

Clasificaciones geomecánicas *y diseño empírico*

[1] *Generalidades*

Las clasificaciones geomecánicas tienen por objeto caracterizar un determinado macizo rocoso en función de una serie de parámetros a los que se les asigna un cierto valor. Por medio de la clasificación se llega a calcular un índice característico de la roca, que permite describir numéricamente la calidad de la misma. Es una herramienta muy útil en el diseño y construcción de obras subterráneas, pero debe ser usada con cuidado para su correcta aplicación, pues exige conocimientos y experiencia por parte de quien la utiliza.

Las clasificaciones pueden ser usadas en la etapa de Proyecto y también durante la Obra. En la etapa de Proyecto, permiten estimar el sostenimiento necesario en base a las propuestas del autor de cada sistema de clasificación, mientras que durante la Obra, permiten evaluar la calidad del terreno que se va atravesando conforme avanza la excavación del túnel y aplicar el sostenimiento correcto en cada caso.

En los esquemas que siguen se muestran las actividades concretas a efectuar en las dos etapas que se han considerado:

ETAPA DE PROYECTO.- Las actividades típicas que se realizan durante el Proyecto en relación con las Clasificaciones Geomecánicas son las siguientes:

- Efectuar el Estudio Geológico de la traza por donde va a discurrir el túnel. Evaluar litologías, resistencia de la roca, estado de las juntas y presencia de agua.
- Dividir el perfil longitudinal del túnel en tramos de características similares.
- Calcular el índice de clasificación de cada tramo. Es conveniente el uso de al menos dos sistemas de clasificación, los más habituales son el de Bieniawski y el de Barton.
- Asignar a cada tramo un sostenimiento, en función del índice de calidad obtenido de las propuestas del sistema de clasificación y de la propia experiencia del proyectista.

ETAPA DE OBRA.- Durante la Obra las Clasificaciones Geomecánicas se usan según se explica a continuación:

- Es necesario tener previstos varios tipos de sostenimiento y los criterios para aplicar cada uno de ellos. Generalmente éstos deberán venir incluidos en el Proyecto Constructivo del túnel.
- En cada avance calcular en el frente el índice de calidad de la roca. Para ello es conveniente usar unos estadillos que se rellenan en el propio tajo.
- En función del índice de calidad obtenido y de otros criterios que pudiera haber definidos, aplicar el tipo de sostenimiento correspondiente.

A lo largo de los años se han desarrollado y usado varios sistemas de clasificación. Los más antiguos fueron los de Terzaghi, Protodyakonov y Lauffer. Hoy en día básicamente se usan dos sistemas, el de Bieniawski o RMR y el de Barton o sistema-Q.

[2]

Clasificación de Bieniawski

El sistema de clasificación Rock Mass Rating o sistema RMR fue desarrollado por Z.T. Bieniawski ⁽²⁾ durante los años 1972-73, y ha sido modificado en 1976 y 1979, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones. Actualmente se usa la edición de 1989, que coincide sustancialmente con la de 1979.

Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de los seis parámetros del terreno siguientes:

- La resistencia a compresión simple del material
- El RQD (Rock Quality Designation)
- El espaciamiento de las discontinuidades
- El estado de las discontinuidades
- La presencia de agua
- La orientación de las discontinuidades

El RMR se obtiene como suma de unas puntuaciones que corresponden a los valores de cada uno de los seis parámetros enumerados (tabla 4.1). El valor del RMR oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Bieniawski distingue cinco tipos o clases de roca según el valor del RMR:

CLASE I: RMR>80, Roca muy buena

CLASE II: 80<RMR<60, Roca buena

CLASE III: 60<RMR<40, Roca media

CLASE IV: 40<RMR<20, Roca mala

CLASE V: RMR<20, Roca muy mala

En las tablas 4.2 a 4.5 adjuntas se indican los criterios de valoración utilizados para los distintos parámetros. Hay que hacer las siguientes consideraciones:

RESISTENCIA DE LA ROCA.- Tiene una valoración máxima de 15 puntos, y puede utilizarse como criterio el resultado del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple o bien el Ensayo de Carga Puntual (Point Load).

RQD.- Tiene una valoración máxima de 20 puntos. Se denomina RQD de un cierto tramo de un sondeo a la relación en tanto por ciento entre la suma de las longitudes de los trozos de testigo mayores de 10 cm y la longitud total del sondeo.

SEPARACIÓN ENTRE DISCONTINUIDADES.- Tiene una valoración máxima de 20 puntos. El parámetro considerado es la separación en metros entre juntas de la familia principal de diaclasas de la roca.

ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES.- Es el parámetro que más influye, con una valoración máxima de 30 puntos. Pueden aplicarse los criterios generales de la tabla 4.2 o bien aplicar la tabla 4.3, en la que el estado de las diaclasas se descompone en otros cinco parámetros: persistencia, apertura, rugosidad, relleno y alteración de la junta.

PRESENCIA DE AGUA.- La valoración máxima es de 15 puntos. La tabla 4.2 ofrece tres posibles criterios de valoración: estado general, caudal cada 10 metros de túnel y relación entre la presión del agua y la tensión principal mayor en la roca.

ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES.- Este parámetro tiene una valoración negativa, y oscila para túneles entre 0 y -12 puntos. En función del buzamiento de la familia de diaclasas y de su rumbo, en relación con el eje del túnel (paralelo o perpendicular), se establece una clasificación de la discontinuidad en cinco tipos: desde Muy Favorable hasta Muy Desfavorable. Según el tipo, se aplica la puntuación especificada en la tabla 4.5 de acuerdo a la valoración de la tabla 4.3.

