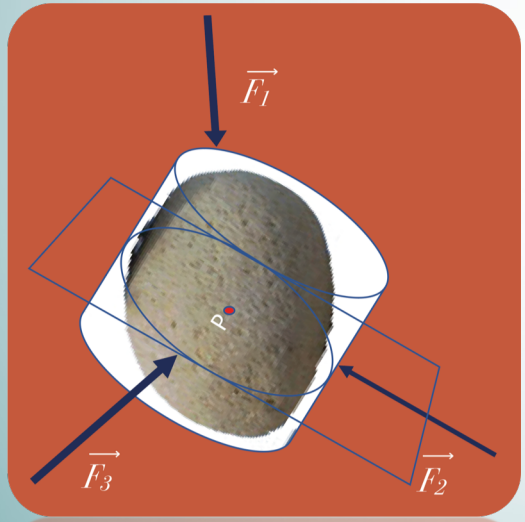
Caracterización geomecánica de suelos y rocas

Tema 6.2 Clasificaciones geomecánicas



Alberto González Díez

Patricio Martínez Cedrún

DPTO. DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA (CITIMAC)

Este tema se publica bajo Licencia:

Creative Commons BY-NC-SA 4.0

CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

- El macizo rocoso es un medio discontinuo, complejo, con un comportamiento geomecánico que debe ser considerado como un conjunto, y que puede ser estudiado y clasificado en función de su aptitud para distintas aplicaciones, a partir de observaciones realizadas en el campo y ensayos sencillos.

- Las clasificaciones geomecánicas permiten estimar la calidad del macizo rocoso y de sus parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de rozamiento interno), pero también aportan índices relacionados con el sostenimiento de túneles y taludes, excavabilidad, etc.

- La evaluación se obtiene a partir de la descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa, de las discontinuidades y de los parámetros globales del macizo rocoso.

CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

Clasificaciones geomecánicas	
Propiedades geomecánicas Subjetivas	• Terzaghi (1946) • Lauffer (1958)
Propiedades geomecánicas Objetivas	• R. Q. D. Rock Quality Designation (Deere 1963 – 1967) • Deere et al (1967) • R.S.R. Rock Structure Ratio (Wickham, Tiedemann and Skinner, 1972) • R. M. R. de Bieniawski (1973-1989) • Q (Barton, Lien y Lunde, 1974) • S. M. R. Slope Mass Rating (Romana, 1985-1996) • G.S.I. Geological Strength Index (Hoek, 1994, y Hoek et al. 1995)

Terzaghi, 1946

Se puede señalar que Terzaghi en 1946 fue el pionero en adoptar un sistema de clasificación (semi-cuantitativo) del macizo rocoso, con finalidades constructivas. En dicho sistema, se discutió la influencia de la geología en el diseño de túneles basándose en la clasificación descriptiva de las clases de roca. El objetivo de este sistema es estimar la carga de roca que deben soportar los arcos de acero instalados para soportar un túnel.

Si bien no fue el primer sistema de clasificación, sí el primero en lengua inglesa que integró la geología en el diseño del soporte del túnel.

Este sistema constituye la base para el desarrollo de los tres esquemas de clasificación de masas rocosas más comunes, es decir, Q, RMR y GSI.

El sistema clasifica el terreno en diez categorías y proporciona la "carga de roca" o tensión vertical que soportarían las cerchas de sostenimiento por procedimientos tradicionales.

Como principal crítica en lo referente al ámbito geomecánico se puede remarcar que el Sistema de clasificación no proporciona información cuantitativa sobre las propiedades del macizo rocoso como señala Cecil (1970).

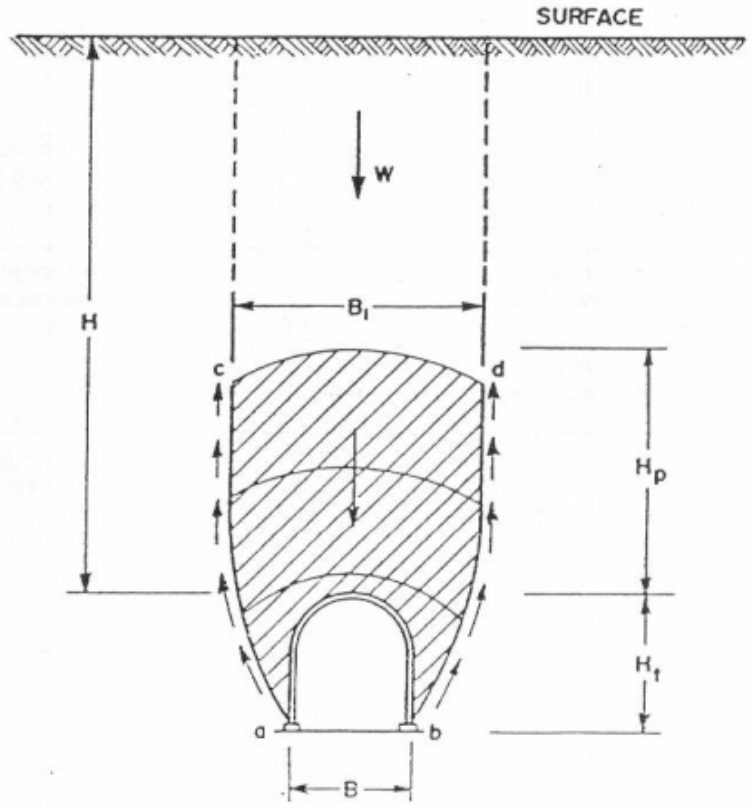
Clases de Terzaghi, 1946

Table 2. Rock class and rock load factor classification by Terzaghi for steel arch supported tunnels Terzaghi (1946)

