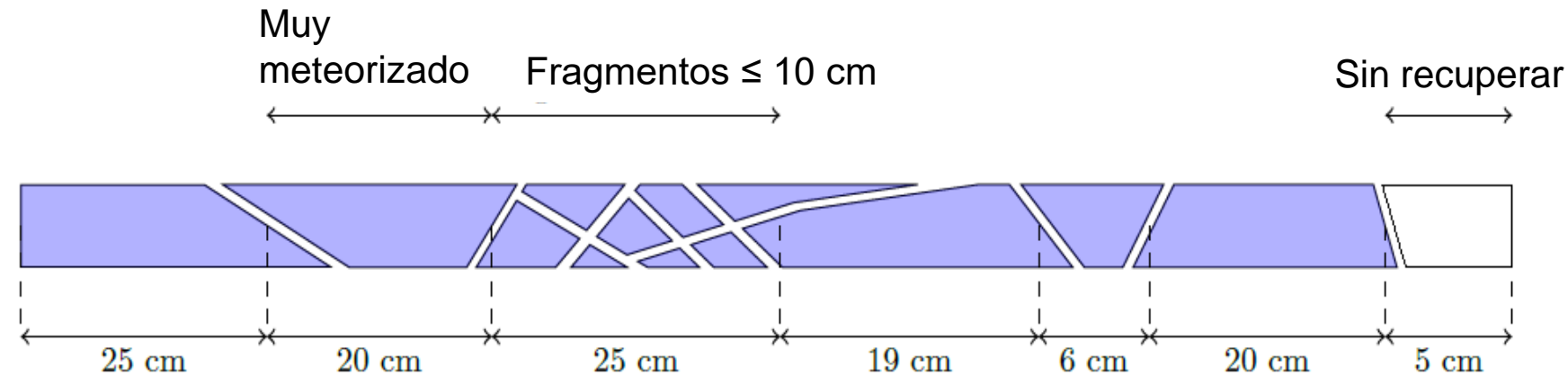


Figura 1.2

$$RQD = \frac{\sum L_{iRQD}}{L_C}$$

<https://claudiovz.github.io>

L_{iR} : longitud de todos los fragmentos de roca intacta recuperados.

L_{iRQD} : longitud de los fragmentos de roca intacta >10 cm.

L_C : longitud de la carrera (longitud de avance del saca-testigos)