Para cada clase de roca, Bieniawski propone una cuantía de sostenimiento y un método de excavación (véase tabla 4.6). Esta tabla es aplicable a túneles excavados en roca

mediante perforación y voladura, con anchura o vano comprendido entre 5 y 10 metros. Por último creemos de utilidad indicar algunas correlaciones que algunos autores han elaborado entre el RMR y otros parámetros, citadas igualmente por Bieniawski ^{(1), (2)}:

CARGA SOBRE EL SOSTENIMIENTO	PARÁMETROS m Y s DE HOEK Y BROWN	
$p = \frac{100 - \text{RMR}}{100} \cdot \gamma \cdot b$	$m = m_i e^{\frac{\text{RMR} - 100}{28}}$	$m = m_i e^{\frac{\text{RMR} - 100}{14}}$
<p>p: carga sobre el sostenimiento γ: peso específico de la roca b: anchura del túnel</p>	<p>Roca excavada mecánicamente m, s: Parámetros del criterio de rotura de Hoek & Brown⁽⁴⁾ mi: Parámetro m de la roca intacta, obtenido en laboratorio</p>	<p>Roca excavada mediante voladura m, s: Parámetros del criterio de rotura de Hoek & Brown⁽⁴⁾ mi: Parámetro m de la roca intacta, obtenido en laboratorio</p>
MODULO DE DEFORMACIÓN	CORRELACIÓN CON LA CLASIFICACIÓN DE BARTON	
$E_m = 2 \text{ RMR} - 100 \quad (\text{para RMR} > 55)$	$\text{RMR} = 9.0 \ln Q + 44$	(Según Bieniawski, 1976)
$E_m = 10^{\frac{\text{RMR} - 10}{40}} \quad (\text{para RMR} < 85)$	$\text{RMR} = 10.5 \ln Q + 42$	(Según Abad et al, 1983)
Em: Módulo de deformación en GPa	$\text{RMR} = 13.5 \ln Q + 43$	(Según Rutledge, 1978)
	Según diversos autores ^{(1), (2)}	

TIEMPO DE ESTABILIDAD.- En la figura 4.1 se observa el tiempo máximo de estabilidad de la excavación sin sostener, en función de la calidad de la roca (RMR) y del vano existente (normalmente la anchura del túnel).

TABLA 4.1. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI

CLASE	I	II	III	IV	V
CALIDAD	<i>Muy Buena</i>	<i>Buena</i>	<i>Mediana</i>	<i>Mala</i>	<i>Muy Mala</i>
RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
TIEMPO DE ESTABILIDAD Y LONGITUD DE VANO	20 años 15 metros	1 años 10 metros	1 semana 5 metros	10 horas 2.5 metros	30 minutos 1 metros
COHESIÓN (MPa)	> 0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	< 0.1
ROZAMIENTO	> 45°	35-45°	25-35°	15-25°	< 15°

TABLA 4.2. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI (1979): PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN

1 RESISTENCIA A LA ROCA SANA (MPa)	Ensayo carga puntual	> 10	4-10	2-4	1-2	-
	Compr. simple	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25 1-5 < 1
VALORACIÓN		15	12	7	4	2 1 0
2 RQD%		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25
	VALORACIÓN	20	17	13	8	3
3 SEPARACIÓN DISCONTINUIDADES		> 2m	0.6-2	0.2-0.6m	0.06-0.2m	< 0.06m
	VALORACIÓN	20	15	10	8	5
4 ESTADO DIACLASAS		<i>Muy rugosas Discontinuas Borde sano y duro</i>	<i>Ligeramente rugosas e < 1mm Borde duro</i>	<i>Ligeramente rugosas e < 1mm Bordes blandos</i>	<i>Rellenos e < 5mm Abiertas Continuas</i>	<i>Rellenos blandos e < 5mm Continuas</i>
	VALORACIÓN	30	25	20	10	0
5 PRESENCIA DE AGUA	Caudal en 10m túnel	Nulo	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
	σ _w /σ ₃	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5
	Estado	Seco	Ligeram. húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
VALORACIÓN		15	10	7	4	0

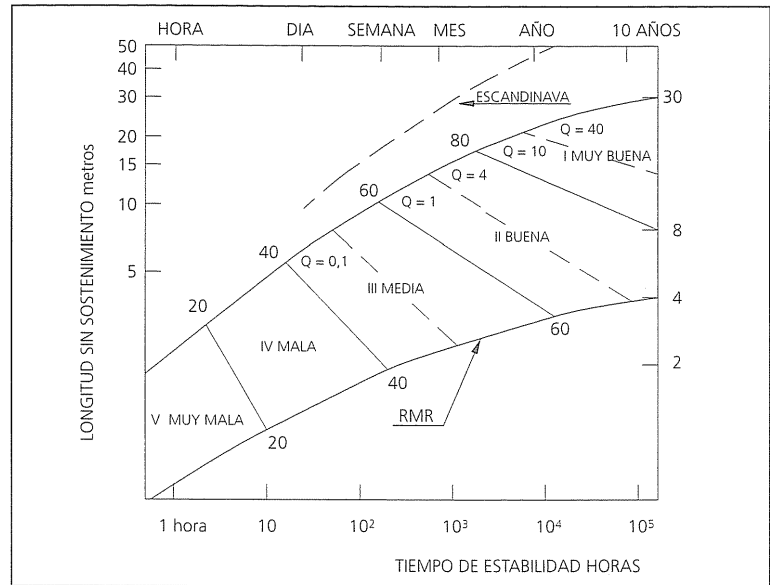


FIGURA 4.1
Tiempo de estabilidad según Bieniawski

TABLA 4.3 GUÍA PARA VALORAR EL ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES (SEGUN BIENIAWSKI)