Rock Class	Definition	Rock Load Factor Hp (in feet, B and Ht in feet)	Remark
I. Hard and intact	Hard and intact rock contains no joints and fractures. After excavation, the rock may have popping and spalling at excavated face.	0	Light lining required only if spalling or popping occurs.
II. Hard stratified and schistose	Hard rock consists of thick strata and layers. The interface between strata is cemented. Popping and spalling at the excavated face is common.	0 to 0.5 B	Light support for protection against spalling. Load may change between layers.
III. Massive, moderately jointed	Massive rock contains widely spaced joints and fractures. Block size is large. Joints are interlocked. Vertical walls do not require support. Spalling may occur.	0 to 0.25 B	Light support for protection against spalling.
IV. Moderately blocky and seamy	Rock contains moderately spaced joints. Rock is not chemically weathered and altered. Joints are not well interlocked and have small apertures. Vertical walls do not require support. Spalling may occur.	0.25 B to 0.35 (B + H_t)	No side pressure.
V. Very blocky and seamy	Rock is not chemically weathered and contains closely spaced joints. Joints have large apertures and appear separated. Vertical walls need support.	(0.35 to 1.1) (B + H_t)	Little or no side pressure.
VI. Completely crushed but chemically intact	Rock is not chemically weathered and highly fractured with small fragments. The fragments are loose and not interlocked. Excavation face in this material needs considerable support.	1.1 (B + H_t)	Considerable side pressure. Softening effects by water at tunnel base. Use circular ribs or support rib lower end.
VII. Squeezing rock at moderate depth	Rock slowly advances into the tunnel without a perceptible increase in volume. Moderate depth is considered as 150 ~ 1000 m.	(1.1 to 2.1) (B + H_t)	Heavy side pressure. Invert struts required. Circular ribs recommended.
VIII. Squeezing rock at great depth	Rock slowly advances into the tunnel without a perceptible increase in volume. Great depth is considered as more than 1000 m.	(2.1 to 4.5) (B + H_t)	
IX. Swelling rock	Rock volume expands (and advances into the tunnel) due to swelling of clay minerals in the rock at the presence of moisture.	up to 250 feet, irrespective of B and H_t	Circular ribs required. In extreme cases use yielding support.

Notes: The tunnel is assumed to be below the ground water table. For tunnel above water tunnel, Hp for Classes IV to VI reduces 50 %.
The tunnel is assumed excavated by blasting. For tunnel boring machine and road header excavated tunnel, Hp for Classes II to VI reduces 20 - 25 %.
Notations: B = tunnel span in meters, H_t = Height of the opening in meters, and H_p = Height of the loosened rock mass above tunnel crown developing load.

Terzaghi ideó la ecuación p = HpγH para obtener la presión de apoyo (p) a partir del factor de carga de la roca (Hp), donde γ es el peso unitario de la masa rocosa, H es la profundidad o el grosor del túnel de la sobrecarga (Terzaghi, 1946).



Tomado de
https://www.researchgate.net/publication/277504261_Rock_Mass_C
on_Systems/link/59fa38e2aca272026f6f0fbc/download

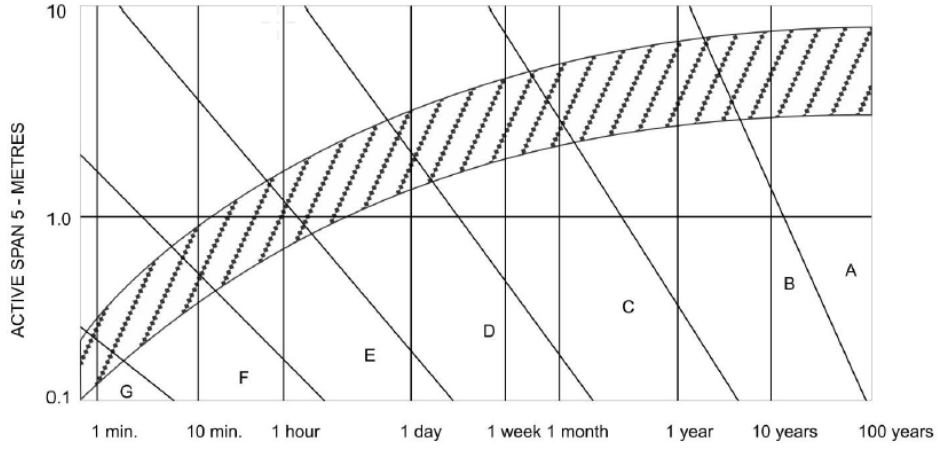
Lauffer, 1950

Aplicada nuevamente a un sistema de construcción de túneles por método austriaco

La roca se clasifica a partir de la experiencia previa ante túneles o datos de la propia excavación. Por lo que este sistema tampoco emplea datos geológicos o geotécnicos.

