

RECOMENDACIONES DE EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO PARA TÚNELES

Manuel Romana Ruiz

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Catedrático de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Valencia

RESUMEN

Las clasificaciones geomecánicas se han convertido en una herramienta habitual para la construcción de túneles, tanto en las fases preliminares de anteproyecto (como método de estimación de sostenimiento) como durante la fase de construcción (como herramienta de control diario en el tajo). La más utilizada en nuestro país es la de BIENIAWSKI (R.M.R. - rock mass rating). Las recomendaciones de excavación y sostenimiento dadas por BIENIAWSKI son algo imprecisas y se adaptan mal a las condiciones reales de obra en muchos de los casos. El autor, basándose en su experiencia, propone unas recomendaciones de excavación y sostenimiento que son más detalladas y se adaptan mejor a las condiciones habituales de la construcción de túneles en España.

ABSTRACT

Geomechanical classifications have become a standard tool in the construction of tunnels, both in the preliminary design stages (as a support estimation method) as well as during the construction stages (as a daily cut monitoring tool). The most widely used rating in this country is that of BIENIAWSKI (R.M.R. -rock mass rating). The excavation and support recommendations given by BIENIAWSKI are somewhat imprecise and in many cases do not adapt well to real site conditions. The author, on the basis of his experience, proposes more detailed excavation and support recommendations which are more suited to the normal tunnelling conditions in Spain.

1. INTRODUCCIÓN

Las clasificaciones geomecánicas se han convertido en una herramienta habitual para el reconocimiento de los macizos rocosos en los que van a construirse obras de ingeniería y especialmente túneles y obras subterráneas.

Existen opiniones contrapuestas sobre las clasificaciones geomecánicas:

En contra

- ▼ No tienen base científica, son meras compilaciones empíricas.

- ▼ Simplifican excesivamente los problemas reales.
- ▼ Son peligrosas porque personas sin la adecuada formación pueden pensar que, con una simple aplicación del método clasificatorio, han resuelto un proceso complejo.

A favor

- ▼ Todo el mundo las usa.
- ▼ Permiten cuantificar hechos naturales complejos.
- ▼ Establecen un lenguaje técnico común.

En cualquier caso las clasificaciones constituyen una herramienta válida más. BIENIAWSKI (1997) recomienda "que

las clasificaciones.... (se usen) en el contexto de un proceso global de diseño ingenieril". Además indica "que deben usarse solo en fases preliminares y/o de planeamiento, pero no para definir (las medidas) finales de diseño".

La clasificación Q de Barton (en la que se basa el llamado Método Noruego de Túneles) es bastante rígida en la definición de las medidas de sostenimiento de túneles, que se aplican directamente en obra sin más comprobación ni cálculo. Las condiciones geológicas de Noruega son muy diferentes de las de España y quizá por eso esta clasificación Q se emplea mucho menos en nuestro país, aunque puede tener interés para algún caso específico (como en el del Túnel Ferroviario de

Alta Velocidad bajo la Sierra de Guadarrama donde se utilizó para la caracterización del macizo rocoso).

En España la clasificación geomecánica más usada es la de BIENIAWSKI (1976, 1979 y 1989), que proporciona unas recomendaciones de sostenimiento en función del índice RMR ("Rock mass rating"). Estas recomendaciones, que se reproducen en el apartado 2, no se corresponden con la situación española actual y suelen matizarse en cada caso concreto. En este artículo se proponen unas nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento de túneles, basadas en lo que podríamos llamar la "cultura" (los usos y costumbres) del mercado español de la construcción, en este momento y teniendo en cuenta los desarrollos previsibles.

TABLA 2.1.
RECOMENDACIONES INDICATIVAS PARA LA EXCAVACIÓN Y EL SOSTENIMIENTO DE TÚNELES EXCAVADOS EN ROCA
(BIENIAWSKI, 1989)

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADOQ	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance). Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	50-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance). Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 5 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo.	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galerías múltiples. (0.5-1.5 en avance). Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Bulonar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda

Notas (de BIENIAWSKI): Sección del túnel en herradura. Ancho 10 m. Tensión vertical < 25 MPa. Excavado por voladuras.