PARÁMETRO	VALORACIÓN				
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD (PERSISTENCIA)	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
APERTURA	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm
	6	5	3	1	0
RUGOSIDAD	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave
	6	5	3	1	0
RELLENO	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm
	6	4	2	2	0
ALTERACIÓN	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

TABLA 4.4 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI: ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

DIRECCIÓN PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL				DIRECCIÓN PARALELA AL EJE DEL TÚNEL		CUALQUIER DIRECCIÓN
Exc. a favor de buzamiento		Exc. a favor de buzamiento				
Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 45° - 20°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	Buzamiento 0° - 20°
Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Medio	Muy desfavorable	Desfavorable

TABLA 4.5 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI: CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO	MUY FAVORABLE	FAVORABLE	MEDIO	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORACIÓN PARA Túneles	0	-2	-5	-10	-12
Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

TABLA 4.6 NECESIDADES DE SOSTENIMIENTO (SEGÚN BIEN/AWSKI)

RMR	EXCAVACIÓN	BULONADO	GUNITADO	CERCHAS
> 81	Sección completa Avances de 3 m	Algún bulón ocasional	Innecesario	No
61-80	Sección completa Avances de 1-1.5 m	Bulonado local en bóveda L=2-3 m, S=2-2.5 m	5 cm en bóveda Eventualmente mallazo	No
41-60	Avance y destroza Avances de 1.5-3 m	Bulonado sistemático L=3-4 m, s=1.5-2 m	5-10 cm en bóveda, 3 cm hastiales Mallazo en bóveda	No
21-40	Avance y destroza Avances de 1-1.5 m	Bulonado sistemático L=4-5 m, S=1-1.5 m	10-15 cm bóveda, 10 cm en hastiales Mallazo sistemático	Ligeras s=1.5 m
< 20	Fases múltiples Avances de 0.5-1 m	Bulón sistemático (incluso en solera) L=5-6 m, s=1-1.5 m	15-20 cm bóveda, 15 cm hastiales y 5 cm. frente Mallazo sistemático	Pesadas, cerradas s=0.75 m

[3]

Clasificación de Barton

El Sistema-Q o Clasificación de Barton fue desarrollado en Noruega en 1974 por Barton, Lien y Lunde, del Instituto Geotécnico Noruego⁽³⁾. Se basó su desarrollo en el análisis de cientos de casos de túneles construidos principalmente en Escandinavia. Actualmente se denomina Nuevo Método Noruego de túneles al diseño de las excavaciones basándose directamente en los trabajos de Barton. La Clasificación de Barton asigna a cada terreno un índice de calidad Q, tanto mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Su variación no es lineal como la del RMR, sino exponencial, y oscila entre Q=0.001 para terrenos muy malos y Q=1000 para terrenos muy buenos.

El valor de Q se obtiene de la siguiente expresión:

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

donde cada parámetro representa lo siguiente:

RQD es el índice Rock Quality Designation, es decir, la relación en tanto por ciento entre la suma de longitudes de testigo de un sondeo mayores de 10 cm y la longitud total. Barton indica que basta tomar el RQD en incrementos de 5 en 5, y que como mínimo tomar RQD=10.

J_n varía entre 0.5 y 20, y depende del número de familias de juntas que hay en el macizo.

J_r varía entre 1 y 4, y depende de la rugosidad de las juntas.

J_a varía entre 0.75 y 20, y depende del grado de alteración de las paredes de las juntas de la roca.

J_w varía entre 0.05 y 1, dependiendo de la presencia de agua en el túnel.

SRF son las iniciales de Stress Reduction Factor, y depende del estado tensional de la roca que atraviesa el túnel.

Para la obtención de cada uno de los cinco últimos parámetros, Barton aporta unas tablas donde se obtienen los valores correspondientes en función de descripciones generales del macizo rocoso (tabla 4.7, tabla 4.8, tabla 4.9, tabla 4.10 y tabla 4.12).

NOTAS:

(1) Para boquillas tomar $2 \cdot J_n$

(2) Para intersecciones tomar $3 \cdot J_n$

TABLA 4.7 OBTENCIÓN DE J_n

DESCRIPCIÓN	VALOR
ROCA MASIVA	0.5-1.0
UNA FAMILIA DE JUNTAS	2
ÍDEM + OTRAS OCASIONALES	3
DOS FAMILIAS DE JUNTAS	4
ÍDEM + OTRAS OCASIONALES	6
TRES FAMILIAS DE JUNTAS	9
ÍDEM + OTRAS OCASIONALES	12
CUATRO O MÁS, ROCA FRACTURADA	15
ROCA TRITURADA	20

TABLA 4.8 OBTENCIÓN DE J_r

DESCRIPCIÓN ⁽¹⁾		VALOR
CONTACTO ENTRE PAREDES DE ROCA O CONTACTO CON CIZALLAMIENTO DE 10 CM	<i>Juntas discontinuas</i>	4
	<i>Ondulada, rugosa, irregular</i>	3
	<i>Ondulada ligeramente, espejo de falla discontinuo</i>	2
	<i>Espejo de falla ondulada</i>	1.5
	<i>Irregular, rugosa, plana</i>	1.5
	<i>Lisa, plana</i>	1.0
	<i>Planas con espejo de falla</i>	0.5
SIN CONTACTO ENTRE PAREDES DE ROCA DESPUÉS DEL CIZALLAMIENTO	<i>Relleno arcilloso</i>	1.0
	<i>Relleno de arena, grava, roca triturada</i>	1.0

NOTAS:

- (1) Datos de la familia principal.
- (2) Sumar 1.0 si el espaciamiento entre juntas es mayor de 3 metros.
- (3) $J_r=0.5$ para juntas planas con espejo de falla en alineaciones con orientación favorable.