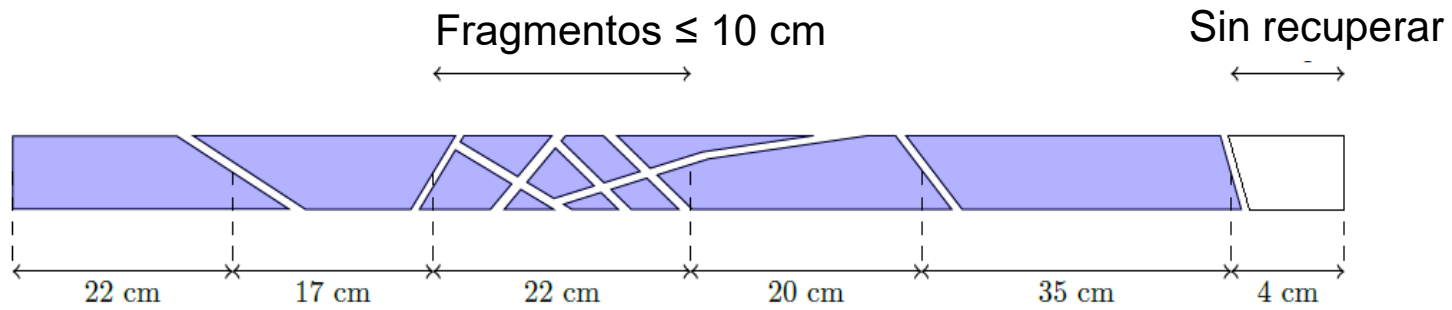


Figura 1.1

<https://claudiovz.github.io>

$$L_C = (22 + 17 + 22 + 20 + 35 + 4) \text{ cm} = 120 \text{ cm}$$

$$R = \frac{(22 + 17 + 22 + 20 + 35) \text{ cm}}{120 \text{ cm}}$$

$$R = \frac{116}{120}$$

$$R = 0,97 \quad R(\%) = 97\%$$

$$RQD = \frac{(22 + 17 + 20 + 35) \text{ cm}}{120 \text{ cm}}$$

$$RQD = \frac{94}{120}$$

$$RQD = 0,78 \quad RQD = 78\%$$

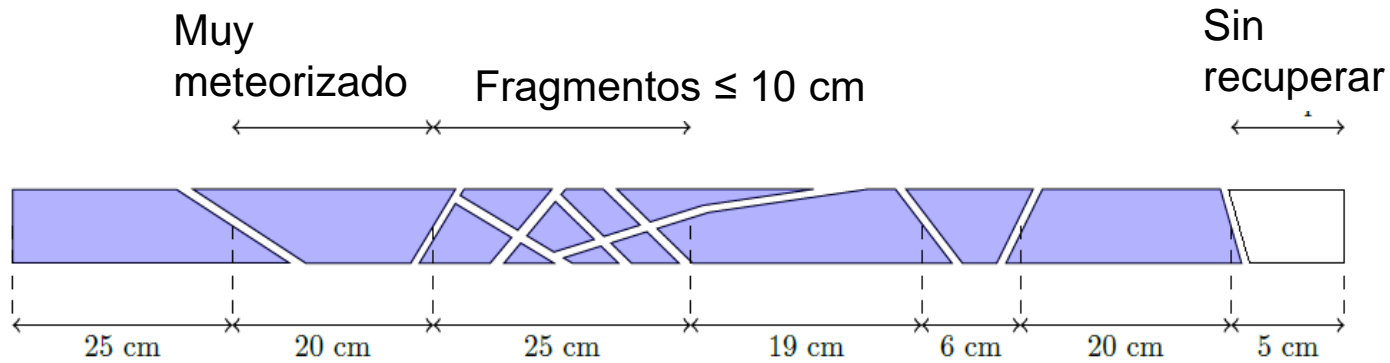


Figura 1.2

<https://claudiovz.github.io>

$$L_C = (25 + 20 + 25 + 19 + 6 + 20 + 5) \text{ cm} = 120 \text{ cm}$$

$$R = \frac{(25 + 25 + 19 + 6 + 20) \text{ cm}}{120 \text{ cm}}$$

$$R = \frac{95}{120}$$

$$R = 0,79$$

$$R(\%) = 79\%$$

$$RQD = \frac{(25 + 19 + 20) \text{ cm}}{120 \text{ cm}}$$

$$RQD = \frac{64}{120}$$

$$RQD = 0,53 \quad RQD = 53\%$$

RQD (%)	Calidad del macizo rocoso
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 -75	Regular
75 – 90	Buena
90 - 100	Excelente

Figura	RQD (%)	Calidad del macizo rocoso
1.1	78	Buena
1.2	53	Regular

2- Índice Q (Rock Tunnelling Quality Index, Barton, Lien y Lunde, 1974; NGI, 2022)

Parámetros considerados:

RQD (grado de fracturación del macizo rocoso)

J_n (cantidad de familias)

J_r (rugosidad de paredes)

J_a (alteración de paredes)

J_w (presencia de agua)

SRF (estado tensional del macizo rocoso \leftrightarrow confinamiento)

} Discontinuidades

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

$\frac{RQD}{J_n}$ Estructura del macizo rocoso \rightarrow medida relativa del **tamaño de bloques de roca intacta**.

$\frac{J_r}{J_a}$ **Resistencia al corte de las discontinuidades** \leftrightarrow fricción entre bloques, rugosidad, rellenos.

$\frac{J_w}{SRF}$ **Estado tensional del MR** \leftrightarrow acción de los esfuerzos tectónicos sobre el macizo (SRF) y presión de agua (J_w).

2.a) Clasificar el macizo rocoso X, en cual se excavará un túnel, usando el índice Q.

A partir de los datos obtenidos en la campaña de exploración geotécnica, asignar el valor correspondiente a cada parámetro y calcular Q: ▲

Parámetro	Descripción	Valores asignados
RQD	80 %	80
J_n	2 familias de diaclasas.	4
J_r	Diaclasas con desplazamiento cortante menor a 3 cm. Superficies onduladas y lisas.	2
J_a	Paredes inalteradas, levemente manchadas.	2
J_w	Excavaciones secas.	1
SRF	Zonas débiles que pueden causar caída de bloques durante el avance de la excavación. Sólo una zona fracturada en roca competente, sin arcilla ni otro tipo de alteración. Profundidad > 50m.	2,5

$$Q = \frac{80}{4} \times \frac{2}{2} \times \frac{1}{2,5}$$

$$Q = 8$$

Calidad del MR: media

2.b) Determinar el índice Q para otro sector del macizo rocoso X, en el que se obtuvieron los siguientes datos: 



Parámetro	Descripción	Valores asignados
RQD	75%	75
J_n	2 familias de diaclasas.	4
J_r	Diaclasas con desplazamiento cortante menor a 3 cm. Superficies rugosas.	3
J_a	Relleno continuo de arcillas expansivas, espesor < 5mm	9
J_w	Excavaciones secas o de influjos reducidos (< 5l/min). En algunos sectores se observa humedad o goteos localizados. $\bar{P}_{\text{agua}} = 0,08 \text{ MPa}$	1
SRF	Zonas débiles que pueden causar caída de bloques durante el avance de la excavación. Sólo una zona fracturada en roca competente, sin arcilla ni otro tipo de alteración. Profundidad > 50m.	2,5

$$Q = \frac{75}{4} \times \frac{3}{9} \times \frac{1}{2,5}$$

$$Q = 2,5$$

Calidad del MR: mala

J_n : índice de familias de discontinuidades

DESCRIPCIÓN	J_n
- Roca masiva	0,5-1
- Una familia de diaclasas	2
- Una familia y algunas juntas ocasionales	3
- Dos familias	4  
- Dos familias y algunas juntas	6
- Tres familias	9
- Tres familias y algunas juntas	12
- Cuatro o más familias, roca muy fracturada, "terrones de azúcar", etc.	15
- Roca triturada terrosa	20