La masa rocosa se clasifica en clases que van de la A a la G sobre la base de la relación entre el tiempo de permanencia en pie y la duración sin apoyo; de tal manera que la clase A representa una roca muy buena y la clase G significa muy pobre

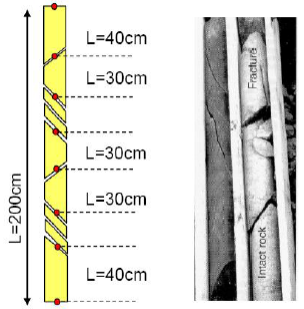
Esta clasificación no cubre los derrumbes, los desbastes, las rupturas de roca o el fallo de las cuñas en un túnel. Muchos autores, en particular (Pacher et al., 1974), han modificado la clasificación original de Lauffer y ahora forma parte del enfoque de la excavación de túneles genéricos llamado NATM (Nuevo Método Austríaco de Construcción de Túneles) (Hoek. 2007).



Relaciones entre la expansion active de la roca, el tiempo de sostenimiento del túnel y las clases de macizo rocoso (Lauffer, 1958). Tomado de https://www.researchgate.net/publication/277504261_Rock_Mass_Classification_Systems/link/59fa38e2aca272026f6f0fbc/download

R. Q. D. Rock Quality Designation (Deere 1963 – 1967)

Deer en 1964 propuso una primera clasificación de la calidad del macizo rocoso a partir de los efectos que las discontinuidades ocasionan sobre la matriz rocosa.
La clasificación es simple empleando 5 categorías. La RQD no refleja plenamente la calidad de la masa rocosa ya que sólo considera la extensión de la fractura de la masa rocosa y no tiene en cuenta la fuerza de la roca o las propiedades mecánicas y otras propiedades geométricas de las uniones. Como depende de la orientación de la línea de muestreo en relación con la distribución de la orientación preferencial de las discontinuidades, no dan una estimación fiable del grado de unión de la masa rocosa. Además, no puede dar cuenta de la longitud de las juntas consideradas. Otra limitación es que es insensible cuando la frecuencia total es superior a 3m-1 o cuando la masa rocosa está moderadamente fracturada (Palmstrom y Broch, 2006).

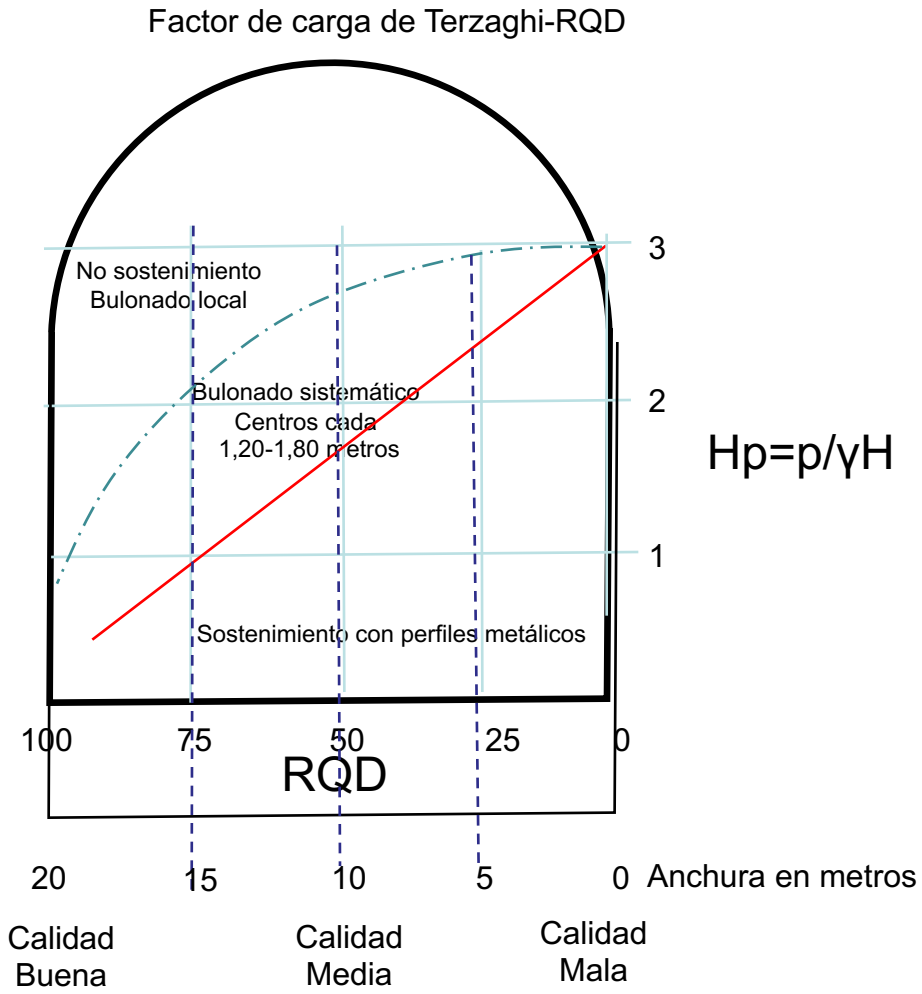


$$RQD = \frac{\sum \text{length of core pieces} > 10\text{cm}}{\text{total length of the core}} \times 100\%$$

$$RQD = \frac{40+30+30+30+40}{200} \times 100 = 85\%$$

Figure 2. Procedure for measurement and calculation of RQD (After Deere, 1967)