TABLA 4.9 OBTENCIÓN DE J_s

DESCRIPCIÓN ⁽¹⁾		VALOR	ÁNGULO ROZAMIENTO
CONTACTO ENTRE PAREDES DE ROCA	<i>Muy cerrado, duro, relleno de cuarzo o epidota, impermeable</i>	0.75	25-35°
	<i>Paredes no alteradas sin relleno</i>	1	25-30°
	<i>Ligeramente alteradas, rellenos arenosos no blandos</i>	2	25-30°
	<i>Rellenos de limo o arena arcillosa, poca arcilla</i>	3	20-25°
	<i>Relleno arcilloso, caolín, mica, clorita, yeso y grafito, pequeñas cantidades de arcilla expansiva (2)</i>	4	8-16°
CONTACTO CON MOVIMIENTO DE CIZALLAMIENTO MENOR DE 10 CM	<i>Relleno de arena, sin arcilla</i>	4	25-30°
	<i>(A) Relleno arcilloso fuertemente sobreconsolidado, sin minerales arcillosos (3)</i>	6	16-24°
	<i>(B) Relleno arcilloso blando, medianamente o poco consolidado, e < 5 mm (3)</i>	8	12-16°
	<i>(C) Relleno arcilla expansiva, con presencia de agua, Jr depende del contenido de arcilla expansiva</i>	8-12	6-12°
SIN CONTACTO ENTRE PAREDES DE ROCA, DESPUÉS DE CIZALLAMIENTO	<i>Zonas de relleno de roca triturada o desintegrada y arcilla, según tipo (A), (B) o (C)</i>	6, 8, 8-12	6-24°
	<i>Zonas de rellenos arenosos, arcillosos o limosos, poca arcilla</i>	5	
	<i>Relleno arcilloso, ancho y continuo según el tipo de arcilla (A), (B) o (C)</i>	10, 13, 13-20	6-24°

NOTAS:

- (1) Datos de la familia principal.
- (2) Recubrimientos discontinuos de las paredes, de espesor entre 1-2mm. o menos.
- (3) Recubrimientos continuos de las paredes, de espesor <5mm.

Una vez obtenido el valor de Q , en las tablas 4.13 - 4.17 Barton propone el sostenimiento a emplear. Para ello es necesario un nuevo parámetro dependiente de las dimensiones del túnel, llamado Dimensión Equivalente. La dimensión equivalente se obtiene como cociente entre el vano o altura del túnel (el mayor de ambos valores) y un factor denominado Excavation Support Ratio (ESR). El ESR se obtiene de la tabla 4.11 en función del tipo de excavación.

TABLA 4.10 OBTENCIÓN DE J_w

DESCRIPCIÓN	VALOR	PRESIÓN AGUA (MPa)
SECO O PEQUEÑA ENTRADA LOCAL	1.0	< 0.1
MEDIANO FLUJO O PRESIÓN, LAVADO OCASIONAL DE RELLENO DE JUNTAS	0.66	0.1-0.25
GRAN FLUJO O ALTA PRESIÓN DE AGUA, ROCA COMPETENTE SIN RELLENO EN LAS JUNTAS	0.5	0.25-1.0
GRAN FLUJO O ALTA PRESIÓN DE AGUA, LAVADO DEL RELLENO DE JUNTAS CONSIDERABLE	0.33	0.25-1.0
FLUJOS MUY FUERTES O PRESIÓN MUY ELEVADA DISMINUYENDO CON EL TIEMPO	0.2-0.1	> 1.0
IDEM, PERO NO DISMINUYENDO CON EL TIEMPO LA PRESION DE AGUA	0.1-0.05	> 1.0

NOTAS:

- (1) Los índices tercero a sexto son estimaciones groseras. Se puede aumentar J_w si hay medidas de drenaje.
 (2) No se considera formación de hielo.

TABLA 4.11 DIMENSIÓN EQUIVALENTE DEL TÚNEL

DESCRIPCIÓN	VALOR
GALERÍAS TEMPORALES DE MINAS	3 - 5
POZOS VERTICALES: CIRCULARES / RECTANGULARES	2.5 / 2
GALERIAS PERMANENTES EN MINAS, TÚNELES HIDRÁULICOS, GALERIAS PILOTOS O GALERIAS DE AVANCE (1)	1.6
CAVERNAS PEQUEÑAS, TÚNELES DE ACCESO, TÚNELES DE CARRETERA O FF.CC. POCO IMPORTANTES	1.3
CAVERNAS, TÚNELES DE CARRETERA O FF.CC., BOQUILLAS, INTERSECCIONES	1
CAVERNAS PARA FÁBRICAS, CENTRALES, ESTACIONES DE FF.CC., PLANTAS NUCLEARES	0.8

NOTAS:

- (1) Túneles hidráulicos para centrales hidroeléctricas; se excluyen conducciones forzadas a alta presión.
 (2) Se toma la dimensión equivalente igual al máximo del vano o la altura dividido por ESR.

Las tablas 4.13 - 4.17 van acompañadas de unas notas aclaratorias; en ellas se definen 38 categorías de sostenimiento, en función principalmente de Q y de la Dimensión Equivalente. La figura 4.2 permite conocer en qué categoría de sostenimiento nos situamos.