En boquillas, se utiliza $2 J_n$ y en intersecciones de túneles $3 J_n$

 2.a)

 2.b)



https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I



2 Joint set number		J_n
A	Massive, no or few joints	0.5-1.0
B	One joint set	2
C	One joint set plus random joints	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random joints	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random joints	12
H	Four or more joint sets, random heavily jointed "sugar cube", etc	15
J	Crushed rock, earth like	20

Note: i) For tunnel intersections, use $3 \times J_n$
ii) For portals, use $2 \times J_n$

J_r : índice de rugosidad de las discontinuidades

DESCRIPCIÓN	J_r
* Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento cortante de menos de 10 cm	
- Juntas discontinuas	4
- Junta rugosa o irregular ondulada	3 
- Suave ondulada	2 
- Espejo de falla, ondulada	1,5
- Rugosa o irregular, plana	1,5
- Suave plana	1
- Espejo de falla, plana	0,5
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ambas se desplazan lateralmente	J_r
- Zona conteniendo minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de la junta	1
- Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta	1
<p>NOTA: Si el espaciado de la familia de juntas es mayor de 3 m hay que aumentar el J_r en una unidad.</p> <p>Para juntas planas con espejo de falla provisto de lineaciones, si éstas están orientadas en la dirección de mínima resistencia, se puede usar $J_r=0,5$</p>	

https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I


3 Joint Roughness Number		J_r
<p>a) Rock-wall contact, and b) Rock-wall contact before 10 cm of shear movement</p>		
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough, irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1
G	Slickensided, planar	0.5
<p>Note: i) Description refers to small scale features and intermediate scale features, in that order</p>		
<p>c) No rock-wall contact when sheared</p>		
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact when sheared	1
<p>Note: ii) Add 1 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m (dependent on the size of the underground opening) iii) $J_r = 0.5$ can be used for planar slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented in the estimated sliding direction</p>		

NGI (2022) Using the Q-System—Rock Mass Classification and Support Design. NGI Publication, Oslo, 56 p.: https://www.ngi.no/globalassets/bilder/forskning-og-radgivning/bygg-og-anlegg/handbook-the-q-system-may-2015-nettutg_update-june-2022.pdf

J_a : índice de alteración de las discontinuidades

DESCRIPCIÓN	J_a	Φ_r
* Contacto entre las dos caras de la junta.		
- Junta sellada dura, sin reblandecimiento, impermeable, p.ej. cuarzo, paredes sanas.	0,75	
- Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25-30
- Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	2 ▲	25-30
- Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible.	3	20-25
- Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, p.ej. caolinita, mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 ó 2 mm.	4	8-16
* Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de desplazamiento.	J_a	Φ_r
- Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla.	4	25-30
- Rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos, fuertemente sobreconsolidados. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	6	16-24
- Sobreconsolidación media o baja, reblandecimiento; rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	8	12-16
- Rellenos de arcillas expansivas, p.ej. montmorillonita, de espesor continuo de 5 mm. El valor J_a depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8-12	6-12
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ésta ha sufrido un desplazamiento cortante.	J_a	Φ_r
- Zonas o bandas de roca desintegrada o roca machacada y arcilla.	6-8 u 8-12	6-24 "
- Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla, sin reblandecimiento.	5	6-24
- Milonitos arcillosos gruesos	10-13 ó 13-20	6-24 "

4 Joint Alteration Number		Φ_r approx.	J_a
a) Rock-wall contact (no mineral fillings, only coatings)			
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
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings; sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	2
D	Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening).	20-25°	3
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
b) Rock-wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)			
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	4
G	Strongly over-consolidated, non-softening, clay mineral fillings (continuous but <5 mm thickness).	16-24°	6
H	Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, but <5 mm thickness).	12-16°	8
J	Swelling-clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous but <5 mm thickness). Value of J_a depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	8-12
c) No rock-wall contact when sheared (thick mineral fillings)			
K	Zones or bands of disintegrated or crushed rock. Strongly over-consolidated.	16-24°	6
L	Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Medium or low over-consolidation or softening fillings.	12-16°	8
M	Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Swelling clay. J_a depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	8-12
N	Thick continuous zones or bands of clay. Strongly over-consolidated.	12-16°	10
O	Thick, continuous zones or bands of clay. Medium to low over-consolidation.	12-16°	13
P	Thick, continuous zones or bands with clay. Swelling clay. J_a depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	13-20

DESCRIPCIÓN	J_w	Presión agua kg/cm ²
- Excavaciones secas o de fluencia poco importante, p.ej. menos de 5 l/min localmente.	1  ▲	<1
- Fluencia o presión medias, ocasional lavado de los rellenos de las juntas.	0,66	1-2,5
- Fluencia grande o presión alta; considerable lavado de los rellenos de las juntas.	0,33*	2,5-10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas al dar las pegas, decayendo con el tiempo.	0,1-0,2*	>10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0,05-0,1*	>10

Los valores presentados con el signo * son sólo valores estimativos. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar J_w .