La definición de RQD, la clasificación de la roca, la relación entre el "Factor de Carga" de Terzaghi y RQD (propuesta por Cording et al, 1972) y la propuesta de Merrit (1972) para decidir el tipo de sostenimiento en función del RQD aparecen en la figura adjunta.



$Hp = p/\gamma H$

Relación factor de carga de Terzaghi (Hp) y RQD, así como RQD, Luz túnel y tipo de sostenimiento

La **clasificación geomecánica RMR**

1936-2018†
Imagen tomada de
http://www.semr.es/fallece-el-profesor-bieniawski/

La clasificación geomecánica RMR, también conocida como clasificación geomecánica de Bieniawski, fue presentada por el Ingeniero Bieniawski en 1973 y modificada sucesivamente en 1976, 1979, 1984 y 1989. Permite hacer una clasificación de las rocas 'in situ' y estimar el tiempo de mantenimiento y longitud de un vano. Se utiliza usualmente en la construcción de túneles, de taludes y de cimentaciones. Consta de un índice de calidad RMR (Rock Mass Ratting), independiente de la estructura, y de un factor de corrección.

Tomado de
http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_geomec%C3%A1nica_de_Bienawiski_o_RMR

Parámetros considerados

(1)	Resistencia del material intacto (ensayo carga puntual o compresión simple)	valor máximo = 15
(2)	R.Q.D.	valor máximo = 20
(3)	Distancia entre las discontinuidades	valor máximo = 20
(4)	Condición de las discontinuidades	valor máximo = 30
(5)	Agua subterránea	valor máximo = 15

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Parámetros de la **RMR**

1) Resistencia uniaxial de la matriz rocosa: ensayo PLT, ensayo de compresión simple.

2) Grado de fracturación del macizo: ensayo RQD.

3) Espaciado de las discontinuidades: separación entre diaclasas (m).

4) Condiciones de las discontinuidades: rugosidad, continuidad, relleno, bordes.

5) Condiciones hidrogeológicas: caudal, presión de agua, humedad.

Al resultado de cada uno de los parámetros se le asigna, según las tablas, un valor y se suman todos ellos para obtener el índice de calidad RMR sin correcciones. A este valor se le debe restar un factor de ajuste en función de la orientación de las discontinuidades.

Rango de la **RMR**

Las puntuaciones de la clasificación de RMR oscilan entre 0 y 100

Clase	Calidad de roca	RMR
I	muy	81 - 100
II	buena	61 - 80
III	buena	41 - 60
IV	regular	21 -40
V	mala	O – 20
	muy mala	

Relación entre RMR y propiedades geomecánicas

Clase	Calidad	RMR	Cohesión kPa	Angulo de fricción en grados °
I	Muy buena	81 - 100	> 400	> 45
II	Buena	61 - 80	300 -400	35 -45
III	Regular	41 - 60	200 - 300	25 - 35
IV	Mala	21 - 40	100 -200	15 – 25
V	Muy mala	0 - 20	< 100	< 15

Parámetros de Clasificación

1	Resistencia de la roca sana	Ensayo de carga puntual	> 100 Kp/cm^2	40 - 80 Kp/cm^2	20 - 40 Kp/cm^2	10 - 20 Kp/cm^2	Compresión simple (Kp/cm^2)		
		C. Simple	> 2.500 Kp/cm^2	1.000-2.500 Kp/cm^2	500-1.000 Kp/cm^2	250-500 Kp/cm^2	50-250	10 - 50	< 10
	Valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Valoración		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de las diaclasas		Muy rugosas Discontinuas Sin separaciones Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Abertura <1 mm Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 mm Bordes blandos	Espejos de falla o con relleno <5 mm o abiertas 1-5 mm Diaclasas continuas	Relleno blando > 5 mm o abertura > 5 mm Diaclasas continuas		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min.	10-25 litros/min.	25-125 litros/min	> 125 litros/min.		
		Relación Presión agua-Tensión princ. mayor	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Factores de corrección de la RMR

El factor de corrección, definido cualitativamente, depende de la orientación de las discontinuidades y tiene valores distintos según se aplique a túneles, cimentaciones o taludes.

El índice de RMR se obtiene de restar a los valores obtenidos el factor de ajuste. Este índice puede variar entre 0 y 100 y define cinco clases de roca designadas con números romanos que se corresponden con cinco calidades del macizo rocoso: muy buena, buena, media, mala y muy mala.

La principal ventaja de este método de clasificación es su sencillez y economía.