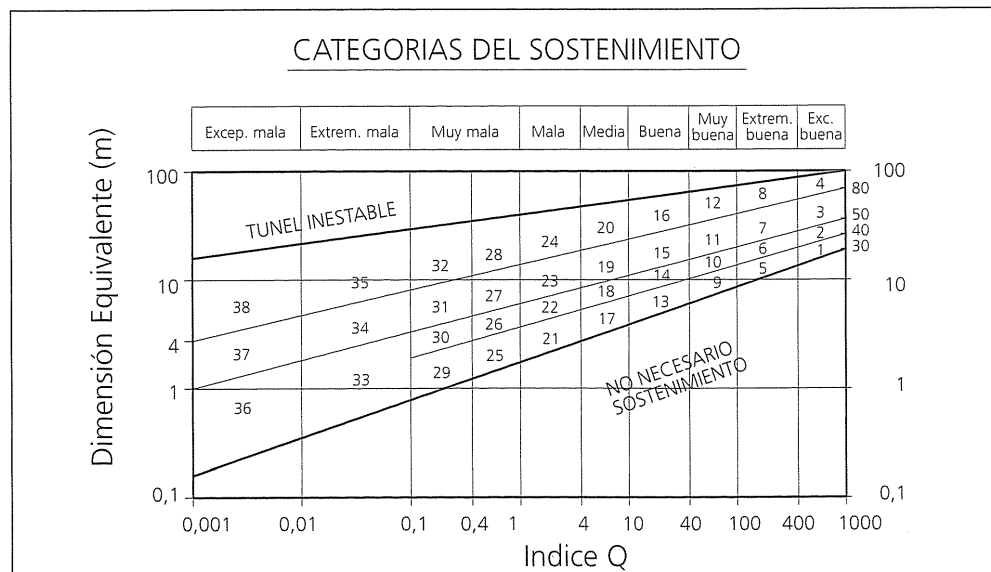


FIGURA 4.2
 Categorías del sostenimiento (Barton)

TABLA 4.12. OBTENCIÓN DE SRF

DESCRIPCIÓN	VALOR		
EXCAVACIÓN ATRAVESADA POR ZONAS BLANDAS DE ROCA QUE PUEDEN OCASIONAR DESCOMPRESIÓN O DESPRENDIMIENTO DE ROCAS AL EXCAVAR EL TÚNEL	<i>Muchas zonas débiles, con arcilla o roca desintegrada, roca muy descomprimida</i>	10	
	<i>Zonas individuales débiles, con arcilla o roca triturada, prof ≤ 50 m</i>	5	
	<i>Idem prof > 50 m</i>	2.5	
	<i>Muchas zonas de cizallamiento en roca competente sin arcilla, roca descomprimida</i>	7.5	
	<i>Zonas individuales de cizallamiento en roca competente sin arcilla, prof ≤ 50 m</i>	5	
	<i>Idem prof > 50 m</i>	2.5	
	<i>Juntas abiertas, muy diaclasado</i>	5	Rc / σ ₁ Rt / σ ₃
ROCA COMPETENTE, PROBLEMAS DE TENSIÓN EN LA ROCA	<i>Baja tensión, cerca de la superficie</i>	2.5	> 200 > 13
	<i>Tensión media</i>	1	10-200 0.66-13
	<i>Alta tensión, roca resistente</i>	0.5-2	10-5 0.33-0.66
	<i>Explosiones en roca masiva de rocas pequeñas</i>	5-10	5-2.5 0.16-0.33
	<i>Explosiones grandes de roca masiva</i>	10-20	< 2.5 < 0.16
ROCA FLUYENTE O PLÁSTICA	<i>Poca presión de fluencia</i>	5-10	
	<i>Presión grande de fluencia</i>	10-20	
ROCA EXPANSIVA	<i>Poca presión de hinchamiento</i>	5-10	
	<i>Presión grande de hinchamiento</i>	10-5	

NOTAS:

- (1) Rc: Resistencia a compresión simple, Rt: Resistencia a tracción.
- (2) σ₃: Tensión principal mayor del macizo (de compresión).
- (3) Considerar SRF un 25-50% si las zonas débiles influyen, pero no intersectan la excavación.
- (4) Para campos tensionales anisótropos, reducir 0,8 Rc y 0,8 Rt para 5 < σ₁/σ₃ < 10 ó 0,6 Rt si σ₁/σ₃ > 10.
- (5) SRT=2.5-5 si la cobertera es menor que la anchura del túnel.

Más recientemente⁽⁵⁾, Barton ha publicado la figura 4.3, en donde se muestra de una manera más intuitiva el sostenimiento que es necesario colocar según los valores de Q y de la Dimensión Equivalente. Aparecen nueve zonas en el gráfico, correspondiendo la número 1 a la zona en la que no es necesario sostenimiento, la número 2 al sostenimiento más ligero y así sucesivamente hasta la número 9, en la que es necesario el sostenimiento más potente. Hay que señalar que esta última edición proporciona sostenimientos algo diferentes de la edición de 1974.

Por último, existen unas expresiones que ligan el índice Q con el máximo vano sin sostener y con la presión que ejerce la roca sobre el sostenimiento⁽²⁾,⁽³⁾:

$$\text{MÁXIMO VANO SIN SOSTENER} \\ \text{Máx. Vano} = 2 \cdot \text{ESR} \cdot Q^{0.4}$$

$$\text{PRESIÓN SOBRE LA CLAVE} \\ \text{Con tres o más familias de juntas}$$

$$P = \frac{2}{J_r \sqrt[3]{Q}}$$

$$\text{PRESIÓN SOBRE LOS HASTIALES} \\ \text{Expresiones iguales a las anteriores, pero modificando el valor de Q con los siguientes criterios:}$$

- si Q > 10, tomar 5 Q
- si 0.1 < Q < 10, tomar 2.5 Q
- si Q < 0.1, tomar Q

$$\text{Con menos de tres familias de juntas}$$

$$P = \frac{2 \sqrt{J_n}}{3 J_r \sqrt[3]{Q}}$$

TABLA 4.13 SOSTENIMIENTO RECOMENDADO POR BARTON ($Q > 40$)