Los problemas causados por la formación de hielo no se consideran.

https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I

J_w : índice de P de agua en discontinuidades

5 Joint Water Reduction Factor		J_w
A	Dry excavations or minor inflow (humid or a few drips)	1.0
B	Medium inflow, occasional outwash of joint fillings (many drips/"rain")	0.66
C	Jet inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5
D	Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	0.33
E	Exceptionally high inflow or water pressure decaying with time. Causes outwash of material and perhaps cave in	0.2-0.1
F	Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay. Causes outwash of material and perhaps cave in	0.1-0.05
Note: i) Factors C to F are crude estimates. Increase J_w if the rock is drained or grouting is carried out ii) Special problems caused by ice formation are not considered		

SRF: factor de reducción de esfuerzos

DESCRIPCIÓN			
1. Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma.	SRF		
A Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad).	10		
B Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación menor de 50 m).	5		
C Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación mayor de 50 m).	2,5		
D Varias zonas de fractura en roca competente (libre de arcilla), roca suelta alrededor (cualquier profundidad).	7,5		
E Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad de excavación menor de 50 m).	5		
F Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad mayor de 50 m).	2,5		
G Juntas abiertas sueltas, muy fracturadas, etc. (cualquier profundidad).	5		
2. Rocas competentes, problemas de tensiones en las rocas.	σ_c/σ_1	σ_3/σ_1	SRF
H Tensiones pequeñas cerca de la superficie.	>200	>13	2,5
J Tensiones medias.	200-10	13-0,66	1,0
K Tensiones altas, estructura muy compacta (normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales).	10-5	0,66-0,33	0,5-2,0
L Explosión de roca suave (roca masiva).	5-2,5	0,33-0,16	5-10
M Explosión de roca fuerte (roca masiva).	<2,5	<0,16	10-20
σ_c y σ_1 son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca; σ_1 es la tensión principal máxima que actúa sobre la roca.			
3. Roca fluente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.	SRF		
N Presión de flujo suave.	5-10		
O Presión de flujo intensa.	10-20		
4. Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.	SRF		
P Presión de expansión suave.	5-10		
R Presión de expansión intensa.	10-20		
- Observaciones al SRF:			
i Reducir los valores del SRF en un 25-50% si las zonas de rotura sólo influyen pero no intersectan a la excavación.			
ii En los casos en que la profundidad de la clave del túnel sea inferior a la anchura del mismo, se sugiere aumentar el SRF de 2,5 a 5 (ver H).			
iii Para campos de tensiones muy anisótropos (si se miden) cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reducir σ_c y σ_1 a $0,8 \sigma_c$ y $0,8 \sigma_1$; cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reducir σ_c y σ_1 a $0,2 \sigma_c$ y $0,6 \sigma_1$, donde σ_3 es la tensión principal mínima que actúa sobre la roca.			



6 Stress Reduction Factor			SRF	
a) Weak zones intersecting the underground opening which may cause loosening of rock mass				
A	Multiple occurrences of weak zones within a short section containing clay or chemically disintegrated, very loose surrounding rock (any depth), or long sections with incompetent (weak) rock (any depth). For squeezing, see 6L and 6M		10	
B	Multiple shear zones within a short section in competent clay-free rock with loose surrounding rock (any depth)		7.5	
C	Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth < 50m)		5	
D	Loose, open joints, heavily jointed or "sugar cube", etc. (any depth)		5	
E	Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth > 50m)		2.5	
Note: i) Reduce these values of SRF by 25-50% if the weak zones only influence but do not intersect the underground opening				
b) Competent, mainly massive rock, stress problems		σ_c/σ_1	σ_3/σ_c	SRF
F	Low stress, near surface, open joints	>200	<0.01	2.5
G	Medium stress, favourable stress condition	200-10	0.01-0.3	1
H	High stress, very tight structure. Usually favourable to stability. May also be unfavourable to stability dependent on the orientation of stresses compared to jointing/weakness planes*	10-5	0.3-0.8	0.5-2
J	Moderate spalling and/or slabbing after > 1 hour in massive rock	5-3	0.5-0.65	5-50
K	Spalling or rock burst after a few minutes in massive rock	3-2	0.65-1	50-200
L	Heavy rock burst and immediate dynamic deformation in massive rock	<2	>1	200-900
Note: i) For strongly anisotropic virgin stress field (if measured): when $3 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$ reduce σ_c to $0.75 \sigma_c$. When $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduce σ_c to $0.5 \sigma_c$, where σ_c = unconfined compression strength, σ_1 and σ_3 are the major and minor principal stresses, and σ_3 = maximum tangential stress (estimated from elastic theory) ii) When the depth of the crown below the surface is less than the span, suggest SRF increase from 2.5 to 5 for such cases (see F)				
c) Squeezing rock: plastic deformation in incompetent rock under the influence of high pressure		σ_c/σ_u	SRF	
M	Mild squeezing rock pressure	1-5	5-10	
N	Heavy squeezing rock pressure	>5	10-20	
Note: i) Determination of squeezing rock conditions must be made according to relevant literature (i.e. Singh et al., 1992 and Ghain and Grimstad, 1996)				
d) Swelling rock: chemical swelling activity depending on the presence of water			SRF	
O	Mild swelling rock pressure	5-10		
P	Heavy swelling rock pressure	10-15		

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente malo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy malo	$10^{-1} - 1$
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I

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

3- Índice RMR (Rock Mass Rating System, Bieniawski, 1976, 1989).