2. RECOMENDACIONES DE BIENIAWSKI (1989)

La tabla 2.1. recoge las recomendaciones de Bieniawski (versión 1989, que no ha sido modificada después) que incluyen los siguientes puntos:

a. Excavación

▼ Partición de la sección, longitud de pase y tiempo y distancia de construcción del sostenimiento

b. Bulonado

▼ Situación, longitud, espaciamiento y uso de mallazo

c. Hormigón proyectado

▼ Situación y espesores

d. Cerchas metálicas

▼ Requerimiento, tipo y espaciamiento. Necesidad de forros, paraguas y contrabóvedas.

3. DIVISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI EN SUBCLASES

La clasificación de BIENIAWSKI ha dividido siempre el índice RMR dentro de 5 clases (I, II, III, IV y V) con las denominaciones desde "Muy buena" a "Muy mala". Cada clase cubre un intervalo de 20 puntos.

En la práctica las clases no son equiparables entre sí. La clase I (Muy buena) es muy poco frecuente, porque no abundan los macizos muy poco diaclasados y de gran calidad.

La clase III (Media o Regular) es normalmente la más frecuente, pero cubre un rango demasiado amplio. Las necesidades de sostenimiento de un túnel de RMR = 40 son muy diferentes de las de un túnel de RMR = 60. El primero probablemente incluirá cerchas mientras que el segundo casi nunca se construirá con cerchas. Y los espesores de hormigón proyectado o la longitud de pase serán también diferentes.

La clase IV (Mala) es demasiado amplia. Un túnel de RMR = 20 se excavará mecánicamente, y en condiciones precarias de estabilidad, mientras que en un túnel con RMR = 40 podrán utilizarse las voladuras; y las necesidades de sostenimiento, aunque importantes, permitirán unos ciclos de trabajo con rendimientos sistemáticos y tolerables.

Por ello proponemos la sustitución del sistema de 5 Clases por el de 10 Subclases. Cada subclase tiene un rango de 10 puntos y, para mantener un cierto grado de correlación con la división anterior, se denomina con el numeral romano de BIE-

TABLA 3.1. CLASIFICACIÓN MODIFICADA DE BIENIAWSKI EN SUBCLASES Y COMPARACIÓN CON LA ORIGINAL (ROMANA 2001)

RMR	MODIFICADO		BIENIAWSKI ORIGINAL	
	CLASE	DENOMINACIÓN	DENOMINACIÓN	CLASE
100	Ia	EXCELENTE	MUY BUENA	I
90	Ib	MUY BUENA		
80	II a	BUENA A MUY BUENA	BUENA	II
70	II b	BUENA A MEDIA		
60	III a	MEDIA A BUENA	MEDIA	III
50	III b	MEDIA A MALA		
40	IV a	MALA A MEDIA	MALA	IV
30	IV b	MALA A MUY MALA		
20	V a	MUY MALA	MUY MALA	V
10	V b	PÉSIMA		

Nota Las clases Ia (Excelente) y Vb (Pésima) no aparecen prácticamente nunca

NIAWSKI (I, II, III, IV, V) seguido de una letra: a para la mitad superior y b para la mitad inferior de cada clase. Estas modificaciones están ya en uso en el sistema SMR para taludes.

La tabla 3.1. recoge la comparación entre las clases de BIENIAWSKI y las subclases propuestas con la denominación de cada una.

Debe hacerse notar que la Subclase Ia ($90 < \text{RMR} < 100$) es casi imposible de alcanzar, dado que en España son muy escasas las rocas con resistencias a compresión simple superiores a 100 Mpa, y en las de resistencia inferior el RMR básico máximo teórico es 92. En el caso de orientación favorable el factor de ajuste para túneles es -2 con lo que $\text{RMR} \leq 90$.

La subclase VI ($0 < \text{RMR} < 10$) es también muy poco frecuente. De la lectura de la tabla de BIENIAWSKI (1989) parece deducirse que el valor mínimo del RMR básico es 8. Sin embargo en condiciones desfavorables o muy desfavorables el

factor de ajuste vale -10 y -12 respectivamente, lo que puede conducir a valores negativos del RMR. En cualquier caso no se puede afirmar que un $RMR < 10$ corresponda a un terreno que pueda asimilarse a una masa rocosa. Se trataría siempre de terrenos muy tectonizados, con juntas muy abiertas y/o rellenos gruesos blandos con los bordes muy lisos, con estrías de foliación ("slickensides"), y su comportamiento sería equivalente al de suelos plásticos con resistencia al corte muy reducida, por lo que se salen fuera del ámbito normal de la clasificación.