CATEGORIA	Q	RQD /Jn	Jr/Ja	DIM. EQUIVALENTE	PRESIÓN (Kp/cm ²)	SOSTENIMIENTO	NOTAS
1	1000-400				< 0.01	sb (utg)	-
2	1000-400					sb (utg)	
3	1000-400					sb (utg)	
4	1000-400					sb (utg)	
5	400-100				0.05	sb (utg)	-
6	400-100					sb (utg)	
7	400-100					sb (utg)	
8	400-100					sb (utg)	
9	100-40	> 20			0.25	sb (utg)	-
		< 20				B (utg) 2.5-3 m	
10	100-40	> 30				B (utg) 2-3 m	
		< 30				B (utg) 1.5-2 + clm	
11	100-40	> 30				B (tg) 2-3 m	
		< 30				B (tg) 1.5-2 + clm	
12	100-40	> 30				B (tg) 2-3 m	
		< 30				B (tg) 1.5-2 + clm	

TABLA 4.14 SOSTENIMIENTO RECOMENDADO POR BARTON ($4 < Q < 40$)

CATEGORIA	Q	RQD /Jn	Jr / Ja	DIM. EQUIVALENTE	PRESIÓN (Kp/cm ²)	SOSTENIMIENTO	NOTAS
13	40-10	> 10	> 1.5		0.5	sb (utg)	1
			< 1.5			B (utg) 1. 5-2 m	
		< 10	> 1.5			B (utg) 1. 5-2	
			< 1.5			B (utg) 1. 5-2+ s 2-3	
14	40-10	> 10	> 1.5			B (tg) 1. 5-2+ clm	1,2
			< 1.5			B (tg) 1. 5-2+ s(mr) 5-10	
		< 10	> 1.5			B (utg) 1. 5-2+ clm	1,3
			< 1.5			B (tg) 1. 5-2+ clm	
15	40-10	> 10			B (tg) 1. 5-2+ clm	1,2,4	
		< 10			B (tg) 5-2+s(mr) 5-10		
16	40-10	> 15			B (tg) 1. 5-2+ clm	1,5,6,12	
		< 15			B (tg) 5-2+ s(mr) 10-15		
17	10-4	> 30			1.0	sb (utg)	1
		10-30				B (utg) 1. 1-5	
		< 10		> 6		B (utg) 1-1. 5+ s 2-3	
		< 10		< 6		s 2-3	
18	10-4	> 5		> 10		B (tg) 1- 1. 5+ clm	1,3
		< 5		< 10		B (utg) 1- 1. 5+ clm	
		> 5		> 10		B (tg) 1-1. 5+ s 2-3	1,3
		< 5		< 10		B (utg) 1-1. 5+ s 2-3	
19	10-4			> 20		B (utg) 1-1. 5+ s 2-3	1
				< 20		B (tg) 1-2+ s (mr) 10-15	
20	10-4			> 35		B (tg) 1-1.5+ s(mr) 5-10	1,2
				< 35		B (tg) 1-2+ s(mr) 10-20	
	10-4			> 35	B (tg) 1-2+ s(mr) 10-20	1,5,6	
	10-4			< 35	B (tg) 1-2+ s(mr) 10-20	1,2,4	

TABLA 4.15 SOSTENIMIENTO RECOMENDADO POR BARTON (0.4 < Q < 4)

CATEGORIA	Q	RQD / Jn	Jr / Ja	DIM. EQUIVALENTE	PRESIÓN (Kp/cm ²)	SOSTENIMIENTO	NOTAS
21	4-1	> 12.5	< 0.75			B (utg) 1+ S 2-3	1
		< 12.5	< 0.75			S 2.5-5	
		< 12.5	> 0.75			B (utg) 1	
22	4-1	10-30	> 1		1.5	B (utg) 1+ clm	
		> 10	> 1			S 2.5-7.5	
		< 30	< 1			B (utg) 1+ s(mr) 2.5-5	
	-	> 30			B (utg) 1		
23	4-1			> 15		B (tg) 1-1.5+ s(mr) 10-15	1,2,4,7
				< 15		B (utg) 1-1.5+ s(mr) 5-10	1
24	4-1			> 30		B (tg) 1-1.5+ s(mr) 15-30	1,5,6,12
				< 30		B (tg) 1-1.5+ s(mr) 10-15	1,2,4,12
25	1-0,4	> 10	> 0.5			B (utg) 1+ mr ó clm	1
		< 10	> 0.5			B (utg) 1+ s(mr) 5	
		< 10	< 0.5			B (tg) 1+ s(mr) 5	
26	1-0,4				2.25	B (tg) 1+ s(mr) 5-7.5	8,10,11
						B (utg) 1+ s 2.5-5	1,9
27	1-0,4			> 12		B (tg) 1+ s(mr) 7.5-10	
				< 12		B (utg) 1+ s(mr) 5-7.5	
				> 12		CCA 20-40+ B(tg) 1	
				< 12		s(mr)10-20+ B(tg) 1	
28	1-0,4			> 30		B (tg) 1+ s(mr) 30-40	1,4,5,9
				20-30		B (tg) 1+ s(mr) 20-30	1,2,4,9
				< 20		B (tg) 1+ s(mr) 15-20	1,2,9
						CCA(sr) 30-100+ B(tg) 1	4,8,10,11

TABLA 4.16 SOSTENIMIENTO RECOMENDADO POR BARTON (0.01 < Q < 0.4)