- Corrección por la orientación de las diaclasas:

Dirección y Buzamiento		Muy Favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy Desfavorables
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

-Orientación de las discontinuidades respecto a la excavación:

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Valoración	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

RM R (Bieniawski 1989)

Categorías de la clasificación

R.M.R. Suma de las puntuaciones obtenidas en las tablas anteriores	Descripción del macizo rocoso	Clase
81-100	Muy bueno	1
61 - 80	Bueno	11
41 - 60	Medio	111
21 - 40	Malo	IV
0 - 20	Muy malo	V

Características resistentes del macizo rocoso

Clase (R.M.R.)	c [Kpa]	ϕ º	túneles sin soporte
I (81 - 100)	> 400	> 45	20 años, luz de 15m
II (61 - 80)	300 - 400	35 - 45	1 año, luz de 10m
III (41 - 60)	200 - 300	25 - 35	1 semana, luz 5 m
IV (21 - 40)	100 - 200	15 - 25	10 horas, luz 2,50 m
V (0 - 20)	< 100	< 15	30 minutos, luz 1m

Correlaciones con índices Geomecánicos

El RMR está correlacionado empíricamente con el módulo de Young de la roca: (para RMR>50)

$$\mathbb{E} = 2x\ RMR - 100GPa$$

$$\mathbb{E} = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$$

Q de Barton (rock mass quality)

La Q de Barton considera los siguientes parámetros:(oscila entre 0.001 y 1000)

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

donde:

RQD	Índice de calidad de la roca
J_n	número de familias
J_r	coeficiente de rugosidad de la junta
J_a	coeficiente de alteración de la junta
J_w	coeficiente reductor por la presencia de agua
SRF	factor asociado al estado tensional (zonas de corte, fluencia, expansividad, tensiones “in situ”)
J_n, J_r, J_a,	se aplican a las juntas que son estructuralmente más desfavorables.

Q valoración	Q puntuación
excepcionalmente mala	0.001 - 0.01
extremadamente mala muy mala	0.01 - 0.1
mala regular buena	0.1 - 1.0
muy buena	1.0 - 4
extremadamente buena	4 - 10
excepcionalmente buena	10 - 40
	40 - 100
	100 - 400
	400 - 1000

Cómo se estiman los valores de los parámetros de la Q de Barton I

J_0 **número de familias**	**Valor**
Roca masiva	0.5 - 1
Una familia de juntas	2
Una familia de juntas con otras juntas ocasionales	3
Dos familias de juntas	4
Dos familias de juntas con otras juntas ocasionales	6
Tres familias de juntas	9
Tres familias de juntas con otras juntas ocasionales	12
Cuatro o más familias, Roca muy fracturada	15
Roca triturada	20
J_r coeficiente de ru osidad de la junta	
Juntas (contacto entre las dos caras)	
Discontinuas	4
Onduladas, rugosas	3
Onduladas, lisas	2
Onduladas, perfectamente lisas	1.5
Planas, rugosas o irregulares	1.5
Planas, lisas	1
Planas y perfectamente lisas	0.5
Juntas rellenas (relleno impide contacto entre las dos caras)	
material arcilloso	1
Material arenoso, de grava o triturado	1

Cómo se estiman los valores de los parámetros de la Q de Barton II

Ja coeficiente de alteración de la junta	**Valor**
Juntas (sin minerales de relleno intermedios)	
Juntas de paredes sanas	0.75 - 1
Ligera alteración	2
Alteraciones arcillosas	4
Juntas (minerales de relleno en pequeño espesor)	
Con partículas arenosas	4
Con minerales arcillosos no blandos	6
Con minerales arcillosos blandos	8
Con minerales arcillosos expansivos	8 - 12
Juntas (minerales de relleno en gran espesor)	
Con roca triturada/desintegrada y arcilla	6 - 12
Con zonas de arcilla limosa o arenosa	5
Con zonas de arcillosos (espesor grueso)	10 - 20

Cómo se estiman los valores de los parámetros de la Q de Barton III

J_w **Coeficiente reductor por la presencia de agua**	**Valor**
Excavaciones secas o con presencia de caudales <5 l/min en posiciones localizadas	1
Afluencia media con lavado de algunas juntas	0.66
Afluencia importante por juntas limpias	0.5
Afluencia importante por juntas limpias con lavado de juntas	0.33
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo	0.2 - 0.1
Afluencia excepcional inicial, mantenida	0.1 - 0.05