4. RECOMENDACIONES DE EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO

En las tablas 4.1. y 4.2. se presentan unas recomendaciones para la excavación y para el sostenimiento de túneles. Se utiliza el RMR, y las subclases definidas en el apartado anterior.

Como notas generales habría que puntualizar los siguientes aspectos:

▼ a) Se trata de túneles y obras subterráneas con ancho de excavación entre 10 y 14 m, que es el más corriente para vías de comunicación. Muchos túneles hidráulicos y de servicios son de ancho menor, por lo que pueden reducirse las necesidades de sostenimiento y simplificarse las de excavación. Por otra parte las cavernas de ancho mayor plantean problemas específicos, y los métodos de excavación más idóneos no se correlacionan exactamente con la propuesta de la tabla 4.1.

▼ b) La mayoría de estos túneles (de más de 10 m de anchura) se excava por voladuras pero en el futuro se utilizarán más las tuneladoras. Puede recomendarse un factor de ajuste complementario para los diversos métodos de excavación:

- Excavación con TBM $\Delta RMR = 10$
- Excavación mecánica $\Delta RMR = 5$
- Excavación por voladuras cuidadosas $\Delta RMR = 0$
- Excavación por voladuras deficientes $\Delta RMR = -5$ a -10

TABLA 4.1. RECOMENDACIONES PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES DE 10-14 m DE ANCHO (ROMANA, 2001)

RMR	CLASE	LONGITUD DE PASE (m)		PARTICIÓN DE LA SECCIÓN	MÉTODO DE EXCAVACIÓN
		MÁXIMA	RECOMENDADA		
100	I a		≥ 5	SECCIÓN COMPLETA CALOTA Y DESTROZA	TBM ABIERTO VOLADURAS ROZADORA
90	I b		≥ 5		
80	II a	16.0	≥ 5		
70	II b	9.5	4/6		
60	III a	6.0	3/4		
50	III b	4.0	2/3		
40	IV a	2.5	1/2		
30	IV b	1.75	1		
20	V a	1.0	0,5/0,75		
10	V b		0,5		
0				GALERÍA DE AVANCE GALERÍAS MÚLTIPLES CONTRABO VEDA	ESCUDO FRESADO ESCARIFICACIÓN/PALA

- Notas
- 1 La unidad para el pase es el metro (m)
 - 2 El pase máximo es el límite teórico según BIENIAWSKI
 - 3 El pase recomendado se refiere a la excavación en calota/avance y en caso de que exista galería de avance a la excavación de ensanche (y no a la propia galería)
 - 4 Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
 - 5 Las líneas de trazas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces

▼ c) En España el nivel de tensiones tectónicas suele ser bajo y la mayoría de los túneles atraviesan sierras cerca de la cumbre, a profundidades inferiores a 250 m. En estas condiciones predomina la tensión vertical, debida al peso. Pero para tensiones tectónicas horizontales, en situaciones complejas, estas recomendaciones pueden no ser adecuadas.

En cualquier caso no está de más recalcar que unas recomendaciones son solamente unas orientaciones, que permiten conocer al proyectista las órdenes de magnitud más habituales, pero que no le eximen de su obligación de estudiar y justificar en cada caso las disposiciones de proyecto, ni le permiten evadir sus responsabilidades.

TABLA 4.2. RECOMENDACIONES PARA EL SOSTENIMIENTO DE TÚNELES PARA TÚNEL DE 10-14 m DE ANCHO (ROMANA, 2001)

RMR	CLASE	BULONADO			HORMIGÓN PROYECTADO			ARMADURA		CERCHAS		MÉTODOS										
		L (m)	b/m2	s' (m)	e (cm)	CAPAS	SELLADO	MALLAZO	FIBRAS	TIPO	S' (m)	ESPECIALES										
100	I a	-	-	-	-	-	-	SENCILLO OCASIONAL														
90	I b	2/3	0.10	Ocasional	2	Ocasional	No															
80	II a	3	0.10/0.25	Ocasional	5	1	Ocasional															
70	II b	3	0.25/0.44	2 x 2/1.5 x 1.5	6-10	1/2	Si															
60	III a	3/4	0.44/0.66	1.5 x 1.5/1 x 1.5	8-15	2/3	Si	SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS	TH 21 TH 29 HEB	Ocasional											
50	III b	4	0.66/1	1 x 1.5/1 x 1	12-20	2/3	Si									1.5						
40	IV a	4/4.5	0.80/1	1 x 1.25/1 x 1	16-24	3	Si													1		
30	IV b	4.5/5	1	1 x 1	20-30	3	Si															
20	V a	-	-	-	30-40	3/4	Si	DOBLE			0.5/0.75											
10	V b	SISTEMAS ESPECIALES																				
0																						