CATEGORIA	Q	RQD / Jn	Jr / Ja	DIM. EQUIVALENTE	PRESIÓN (Kp / cm ²)	SOSTENIMIENTO	NOTAS	
29	0,4-0,1	> 5	> 0.25		3.0	B (utg) 1+ s 2-3		
		< 5	> 0.25			B (utg) 1+ s(mr) 5		
		< 5	< 0.25			B (tg) 1+ s(mr) 5		
30	0,4-0,1	> 5			3.0	B (tg) 1+ s 2.5-5	9	
		< 5					s(mr) 5-7.5	9
							B (tg) 1+ s(mr) 5-7.5	8,10,11
31	0,4-0,1	> 4			3.0	B (tg) 1+ s(mr) 5-12.5	9	
		1.5-4					s(mr) 7.5-25	9
		< 1.5					CCA 20-40 + B(tg) 1	9,11
32	0,4-0,1			> 20	3.0	B (tg) 1+ s(mr) 40-60	2,4,9,11,12	
				< 20		B (tg) 1+ s(mr) 20-40	3,4,9,11,12	
33	0,1-0,01	> 2			6.0	B (tg) 1+ s(mr) 2.5-5	9	
		< 2					s(mr) 5-10	9
							s(mr) 7.5-15	8,10
34	0,1-0,01	> 2	> 0.25		6.0	B (tg) 1+ s(mr) 5-7.5	9	
		< 2	> 0.25			s(mr) 7.5-15	9	
		< 2	< 0.25			s(mr) 15-25	9	
35	0,1-0,01			> 15	6.0	CCA(sr) 20-60 + B(tg) 1	8,10,11	
				> 15		B (tg) 1+ s(mr) 30-100	2,9,11	
				< 15		CCA (sr) 60-200 + B(tg) 1	8,10,12,2	
				< 15		B (tg) 1+ s(mr) 20-75	9,11,3	
				< 15		CCA (sr) 40-150 = B (tg) 1	8,10,11,3	

TABLA 4.17 SOSTENIMIENTO RECOMENDADO POR BARTON (Q < 0.01)

CATEGORIA	Q	RQD/Jn	Jr / Ja	DIM. EQUIV.	PRESIÓN (Kp/cm ²)	SOSTENIMIENTO	NOTAS
36	0,01-0,001				12.0	s(mr) 10-20	9
						s(mr) 10-20+ B (tg) 0.5-1	8,10,11
37	0,01-0,001				12.0	s(mr) 20-60	9
						s(mr) 20-60+ B (tg) 0.5-1	8,10,11
38	0,01-0,001			> 10	12.0	CCA (sr) 100-300	9,13
				> 10		CCA (sr) 100-300+ B (tg) 0.5-1	8,10,2,11,13
				< 10		S(mr) 70-200	9,13
				< 10		S(mr) 70-200	8,10,3,11,13

NOTA (para las tablas 4.13 a 4.17): Claves para identificar el sostenimiento:

sb: Bulonado puntual.

B: Bulonado sistemático, espaciado entre bulones en metros.

(utg): Bulones pasivos inyectados.

(tg): Bulones activos inyectados.

s: Hormigón proyectado, espesor en centímetros.

(mr): Con mallazo.

clm: Malla de gallinero

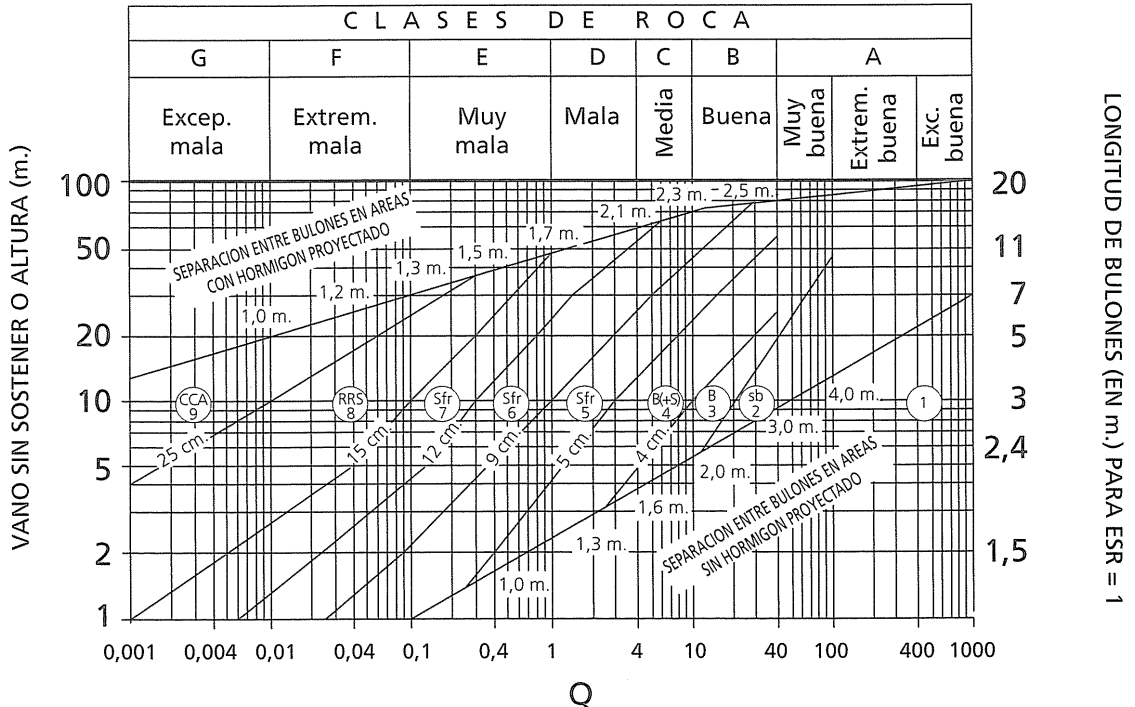
CCA: Anillo de hormigón encofrado, espesor en centímetros.

(sr): Armado con acero.