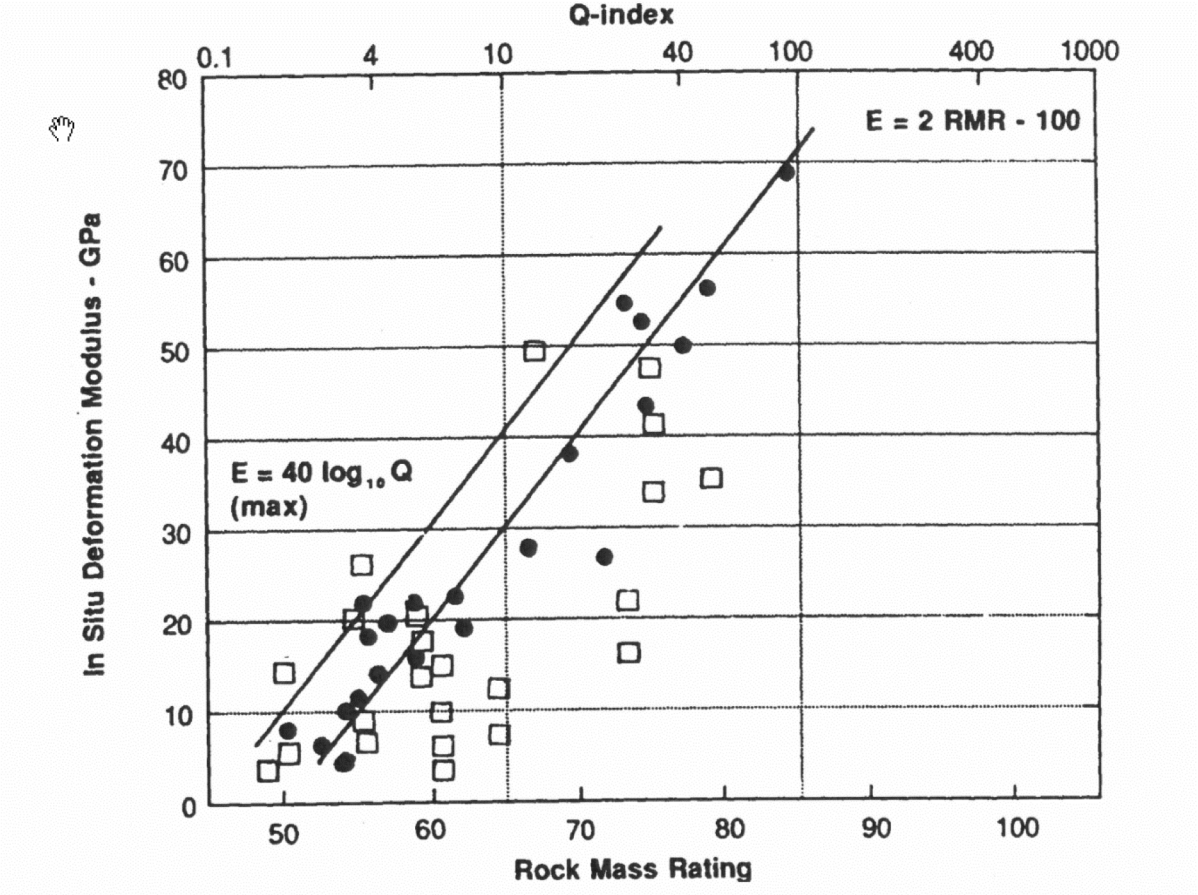
Cómo se estiman los valores de los parámetros de la Q de Barton IV

SRF	Valor
Zonas débiles intersectan a la excavación:	
Multitud de zonas débiles o milonitos	10
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta con cobertura ≤ 50 m	5
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta con cobertura > 50 m	2.5
Abundantes zonas débiles en roca competente	7.5
Zonas débiles aisladas en roca competente con cobertura ≤ 50 m	5
Zonas débiles aisladas en roca competente con cobertura > 50 m	2.5
Roca competente (problemas tensionales en las rocas)	
Pequeña cobertura	2.5
Cobertura media	1
Gran cobertura	0.5 -2
Rocas deformables (flujo plástico de roca)	
Con bajas presiones	5 - 10
Con altas presiones	10 - 20
Rocas expansivas	
Con presión de hinchamiento moderada	5 - 10
Con presión de hinchamiento alta	10 - 15

Correlacion entre el RMR y la Q de Barton

$RMR = 9 \ln Q + 44$ Bieniawski (1976)

$RMR = 13.5 \log Q + 43$ Rutledge (1978)



SMR (Slope Mass Rating)

Un índice muy interesante para el estudio de taludes es el propuesto por Romana en 1985, denominado Slope Mass Rating. Este índice fue propuesto inicialmente en 1985 y ha sufrido, como todos los presentados en esta recopilación, varias adaptaciones y mejoras posteriores (1993, 1995).

Nace como una adaptación al RMR de Bieniawski, adaptándolo para taludes, e introduciendo un factor corrector de naturaleza empírica, sobre la base de una muestra de más de 90 taludes, obteniendose una buena concordancia entre la estabilidad real que presentaban y la predicha por el SMR.

Los autores proponen un ajuste del papel de la geometría de la junta en la resistencia de taludes

Los resultados muestran que los valores obtenidos mediante la clasificación resultan ligeramente pesimistas en la estimación del estado futuro, pero muestran una muy buen coincidencia entre los métodos de protección/sostenimiento sugeridos y los aplicados en la realidad (Romana et al., 2001).

Índice SMR (Slope Mass Rating)

Un índice muy interesante para el estudio de taludes es el propuesto por Romana en 1985, denominado Slope Mass Rating. Este índice fue propuesto inicialmente en 1985 y ha sufrido, como todos los presentados en esta recopilación, varias adaptaciones y mejoras posteriores (1993, 1995).