- Índice de calidad calculado como la suma del efecto de **6 parámetros**:
 1. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca matriz (0 a 15).
 2. RQD (3 a 20).
 3. Espaciado entre discontinuidades (5 a 20).
 4. Condición de las discontinuidades (0 a 30).
 5. Presencia de agua (0 a 15).
 6. Orientación de las discontinuidades (ángulo de inclinación) con respecto al eje de la excavación (0 a -12).
- Según el valor de cada parámetro se asigna un **valor de contribución al RMR** (en tablas).
- Suma de las contribuciones de todos los parámetros = RMR

Bieniawski, Z.T. (1976) Rock Mass Classification in Rock Engineering. In: Bieniawski, Z.T., Ed., Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 1, 97-106.

Bieniawski, Z.T. (1989) Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. Wiley, New York.

https://iem.ca/pdf/resources/Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications_%20A%20Complete%20Manual%20for%20Engineers%20and%20Geologists%20in%20Mining,%20Civil,%20and%20Petroleum%20Engineering.pdf

Para el mismo macizo rocoso del ítem 2, estimar el valor primario del RMR, es decir, sin considerar el parámetro relacionado con la orientación de las discontinuidades con respecto del eje de la excavación.

Parámetro	Descripción	Contribución al RMR
$\bar{\sigma}_{ci}$	215 MPa	12
RQD	80%	17
<i>Distancia promedio entre discontinuidades</i>	90 cm	15
<i>Condición de las discontinuidades</i>	Superficies onduladas y lisas. Separación < 7mm. Sin relleno. Paredes sin alterar, levemente manchadas.	10
J_w	Excavaciones secas.	15

RMR = 12+17+15+10+15

RMR = 69
Clase II
Bueno

Parámetro	Descripción	Contribución al RMR
$\bar{\sigma}_{ci}$	192 MPa	12
RQD	70%	13
<i>Distancia promedio entre discontinuidades</i>	52 cm	10
<i>Condición de las discontinuidades</i>	Superficies rugosas. Separación < 5mm. Relleno continuo de arcillas expansivas (espesor < 5 mm)	10
J_w	Excavaciones secas o de influjos reducidos (< 5l/min). En algunos sectores se observa humedad o goteos localizados. $\bar{P}_{agua} = 0,08$ MPa	10

RMR = 12+13+10+10+10

RMR = 55
Clase 3
Medio

Parámetro			Intervalo de valores						
1	Resistencia de la roca intacta (MPa)	Ensayo de carga puntual	>50	4,0-10	2,0-4,0	1,0-2,0	Para esta escala tan baja es preferible la prueba de compresión simple		
		Compresión Simple	>250	100-250	50-100	25-50	5,0-25	1,0-5	<1
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	
2	Porcentaje de RQD		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntuación		20	17	13	8	3		
3	Espaciamiento de las discontinuidades		>2m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Condición de las discontinuidades		Superficies muy rugosas. Sin continuidad. Sin separación. Paredes de roca inalterada	Superficie ligeramente rugosa. Separación <1 mm. Paredes de roca ligeramente alteradas	Superficie ligeramente rugosa. Separación <1 mm. Paredes de roca altamente alteradas	Superficies pulidas o hendiduras <5 mm o juntas abiertas de 1 a 5 mm. Juntas continuas	Juntas abiertas >5 mm. Juntas continuas.		
	Puntuación		30	25	20	10	0		
5	Condiciones de agua subterránea	Filtraciones por 10 m de longitud de túnel (l/m)	Ninguna	<10	10,0-25	25-125	>125		
		(Presión en discontinuidades)/es fuerza principal σ	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	Condiciones generales		Totalmente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		
6	Orientación de las discontinuidades respecto a la excavación		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable		
	Puntuación		0	-2	-5	-10	-12		

Parámetros de clasificación y valores para RMR (Arvizu Lara & Dávila Serrano (2014), Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, (2004) Hoek & Brown (1980), en Jiménez López (2020): <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/17315/Material%20did%C3%A1ctico.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

RUMBO PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL				RUMBO PARALELO AL EJE DEL TÚNEL		BUZAMIENTO 0°-20° (Independiente del rumbo)
DIRECCIÓN SEGÚN BUZAMIENTO		DIRECCIÓN CONTRA BUZAMIENTO				
Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable

ORIENTACION DEL RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	REGULAR	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORES	TUNELES Y MINAS	0	-2	-5	-10	-12
	CIMENTACIONES	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60

VALOR TOTAL DEL R.M.R	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
CLASE NUMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCION	MUY BUENO	BUENO	MEDIO	MALO	MUY MALO

Ramírez Oyanguren & Alejano Monge (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (I): https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I