- Notas: 1. Las unidades para el bulonado son: L, longitud en metros (m); densidad en bulones por m2 (b/m2) y s, espaciamiento en metros (m).
2. La unidad para e, espesor mínimo de hormigón proyectado, es el centímetro (cm). No se ha tenido en cuenta la sobreexcavación.
3. El número de capas de hormigón proyectado incluye la capa de sellado.
4. La unidad para S, separación entre cerchas, es el metro (m).
5. Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente.
6. Las líneas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces.

En general no es posible, ni deseable, recomendar un valor único de sostenimiento para cada subclase. Por eso se proponen intervalos. Deberá elegirse el valor más pesimista cuando los anchos de túnel sean mayores, el valor del RMR sea más bajo dentro de la subclase y/o las condiciones de la obra aconsejen mayor seguridad durante la construcción. Los valores más optimistas estarán indicados, por el contrario, para los anchos de túnel más reducidos, y/o los valores del RMR más altos dentro de la subclase.

Hay alternativas casi complementarias. Por ejemplo la sección partida más la galería de avance están indicadas cuando hay problemas de sostenimiento. Por el contrario, la sección partida con machón central están indicadas cuando hay problemas de estabilidad del frente (lo que en muchos casos se combina con el uso de cerchas).

Otras alternativas son casi contradictorias. Por ejemplo, el uso de mallazo o el de fibras como armadura del hormigón proyectado. O la excavación por galerías múltiples frente a la excavación a sección partida.

No es posible tampoco, ni deseable, incluir todos los métodos de construcción de túneles en unas recomendaciones ge-

nerales. Eso no significa que cualquier método no citado no sea apropiado en condiciones específicas. Por ejemplo, el bulonado del frente es un método muy útil de presostenimiento y garantiza la estabilidad del frente mismo. Ni este (ni otros métodos también útiles en ocasiones) se ha citado por una sola razón: ese uso es menos frecuente.

Finalmente los túneles en condiciones pésimas (RMR < 10) requieren un estudio específico, caso por caso, que se sale del ámbito de cualquier clasificación. Normalmente se construirán utilizando métodos especiales muy mecanizados, o bien el terreno se mejorará con tratamientos previos a la construcción del túnel.

5. COMENTARIOS SOBRE LAS RECOMENDACIONES DE EXCAVACIÓN

5.1. Partición de la sección

BIENIAWSKI recomendaba la excavación a sección completa para las masas rocosas de buena calidad (RMR > 60). Esta recomendación no

solía seguirse en España donde la gran mayoría de los túneles se excavaban a sección partida. Sin embargo, los avances en la mecanización y la mejora de los equipamientos permiten actualmente excavar a sección completa, con rendimientos altos cuando las necesidades de sostenimiento son reducidas (y no se emplean cerchas).

En las categorías medias a malas (20 < RMR < 60) BIENIAWSKI recomendaba sección partida en dos fases, y para las muy malas (RMR < 20) galerías múltiples.

Estas recomendaciones se han matizado para adaptarlas a la práctica española:

▼ Sección completa (RMR > 60)

Posible a partir de RMR > 50 y recomendable (con buena mecanización) para RMR > 60.

▼ Calota y destroza (RMR > 30)

Posible (con contrabóveda) para 20 < RMR < 30 y recomendable para RMR > 30. El gálibo mínimo para el trabajo en la calota suele ser de 4.5 / 5 m por lo que en túneles de altura



Túnel en la Variante de Gandía de la N-340 (Valencia).

reducida la destroza puede ser muy pequeña (de 1 a 2 m de altura) y puede eliminarse o convertirse en un tajo de regulación. En general, podrán excavarse completamente por separado la calota y la destroza siempre que la calidad del macizo rocoso no sea mala o muy mala. Cuando la calidad del macizo es mala y hay riesgos de inestabilidad del frente suele ser útil excavar el avance dejando un machón central sin excavar.