El SMR se aplica a taludes y se obtiene del índice RMR básico sumando un valor que es función de la orientación de las discontinuidades (juntas) y, además, de otro nuevo "factor de excavación" que depende del método de excavación empleado

$$SMR = RMR + Orientación\ de\ juntas + factor\ de\ excavación$$

$$Orientación\ de\ juntas = (F1 * F2 * F3)$$

$$factor\ de\ excavación = F4$$

$$SMR = RMR + (F1 * F2 * F3) + F4$$

VALORES DEL RMR (BIENIAWSKI, 1979)- Modificando parámetros								
PARÁMETROS		INTERVALO DE VALORES						
Resistencia de la roca intacta a Compresión Simple/MPa		>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
Valoración		15	12	7	4	2	1	0
RQD/ %		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
Valoración		20	17	13	8	3		
Separación entre juntas/mm		>2000	600-2000	200-600	60-200	<60		
Valoración		20	15	10	8	5		
Condición de las juntas		Muy rugosas No continuas Cerradas Bordes sanos y duros	Algo rugosas Separación < 1mm Bordes algo meteorizados	Algo rugosas Separación < 1mm Bordes muy meteorizados	Espejos de falla o Relleno < 5 mm o Separación 1-5 mm Continuas	Relleno blando > 5 mm o Separación >5 mm Continuas		
Valoración		30	25	20	10	0		
Flujo de agua en las juntas	Caudal (L/minutos) cada 10 m de túnel	No hay	<10	10-25	25-125	<125		
	Presión de agua/tensión principal mayor	0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5		
	Estado general	Secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Fluyendo		
Valoración		15	10	7	4	0		

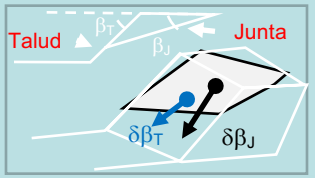
(ROMANA, 1996), comprobó que la relación entre los parámetros índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple es menor que 25; además no es constante, por lo que se suprime de la clasificación de Bieniawski original.

Factor de orientación de juntas F1

Factor F1. valora la relación existente entre el rumbo de la cara del talud y de las juntas. Varía entre 1,00 (cuando ambos rumbos son paralelos) 0,15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es mayor de 30º y por tanto la probabilidad de rotura es muy baja). Dichos valores están establecidos empíricamente, ajustándose a la expresión que se muestra abajo, donde β_j es el buzamiento de la junta y β_T el buzamiento del Talud.

FACTOR DE AJUSTE PARA LAS JUNTAS (ROMANA, 1985) . Donde: $\delta\beta_T$ dirección de buzamiento del talud; β_T buzamiento del talud; $\delta\beta_j$ dirección de buzamiento de las juntas B_J buzamiento de las juntas.

$$F1 = \left(1 - sen\left(\beta_j - \beta_T\right)\right)^2$$



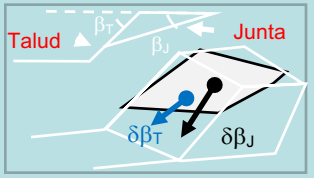
Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
Rotura plana	$\delta\beta_J$-$\delta\beta_T$	> 30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	< 5°
Rotura por vuelco	$\delta\beta_J$-$\delta\beta_T$-180°					
Valores F1		0,15	0,40	0,70	0,85	1,00

Factor de orientación de juntas F2

Factor F2. Depende del buzamiento de la junta en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta. Varia entre 1,00 (para juntas con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para juntas con buzamiento inferior a 20°); para roturas por vuelco vale 1,00. Dichos valores están establecidos empíricamente, ajustándose a la expresión que se muestra abajo, donde β_j es el buzamiento de la junta y β_T el buzamiento del Talud.

FACTOR DE AJUSTE PARA LAS JUNTAS (ROMANA, 1985) . Donde: $\delta\beta_T$ dirección de buzamiento del talud; β_T buzamiento del talud; $\delta\beta_j$ dirección de buzamiento de las juntas B_J buzamiento de las juntas.

$$F2 = tan^2\ \beta_j$$



Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
	β_J	< 20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	> 45°
Rotura plana	Valores F2	0.15	0,40	0,70	0,85	1,00
Rotura por vuelco	Valores F2	1	1	1	1	1

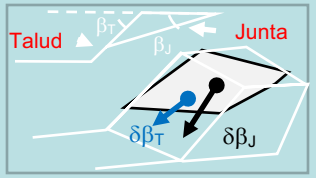
Factor de orientación de juntas F3

Factor F3. Muestra la relación entre los buzamientos de la junta y el talud. Se han mantenido los valores propuestos por BIENIAWSKI en 1976 que son siempre negativos, donde $\delta\beta_j$ es el valor de la dirección de buzamiento de la junta y $\delta\beta_T$ el valor de la dirección de buzamiento del Talud. En roturas planas, expresa la probabilidad de que las juntas afloren en el talud.

Se consideran condiciones "normales" cuando el buzamiento medio de la familia de juntas es igual al del talud, y por lo tanto aflorarán sobre la cara de éste pocas juntas.

Cuando el talud buza más que las juntas, casi todas afloran y las condiciones serán “muy desfavorables" lo que supone un valor de F3 de - 60 (para βs - βj > 10º), o "desfavorables" lo que supone un valor de F3 de - 50 (para 0 < βs - βj < 10). La diferencia con el valor de F3 "normal" (que es - 25) es muy grande.