TABLA 4.18 NOTAS AL SOSTENIMIENTO RECOMENDADO POR BARTON

Nº	NOTA
1	Para casos de explosiones de roca, colocar bulones con placas grandes separadas 1 m o menos. El revestimiento final cuando termine el desconche de la roca
2	A veces se usan distintas longitudes de bulones: 3, 5 y 7 m.
3	Se usan distintas longitudes de bulones: 2, 3 y 4 m.
4	Se usan además anclajes de cables separados cada 4 a 6 m.
5	Se usan a veces diferentes longitudes de bulones: 6, 8 y 10 m.
6	Se usan además anclajes de cables a 4 ó 6 m.
7	A veces se han usado bulones en el techo y malla de gallinero y un arco de hormigón de 25-40 cm como revestimiento
8	Si el terreno es expansivo, dejar una cámara drenada entre el terreno y sostenimiento
9	Sin arcilla expansiva o fluyente
10	Con roca fluyente. Colocar un revestimiento definitivo pesado
11	En casos de expansividad o fluencia: si $RQD / J_n > 1.5$ emplear $B(tg) + s$, si $RQD / J_n < 1.5$ emplear $s 10-15 + B(tg)$
12	Excavar en varias fases si la dimensión equivalente es mayor de 15 m.
13	En varias fases si el terreno es fluyente, sólo si Dim. equivalente > 10 m.

SOSTENIMIENTOS SEGUN BARTON (1992)



CCA : HORMIGON DE REVESTIMIENTO
 Sfr : HORMIGON PROYECTADO CON FIBRA
 B : BULONADO SISTEMATICO
 Sb : BULONADO PUNTUAL
 S : HORMIGON PROYECTADO
 RRS : CERCHAS + HORMIGON PROYECTADO

Calidad del macizo rocoso

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

FIGURA 4.3
 Sostenimientos según Barton (1992)

[4]

Otras clasificaciones

Se explican brevemente a continuación las características de otros sistemas de clasificación geomecánica, pero sin entrar en el contenido concreto de las mismas ya que hoy en día son poco utilizados.

- 1 **CLASIFICACIÓN DE TERZAGHI** La Clasificación de Terzaghi fue propuesta por este autor en 1964. Clasifica los terrenos en 9 tipos: los tipos 1 al 5 son diversas calidades de roca, el tipo 6 son arenas y gravas, el tipo 7 y 8 son arcillas, y el tipo 9 son terrenos expansivos. Para cada uno de ellos da una carga de roca sobre el revestimiento del túnel en función de las dimensiones de éste, de la profundidad y de la densidad de la roca.
- 2 **CLASIFICACIÓN DE PROTODYAKONOV** Es una clasificación que fue usada en los países del Este de Europa. Se basa en clasificar los terrenos asignándoles un parámetro "f" llamado coeficiente de resistencia a partir del cual se definen las cargas que actúan sobre el revestimiento. El valor de f se obtiene en rocas a partir de la resistencia a compresión simple y en suelos a partir de la cohesión y el ángulo de rozamiento.
- 3 **CLASIFICACIÓN DE LAUFFER** Se definen siete clases de terreno, denominadas A, B..., G, a partir de características generales. En un ábaco se muestra el tiempo de estabilidad de la excavación sin sostener en función de la clase de terreno y del vano máximo del túnel.
- 4 **CLASIFICACIÓN RQD** Fue propuesta por Deere y se basa en clasificar el terreno únicamente por el valor del Rock Quality Designation o RQD. Según el valor de este parámetro se proponen unos ciertos sistemas de sostenimiento. Hoy en día no se utiliza esta clasificación, aunque el RQD sigue siendo uno de los principales parámetros de caracterización de los macizos rocosos.
- 5 **CLASIFICACIÓN RSR** Fue definida por Wickham et al en 1972, y es el antecesor inmediato del sistema RMR. Se basa en obtener un índice de calidad de la roca llamado RSR (Rock Structure Rating). El RSR se obtiene como suma de tres parámetros: $RSR = A + B + C$, y tiene un valor comprendido entre 0 y 100, al igual que el RMR. El parámetro A tiene un valor máximo de 30 puntos, y depende de la litología y de la estructura del macizo rocoso. El parámetro B tiene un valor máximo de 50 puntos, y es función de la orientación de las juntas con respecto al eje del túnel y de la separación entre diaclasas de la misma familia. Por último, el parámetro C tiene un valor máximo de 20 puntos, y depende de la presencia de agua y del estado de las diaclasas. El autor propone unas tablas de doble entrada en donde se obtienen los tres valores A, B y C. Posteriormente aporta unas expresiones para calcular la carga de la roca sobre el revestimiento en función del RSR y de las dimensiones del túnel.
- 6 **CLASIFICACIÓN DE GONZÁLEZ VALLEJO** Propuesta por este autor español en 1983, esta clasificación es una adaptación de la Clasificación de Bieniawski para ser aplicada conociendo únicamente datos superficiales. Además de los parámetros que incluye el sistema RMR, se usan: la historia tectónica del macizo, la durabilidad de la roca, el método de excavación y el tiempo que va a estar el túnel sin sostener.

[5]	<i>Bibliografía</i>
-----	---------------------

- (1) Moreno Tallón, Elías: "Las Clasificaciones Geomecánicas de las Rocas, aplicadas a las Obras Subterráneas", Cuadernos EPTISA, nº 1, 1981.
- (2) Bieniawski, Z.T.: "Engineering Rock Mass Classifications", John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- (3) Barton N., Lien R. & Lunde J.: "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support". Rock Mechanics, Springer Verlag, vol. 6, 1974.
- (4) Hoek & Brown: "Underground Excavations in Rock", Institution of Metallurgy, 1980.
- (5) Barton, N. Et al: "Norwegian Method of Tunnelling". World Tunnelling. Julio-Agosto, 1992.