

Mecánica de suelos y geología (84.07)-M2

Clasificación de macizos rocosos. Guía de ejercicios.

1- Índice RQD (Rock Quality Designation, Deere, 1967¹, 1989²)

1.a) ¿Qué información da el índice RQD?

1.b) ¿Cuál es la principal función de este índice?

1.c) 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:

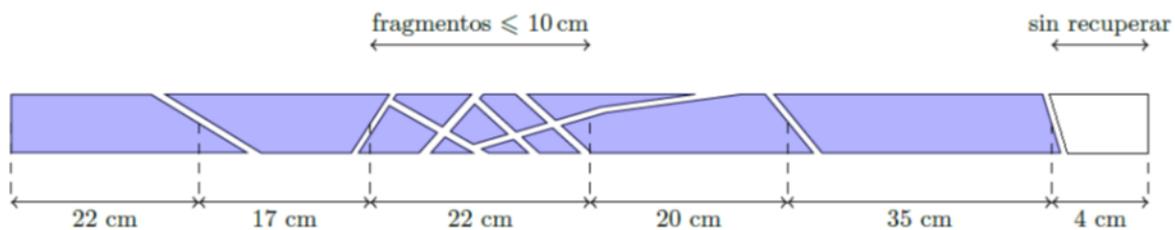


Figura 1.1

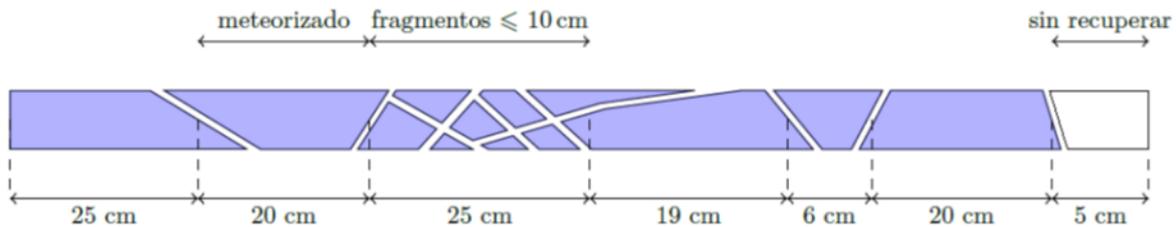


Figura 1.2

<https://claudiovz.github.io>

$$R(\%) = \frac{\sum L_R}{L_C}$$

$$RQD = \frac{\sum_{L > 10cm} L_{RQD}}{L_C}$$

R: recuperación porcentual del testigo.

L_R : longitud de todos los fragmentos de roca intacta recuperados.

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

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

¹ 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>

² 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/>

2- Índice Q (Rock Tunnelling Quality Index, Barton, Lien y Lunde, 1974³; NGI, 2022⁴)

2.a) Clasificar el macizo rocoso X, en cual se excavará un túnel, usando el índice Q. A partir de los siguientes datos obtenidos en la campaña de exploración geotécnica (Tabla 2.1) asignar el valor correspondiente a cada parámetro y calcular Q:

Parámetro	Descripción	Valores asignados (Consultar tablas en Anexo 1)
RQD	80%	
J_n	2 familias de diaclasas.	
J_r	Diaclasas con desplazamiento cortante menor a 3 cm. Superficies onduladas y lisas.	
J_a	Paredes inalteradas, levemente manchadas. $\Phi_r \approx 25^\circ-35^\circ$.	
J_w	Excavaciones secas.	
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.b) determinar el índice Q para otro sector del macizo rocoso X, en el que se obtuvieron los siguientes datos:

Parámetro	Descripción	Valores asignados (Consultar tablas en Anexo 1)
RQD	75%	
J_n	2 familias de diaclasas.	
J_r	Diaclasas con desplazamiento cortante menor a 3 cm. Superficies rugosas.	
J_a	Relleno continuo de arcillas expansivas, espesor < 5 mm. $\Phi_r \approx 12^\circ-16^\circ$.	
J_w	Excavaciones secas o de influjo reducido (< 5 l/min). Humedad o goteos localizados en algunos sectores. $\bar{P}_{\text{agua}} = 0,08 \text{ MPa}$	
SRF	Zonas débiles que pueden causar caída de bloques durante el avance de la excavación. Sólo una zona fracturada en roca competente, con relleno de arcilla, sin alteración química. Profundidad > 50m.	

³ Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, 6, 189-236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>

⁴ 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

3- Índice RMR (Rock Mass Rating System, Bieniawski, 1976⁵, 1989⁶).

3.a) 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.

3.a.1)

Parámetro	Descripción	Contribución al RMR (Consultar tabla en Anexo 2)
$\bar{\sigma}_{ci}$	215 MPa	
RQD	80%	
Distancia promedio entre discontinuidades	90 cm	
Condición de las discontinuidades	Superficies onduladas y lisas. Separación < 7mm. Sin relleno. Paredes sin alterar, levemente manchadas.	
J_w	Excavaciones secas.	