FACTOR DE AJUSTE PARA LAS JUNTAS (ROMANA, 1985) . Donde: $\delta\beta_T$ dirección de buzamiento del talud; β_T buzamiento del talud; $\delta\beta_j$ dirección de buzamiento de las juntas B_J buzamiento de las juntas.



Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
Rotura plana	β_J-β_T	10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	< -10°
Rotura por vuelco	β_J+β_T	< 110°	110°-120°	>120°	-	-
	Valores F3	0	-6	-25	-50	-60

Factor ajuste método de excavación

FACTOR DE AJUSTE SEGUN EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN (ROMANA, 1985)

Método	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o mecánico	Voladura deficiente
F4	+15	+10			+8
		0 -		8	

Roturas planas

SMR > 60	Ninguna
60 > SMR >40	Importantes
40 > SMR >15	Muy grandes

Rotura plana

Roturas en cuña

SMR > 75	Muy pocas
75 > SMR > 49	Algunas
55 > SMR > 40	Muchas

Cuña

Roturas por vuelco

SMR > 65	Ninguna
65 > SMR > 50	Menores
40 > SMR > 30	Muy grandes

Vuelco

Roturas completas (tipo suelo)

SMR > 30	Ninguna
30 > SMR > 10	Posible

completa

Las consideraciones para otorgar las puntuaciones a F4 son las siguientes, como señalan Romana et al. (2001)

"• Los taludes naturales son más estables, a causa de los procesos previos de erosión sufridos por el talud, y de los mecanismos internos de protección que muchos de ellos poseen (vegetación, desecación superficial, drenaje torrencial, etc). F4= + 15

• El precorte aumenta la estabilidad de los taludes en media clase. F4 = + 10.

• Las técnicas de voladura suave (recorte), bien ejecutadas, también aumentan la estabilidad de los taludes. F4 = + 8.

• Las voladuras normales, con métodos razonables, no modifican la estabilidad. F4 = 0.

• Las defectuosas, muy frecuentes, pueden dañar seriamente a la estabilidad. F4 = - 8.

• La excavación mecánica de los taludes por ripado sólo es posible cuando el macizo rocoso está muy fracturado o la roca blanda. Con frecuencia se combina con prevoladuras poco cuidadas. Las caras del talud presentan dificultades de acabado. Por ello el método ni mejora ni empeora la estabilidad. F4 = 0. "

CLASES DE ESTABILIDAD SEGÚN EL SMR (ROMANA, 1985)					
Clase nº	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-40	61-80	81-100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Re-excavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Clasificación GSI, Hoek y Brown

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR SU RESISTENCIA

Basándose en el aspecto de la roca elegir la categoría que mejor describa las condiciones del macizo previo a la excavación. Tener en cuenta que las voladuras pueden crear una impresión falsa sobre la calidad del macizo rocoso, en cuyo caso será necesario realizar algún tipo de ajuste por daños debidos a voladuras; la observación de testigos de sondeos y de frentes de roca en zonas afectadas y no afectadas por voladuras puede ser de ayuda. Para la definición del grado de fracturación (*blockiness*) debe considerarse la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión del frente de excavación.

ESTRUCTURA	CONDICIÓN DEL FRENTE MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	**BR/MB**	**BR/B**	**BR/M**	**BR/P**	**BR/MP**
BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.	**BI/MB**	**BI/B**	**BI/M**	**BI/P**	**BI/MP**
BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.	**BC/MB**	**BC/B**	**BC/M**	**BC/P**	**BC/MP**
FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.	**FI/MB**	**FI/B**	**FI/M**	**FI/P**	**FI/MP**

Tomado de González de Vallejo et al., 2002 (Fig. 3.94)

Clasificación GSI, Hoek y Brown II

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (*geological strength index*)

A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.

ESTRUCTURA	CONDICIÓN DEL FRENTE: MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80 / 70				
BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60 / 50			
BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

Tomado de González de Vallejo et al., 2002

GSI buena calidad

Para un **GSI>25 (macizos de media a muy buena calidad)** este índice puede obtenerse a partir del RMR mediante la siguiente correlación, en cuyo caso debe asignarse un **valor de 15 para las condiciones de agua en el macizo rocoso y un valor de 0 al parámetro de ajuste para la orientación de las discontinuidades**.

$$GSI = RMR_{(89)} - 5$$

En la Aplicación del criterio de Hoek y Brown y en la interpretación de los valores de resistencia obtenidos debe tenerse en cuenta que:

El criterio es válido únicamente para macizos rocosos con comportamiento isótropo.

El índice GSI se basa en estimaciones cualitativas, y en modelos simples que rara vez coinciden con las condiciones reales

Los resultados deben ser cotejados con otros métodos y, siempre que sea posible, con datos de campo y análisis a posteriori.

Referencias

Bibliografía:
-Ferrer, M. y González de Vallejo, L. (Eds), 2007. Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos IGME. Madrid. 2ª Edición. 107 p.
-González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C., 2002. I*ngeniería geológica*. Prentice Hall. Madrid, 715 p.
-ISRM, 1981. Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. In: E.T. Brown, Ed. Suggested methods. Pergamon Press.