PARAMETER		Range of values // RATINGS				For this low range: Use uniaxial				
1	Strength of intact rock material	Point-load strength or Uniaxial compr. strength	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa	
		RATING	15	12	7	4	2	1	0	
	2	Drill core quality, RQD	90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%			
		RATING	20	17	13	8	5			
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
		RATING	20	15	10	8	5			
4	Condition of discontinuities	Length, persistence	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
		Rating	6	4	2	1	0			
		Separation	none	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
		Rating	6	5	4	1	0			
		Roughness	very rough	rough	slightly rough	smooth	slickensided			
		Rating	6	5	3	1	0			
		Infilling (gouge)	none	Hard filling		Soft filling				
		Rating	6	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm	0		
Weathering	unweathered	slightly w.	moderately w.	highly w.	decomposed					
Rating	6	5	3	1	0					
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel	none	< 10 litres/min	10 - 25 litres/min	25-125 litres/min	> 125 litres /min			
		p_w / σ_1	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5			
		General conditions	completely dry	damp	wet	dripping	flowing			
		RATING	15	10	7	4	0			

p_w = joint water pressure; σ_1 = major principal stress

4- Índice GSI (Geological Strength Index, Marinos & Hoek, 2000; Hoek & Marinos, 2019).

- Índice de resistencia geológica.
- Caracterización visual detallada en campo a partir de afloramientos o testigos de sondeos.
- Estimación preliminar de la resistencia del MR.
- Parámetro de entrada: criterio de rotura de Hoek & Brown
- Parámetros para estimar GSI:
 - **Estructura del MR** ↔ tamaño y forma de bloques de roca intacta.
 - **Estado de las paredes de las discontinuidades** ↔ resistencia al corte.

Resistencia a la compresión simple ($\sigma_3=0$)

$$\sigma_1 = \sigma_{ci} \cdot S^a$$

Resistencia a la tracción ($\sigma_3=0$)

$$\sigma_{tmr} = -\frac{S \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

Criterio de rotura de Hoek & Brown para macizos rocosos

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

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







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

$$a \sim 0,5$$

INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)

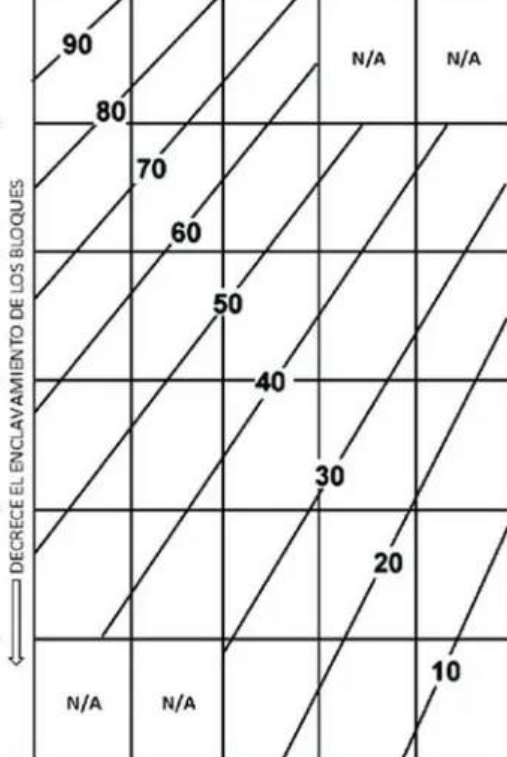
Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.

ESTRUCTURA

	INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas
	FRACTURADA Macizo rocoso con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de dicontinuidades
	MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrabados y angulares formados por la interseccion de 4 o mas sistemas
	FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la interseccion de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificacion
	DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados
	LAMINADA/FOLIADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistocidad y cizalla

CONDICIONES DE SUPERFICIE	MUY BUENA Superficie muy rugosas, no meteorizadas, frescas	BUENA Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	REGULAR Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	POBRE Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos compactos.	MUY POBRE Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos de arcillas suaves.
----------------------------------	--	---	---	--	---

DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →



Categorías MR en base a la estructura: desde intacto hasta desintegrado.

Condición de las superficies de las discontinuidades: desde muy buena (paredes rugosas y sanas) a muy mala (lisas y muy alteradas o con rellenos blandos).

Ramos, Camilo & Gil, Andres & Molina Escobar, Jorge. (2016). Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra. 32. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/rbct.n40.52199>

4.a) Estimar el rango de valor del índice GSI para un macizo rocoso formado por un gneis (roca competente), muy poco fracturado en algunos sectores. Presenta 2 familias de discontinuidades con un espaciado variable entre 2 y 3 m. Las superficies de la mayoría de las fracturas son rugosas y están levemente meteorizadas, algunas discontinuidades muestran superficies lisas y moderadamente alteradas.

Estructura ≈ intacto masivo.

Condición de discontinuidades: buena a media.







GSI: 80 – 70 **GSI ≈ 75**

4.b) Estimar el rango de valor del índice GSI para un macizo rocoso formado por un esquisto micáceo fuertemente fracturado. Las discontinuidades presentan superficies lisas con leve alteración (pátinas de óxidos).

Estructura ≈ formada por muchos bloques.

Condición de discontinuidades: media.