3.a.2)

Parámetro	Descripción	Contribución al RMR (Consultar tabla en Anexo 2)
$\bar{\sigma}_{ci}$	192 MPa	
RQD	70%	
Distancia promedio entre discontinuidades	52 cm	
Condición de las discontinuidades	Superficies rugosas. Separación < 5mm. Relleno continuo de arcillas expansivas (espesor < 5mm).	
J_w	Excavaciones secas o de influjo reducido (< 5 l/min). Humedad o goteos localizados en algunos sectores. $\bar{P}_{agua} = 0,08$ MPa.	

⁵ 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.

⁶ 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>

3.b) Calcular el índice RMR para los sectores A y B de una cantera en la que se extraen andesitas para áridos.

Sector A

Parámetro	Descripción	Contribución al RMR (Consultar tabla en Anexo 2)
$\bar{\sigma}_{ci}$	174 MPa	
RQD	30%	
<i>Distancia promedio entre discontinuidades</i>	15 cm	
<i>Condición de las discontinuidades</i>	Superficies lisas. Separación: 1 a 5mm. Sin alteración.	
J_w	Húmedo	

Sector B

Parámetro	Descripción	Contribución al RMR (Consultar tabla en Anexo 2)
$\bar{\sigma}_{ci}$	208 MPa	
RQD	95%	
<i>Distancia promedio entre discontinuidades</i>	30 cm	
<i>Condición de las discontinuidades</i>	Superficies rugosas. Separación: 0,2 a 1mm. Presentan alteración arcillosa.	
J_w	Húmedo	

4- Índice GSI (Geological Strength Index, Marinós & Hoek, 2000⁷; Hoek & Marinós, 2019⁸).

4.a) Estimar el rango de valor del índice GSI (consultar tabla en Anexo 3) 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.

4.b) Estimar el rango de valor del índice GSI (consultar tabla en Anexo 3) para un macizo rocoso formado por un esquistó micáceo fuertemente fracturado. Las discontinuidades presentan superficies lisas con leve alteración (pátinas de óxidos).

5- Resistencia de macizos rocosos.

5.1- Criterio de rotura de Hoek y Brown (1980⁹, 2019⁸)

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. Estimarlos en un afloramiento y en un sector perturbado por una excavación superficial. Consultar fórmulas en Anexo 4.

Datos:

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

$m_i = 17,7$

GSI: estimado en el ítem 4.a

$a = 0,5$

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

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. Consultar fórmulas en Anexo 4.

Datos:

Resistencia a la compresión simple de la roca, $\sigma_{ci} = 30$ MPa

$m_i = 15,6$

GSI: estimado en el ítem 4.b

$a = 0,5$

Para el área afectada por la excavación se estimó un factor $D = 0,5$

⁷ P. Marinós, 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.rocksolid.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>

⁸ E. Hoek, E.T. Brown (2018). 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>

⁹ Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. London Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.

Anexo 1

Fórmula y tablas para estimar el índice Q.

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

J_n : índice de familias de discontinuidades

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

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

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

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

NOTA: Si el espaciado de la familia de juntas es mayor de 3 m hay que aumentar el J_r en una unidad.
Para juntas planas con espejo de falla provisto de lineaciones, si éstas están orientadas en la dirección de mínima resistencia, se puede usar $J_r=0,5$

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

J_r : índice de rugosidad de las discontinuidades

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 "

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_t / 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_t 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 fluyente, 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_t a $0,8 \sigma_c$ y $0,8 \sigma_t$; cuando $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reducir σ_c y σ_t a $0,2 \sigma_c$ y $0,6 \sigma_t$, donde σ_3 es la tensión principal mínima que actúa sobre la roca.			

J_w : índice de P de agua en discontinuidades.

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

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

Anexo 2

Tablas para estimar el índice RMR.

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		

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

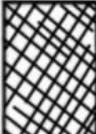
Ramírez Oyanguren & Alejano Monge (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (I): https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I

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

Anexo 3

Tabla para estimar el índice GSI.

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
CALIDAD DECRECIENTE DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES →					
 <p>INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.</p>	90			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>	80	70			
 <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>		60	50		
 <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>			40	30	
 <p>DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.</p>				20	
 <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 ⇓

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

Modificado de Hoek y Marinos 2000

Anexo 4

Resistencia de macizos rocosos. Criterio de rotura de Hoek y Brown.

a) Roca matriz:

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

σ_{ci} : resistencia a la compresión simple de la roca.

s, a, m_i : constantes geomecánicas 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 ($\sigma_1 = \sigma_3 = c_p$).

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

c_p : resistencia de la roca intacta a la tracción.

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

b) Macizo rocoso:

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

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

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

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

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

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