▼ Galería de avance ($10 < \text{RMR} < 40$)

Una galería de avance llevada ligeramente por adelantado puede ser útil en terrenos de calidad media y túneles de gran anchura o en terrenos de calidad mala y túneles de ancho medio (10-12 m). Lo normal es llevar algo adelantada esa galería, aunque en cavernas de estaciones y/o hidroeléctricas puede ser útil excavar la galería en toda su longitud, como un último método de reconocimiento del terreno.

▼ Galerías múltiples ($0 < \text{RMR} < 30$)

Se trata del llamado método alemán (con dos o cuatro galerías excavadas previamente en los hastiales) o de métodos

más complejos con galerías tangentes excavadas y hormigonadas sucesivamente. Son sistemas adecuados para túneles en macizos rocosos de calidad mala a muy mala (que son una transición a los suelos), con poca cohesión y que necesitan una entibación cerrada.

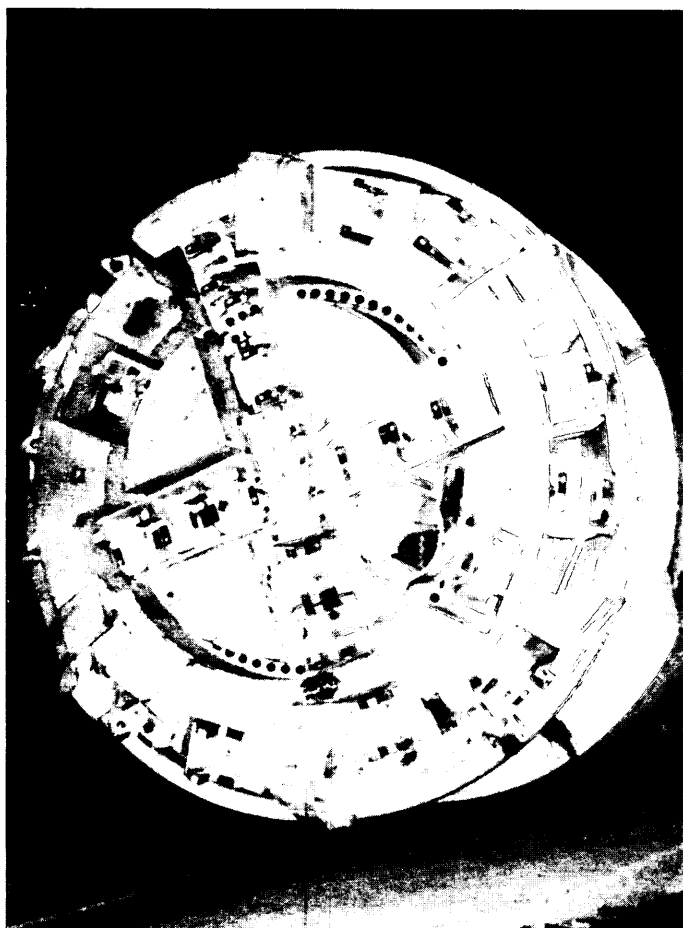
▼ Contrabóveda ($0 < \text{RMR} < 30$)

Necesaria cuando la sección puede cerrarse por la base. Es un método complementario con todos los demás, que requiere una construcción muy próxima a los frentes de excavación.

5.2. Longitud de pase

En la tabla 4.1. se han recogido las longitudes máximas teóricas de excavación según BIENIAWSKI. En el estado actual de la mecanización no son prácticos avances superiores a 5 m (que son posibles a partir de $\text{RMR} > 60$, lo que coincide con el intervalo donde se puede recomendar la excavación a sección completa).

Para macizos de calidad media a mala se recomienda graduar la longitud de pase variándola entre 4 m ($\text{RMR} = 60$) y 1 m



Túnel con TBM (Trasvase Orellana-Zujar). Badajoz.

($20 < \text{RMR} < 30$). Los macizos de calidad muy mala ($20 > \text{RMR}$) requieren pases muy reducidos inferiores a 1 m (excepto en el caso en que se haya utilizado paraguas de presostenimiento).

5.3. Método de excavación

Las recomendaciones sobre el método de excavación se refieren sobre todo a la organización general del túnel y a sus necesidades de sostenimiento, con objeto de obtener unos rendimientos razonables. Cualquier método de excavación es posible en casi todos los casos, pero sólo resulta adecuado en determinados intervalos. Por otra parte la dureza y/o abrasividad de la roca pueden suponer una limitación añadida para los métodos de excavación mecánica.