GSI: 40 – 50 **GSI ≈ 45**

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
 <p>INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.</p>	90	80	70	N/A	N/A
 <p>FORMADO POR BLOQUES Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.</p>					
 <p>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.</p>					
 <p>FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DISTORSIONADO Y BANDEADO Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.</p>					
 <p>DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.</p>					
 <p>LAMINADO Y CIZALLADO Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.</p>	N/A	N/A			10

ENCAJE DECRECIENTE ENTRE LOS TROZOS DE ROCA

CALIDAD DECRECIENTE DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES →

- 4.a)
- 4.b)

NOTAS SOBRE LAS CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES

MUY BUENA : superficies muy rugosas y sanas

BUENA : superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido

MEDIA : superficies lisas y moderadamente meteorizadas y alteradas

MALA : superficies con espejos de falla y altamente meteorizadas, con rellenos de fragmentos angulares o con recubrimientos compactos

MUY MALA : superficies con espejo de falla altamente meteorizadas con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas

5- Resistencia de macizos rocosos. Criterio de rotura de Hoek y Brown (1980, 2019)

- Estimación de la resistencia de macizos rocosos.
- Criterio empírico → estimar la rotura de un medio rocoso a partir de características geotécnicas y geológicas.
- Relación entre σ_1 y σ_3 al momento de la rotura.
- σ_{ci} : resistencia a la compresión simple de la roca intacta.
- m, s, a : constantes que dependen de las características del material.

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(s - m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$$

Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. London Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.

P. Marinos, E. Hoek. (2000). GSI – a geologically friendly tool for rock mass strength. Proceedings GeoEng 2000, International conference on geotechnical and geological engineering, Technomic Publishing Co., Melbourne, Australia, Lancaster, PA (2000), pp. 1422-1440: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>

E. Hoek, E.T. Brown (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, 2019, p: 445-463: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

Parámetros de Hoek-Brown calibrados para roca matriz (σ_{ci} , m_i , s , a)

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(s - m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$$

σ_{ci} : resistencia a la compresión simple de la roca. Ensayos de laboratorio sobre muestras de roca sin fracturas o, en su defecto, de tablas.

s , a , m_i : constantes características de la roca.

s : a partir de ensayos de resistencia a compresión simple ($\sigma_3 = 0$): $\sigma_1 = -\sigma_{ci}$

$$-\sigma_{ci} = 0 - \sigma_{ci} \left(s - m_i \frac{0}{\sigma_{ci}} \right)^a \rightarrow s = 1$$

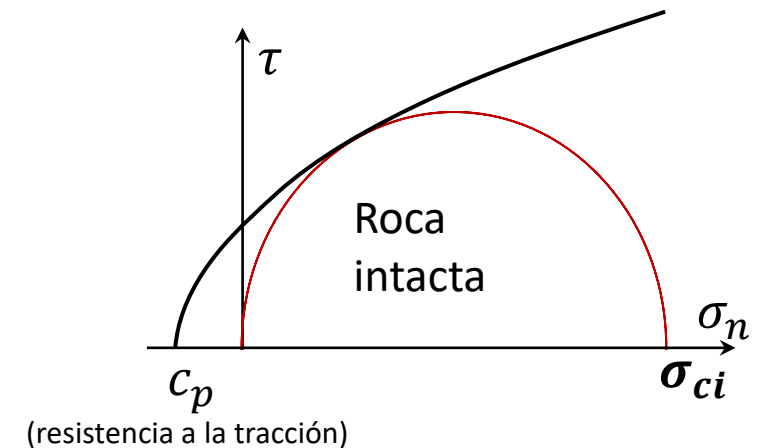
m_i : Ensayos de resistencia a tracción triaxial ($\sigma_1 = \sigma_3 = c_p$).

Tablas: rangos de magnitud de m_i para diferentes rocas.

$$c_p = c_p - \sigma_{ci} \left(1 - m_i \frac{c_p}{\sigma_{ci}} \right)^a \rightarrow m_i = \frac{\sigma_{ci}}{c_p}$$

c_p : resistencia de la roca intacta a la tracción.

$a = 0,5$ para rocas (valor empírico: 0,48-0,52)



Parámetros de Hoek-Brown (2002) calibrados para macizos rocosos (m_b , GSI , D)

Escala de la roca \rightarrow escala de macizo rocoso: **variaciones en los parámetros m y s .**

Resistencia a la compresión simple del MR ($\sigma_3=0$) $\rightarrow \sigma_1 = \sigma_{ci} \cdot s^a$

m_b depende de:

- Resistencia de la roca $\leftrightarrow m_i$
- Características de las discontinuidades: índice GSI (observaciones en campo) y factor D .

GSI: índice de resistencia geológica.

D: factor de alteración asociado al grado de perturbación del MR por efecto de excavación y relajación de tensiones.

$s \leq 1 \leftrightarrow$ valor máximo GSI es 100 $\rightarrow s = e^0 = 1$

$a = 0,5$

σ_{ci} : se determina sobre muestras inalteradas de roca intacta.

Resistencia a la tracción del macizo rocoso ($\sigma_3=0$) $\rightarrow \sigma_{tmr} = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$

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

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

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

$$a \approx 0,5$$

D: Factor de alteración

- Depende del grado de perturbación del MR por efecto de la excavación y relajación de tensiones.
- Se aplica sólo a la zona dañada por la excavación.
- Se estima por observación *in situ* → valor determinado por tablas.
- Varía de 0 para macizos rocosos poco o nada perturbados a 1 para macizos muy alterados

Indice GSI: Índice de resistencia geológica.