▼ TBM abierto ($60 < \text{RMR}$)

El uso de tuneladoras abiertas es ventajoso cuando las necesidades de sostenimiento son reducidas y ese sostenimiento puede instalarse detrás de la cabeza de perforación. Existen clasificaciones específicas para estos casos pero en general puede

esperarse un funcionamiento satisfactorio si el macizo rocoso es de calidad buena ($\text{RMR} < 60$) y tolerable si es de calidad media a buena ($50 < \text{RMR} < 60$). Si el RMR es inferior a 50 la excavación se convierte en muy trabajosa, y sólo tiene sentido económico y de plazo la utilización de TBM abierto si los tramos de mala calidad son de longitud reducida.

▼ Voladuras ($\text{RMR} > 40$)

Es el método más versátil, y por lo tanto el más frecuente. Aunque es posible excavar por voladuras terrenos de calidad mala o muy mala, no suele resultar práctico hacerlo.

▼ Rozadora ($30 < \text{RMR} < 90$)

Teóricamente la rozadora (máquina de ataque puntual y cuerpo bajo y compacto) puede utilizarse con gran variedad de terrenos. Su limitación no es la calidad global del macizo rocoso, sino la resistencia mecánica (a tracción y a compresión) de la roca matriz. Por otra parte el ciclo de trabajo es más corto (no hay voladura ni ventilación de los gases de la explosión), y además la excavación y el sostenimiento son mucho más compatibles cuando se trabaja con rozadoras que cuando la excavación se realiza con tuneladora TBM o por voladuras. Por eso pueden utilizarse rozadoras con roca de mala calidad ($20 < \text{RMR} < 30$) aunque puede resultar más económico el uso de métodos más simples. Los terrenos de clase Ia ($\text{RMR} > 90$) resultarán en general demasiado duros para su excavación con rozadora.

▼ Fresado ($\text{RMR} < 30$)

Cada vez es más frecuente la excavación por fresado con máquinas que montan una fresa de potencia media sobre un brazo de retroexcavadora. En teoría son como rozadoras de pequeño tamaño, pero en la práctica el alcance y la movilidad del brazo facilitan mucho la excavación en secciones anchas, o el perfilado del gálibo final. Por eso pueden utilizarse, también, como medio complementario, en masas rocosas de calidad media ($30 < \text{RMR} < 50$).

▼ Escarificación / Pala ($\text{RMR} < 20$)

Los macizos de calidad muy mala pueden excavar prácticamente como suelos, con palas convencionales y/o escarificar (por ejemplo para excavar la destroza o la contrabóveda). El método puede usarse, para la destroza, hasta la subclase $20 < \text{RMR} < 30$. Para valores del RMR más altos el sistema no resulta económico en general.

▼ Escudo ($\text{RMR} < 20$)

El escudo fue desarrollado para excavar suelos, cuya cohesión y capacidad portante son muy bajos. En macizos roco-

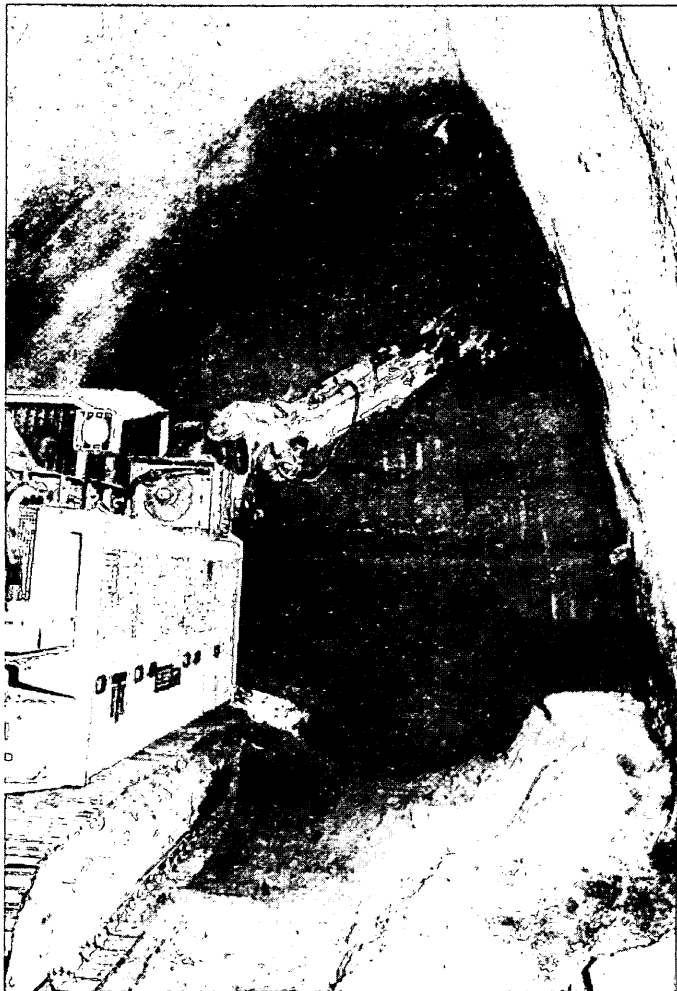
sos de calidad muy mala el escudo (simple o doble) resulta muy adecuado. Para $RMR > 30$ el escudo no resulta necesario desde el punto de vista de la excavación, pero puede ser conveniente con estrategias combinadas de excavación y sostenimiento-revestimiento (por ejemplo con dovelas).