- Estimación preliminar de las propiedades geomecánica de MR.
- Caracterización visual detallada en campo a partir de afloramientos o testigos de sondeos.
- Parámetros para estimar GSI:
 - Estructura del MR ↔ tamaño y forma de bloques de roca intacta.
 - Estado de las paredes de las discontinuidades ↔ resistencia al corte.

Macizos rocosos distintos pueden tener el mismo GSI y resistencias distintas.

5.1.a) Estimar la resistencia a la compresión simple (σ_{cmr}) y a la tracción (σ_{tmr}) del macizo rocoso para el cual se estimó el índice GSI en el ítem 4.a. Estimar para un afloramiento y un sector perturbado por una excavación superficial.

Datos:

Resistencia a la compresión simple de la roca, $\sigma_{ci} = 110 \text{ MPa}$

$m_i = 17,7$ $a = 0,5$

GSI: estimado en el ítem 4.a

Para el área afectada por la excavación se estimó un factor $D = 0,7$

Afloramiento:

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

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad s = e^{\frac{75-100}{9}} \quad s = 0,06$$

$$\sigma_{cmr} = 110 \text{ MPa} \cdot 0,06^{0,5} \quad \sigma_{cmr} = \mathbf{27 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28}} \quad m_b = 17,7 \cdot e^{\frac{75-100}{28}} \quad m_b = 7,25$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{0,06 \cdot 110 \text{ MPa}}{7,25} \quad \sigma_{tmr} = \mathbf{-0,91 \text{ MPa}}$$

Excavación:

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

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad s = e^{\frac{75-100}{9-3 \cdot 0,7}} \quad s = 0,027$$

$$\sigma_{cmr} = 110 \text{ MPa} \cdot 0,027^{0,5} \quad \sigma_{cmr} = \mathbf{18 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}} \quad m_b = m_i e^{\frac{75-100}{28-14 \cdot 0,7}} \quad m_b = 4,48$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{0,027 \cdot 110 \text{ MPa}}{4,48} \quad \sigma_{tmr} = \mathbf{-0,66 \text{ MPa}}$$

5.1.b) Estimar la resistencia a la compresión simple (σ_{cmr}) y a la tracción (σ_{tmr}) del macizo rocoso para el cual se estimó el índice GSI en el ítem 4.b. Hacerlo para una zona de afloramiento y para un sector perturbado por una excavación superficial.

Datos: $\sigma_{ci} = 30 \text{ MPa}$; $m_i = 15,6$; GSI: estimado en el ítem 4.b; $a = 0,5$. Area afectada por la excavación $D = 0,5$

Afloramiento:

$$\sigma_{cmr} = \sigma_{ci} \cdot S^a$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9}} \quad s = e^{\frac{45-100}{9}} \quad s = 0,002$$

$$\sigma_{cmr} = 30 \text{ MPa} \cdot 0,002^{0.5} \quad \sigma_{cmr} = \mathbf{1,34 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{S \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28}} \quad m_b = 15,6 \cdot e^{\frac{45-100}{28}} \quad m_b = 2,2$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{0,002 \cdot 30 \text{ MPa}}{2,2} \quad \sigma_{tmr} = \mathbf{-0,03 \text{ MPa}}$$

Excavación:

$$\sigma_{cmr} = \sigma_{ci} \cdot S^a$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad s = e^{\frac{45-100}{9-3 \cdot 0,5}} \quad s = 6,5 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma_{cmr} = 30 \text{ MPa} \cdot (6,5 \cdot 10^{-4})^{0.5} \quad \sigma_{cmr} = \mathbf{0,76 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{S \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}} \quad m_b = m_i e^{\frac{55-100}{28-14 \cdot 0,5}} \quad m_b = 1,14$$

$$\sigma_{tmr} = -\frac{6,5 \cdot 10^{-4} \cdot 30 \text{ MPa}}{1,14} \quad \sigma_{tmr} = \mathbf{-0,017 \text{ MPa}}$$

6- Cuestionario.

6.1) ¿Qué información da el índice RQD? ¿Cuál es su principal función?

6.2) ¿Por qué es importante el estudio de los macizos rocosos?

6.3) ¿Qué elementos conforman un macizo rocoso? ¿Cómo influye esto en sus propiedades mecánicas?

6.4) ¿A partir de qué parámetros pueden estimarse la resistencia y deformación de los macizos rocosos?

6.5) ¿Cuál es la utilidad del criterio de rotura Hoek y Brown en la caracterización geomecánica de macizos rocosos?

6.6) ¿A qué hacen referencia los parámetros GSI y D de Hoek y Brown?

6.7) ¿Cómo se estima el GSI y cuál es su función principal?

6.8) ¿Cuál es la aplicación de los sistemas de clasificación de macizos rocosos (ej.: RMR, GSI, Q)?

6.9) ¿Qué representan cada uno de los 3 cocientes del índice Q?

$$\frac{RQD}{J_n}$$

$$\frac{J_r}{J_a}$$

$$\frac{J_w}{SRF}$$

6.10) Los índices Q y RMR, además de estimar la calidad del macizo rocoso ¿qué otra aplicación tienen?