6. COMENTARIOS SOBRE LAS RECOMENDACIONES DE SOSTENIMIENTO

6.1. Ritmo de construcción del sostenimiento

Dependiendo de la calidad del macizo rocoso y del tipo de roca puede ser necesario esperar algo más de 10 m de distancia al frente para completar la última parte del sostenimiento. Es frecuente que los empujes y convergencias finales se produzcan a 2 ó 3 anchos del túnel como distancia al frente (20 o 40 m). Se trata de un tema que debe estudiarse

**Túneles del Pardo (Autovía M-40, Madrid).
Excavación galería lateral por el nuevo Método Austriaco.**



analíticamente (mediante el método de las curvas características ó métodos similares) y comprobarse en obra mediante instrumentación. Por lo tanto, creemos que cae fuera del ámbito de las clasificaciones geomecánicas.

6.2. Bulonado

En España muchos técnicos cuestionan la eficacia del bulonado para macizos rocosos de calidad geotécnica muy mala o pésima. Además es poco frecuente utilizar en túneles bulones de más de 5 a 6 m de longitud.

El bulón más usado en España es el de acero corrugado de 25 mm de diámetro (En las recomendaciones de BIE-NIAWSKI se menciona el de $\varnothing 22$ mm). El método de adherencia puede ser la resina o el mortero (mejor cuando hay problemas de perforación o cavidades microkársticas). Pero es creciente el uso de los bulones de expansión mecánica. Sin entrar en la polémica sobre su durabilidad, podemos indicar que presentan ventajas para valores altos del RMR (por su mecanización fácil) y en los valores muy bajos (porque pueden adaptarse a perforaciones irregulares). Si se utilizan debe tenerse en cuenta que su resistencia es menor, por lo que hay que aumentar la densidad de bulonado.

Cuando el sostenimiento es provisional, y ha de demolerse posteriormente (por ejemplo en túneles piloto), los bulones más adecuados son los de fibra de vidrio o los de expansión mecánica, porque en ambos casos se cortan fácilmente.

El espaciamiento entre bulones se refiere a mallas cuadradas de implantación y es sólo indicativo. En cada caso debe ajustarse la distribución a las densidades de bulonado propuestas y a la longitud real de pase.

6.3. Hormigón proyectado

Se indican los espesores mínimos más usados. El número de capas incluye la capa inicial de sellado, que no es necesaria para macizos rocosos de calidad muy buena. Los espesores de cada capa no deben exceder de 10 cm para evitar problemas de adherencia.

Los espesores reales dependen de la precisión de la excavación. Si se deben rellenar las sobreexcavaciones, y/o cubrir las cerchas, los espesores reales pueden ser mucho mayores en algunos puntos.

Por lo menos es tan frecuente utilizar fibras metálicas como mallazo para armar el hormigón proyectado. Las fibras tienen ventajas de mecanización, rendimiento y ductibilidad del hormigón a flexo-tracción, y en países como Inglaterra, Suecia o Noruega solo se utilizan fibras metálicas (que están prescritas como componente por el sistema Q de BARTON). En países de tradición alemana (Alemania, Austria, Suiza) persiste más el mallazo, que tiene la ventaja de exigir un espesor mínimo de hormigón proyectado.



Túneles del Rabo de la Sartén (Contreras). Autovía A-3 Madrid-Valencia.

En las recomendaciones sugerimos el uso de fibras metálicas para macizos de calidad media a buena y el de mallazo para macizos de calidad mala a muy mala.

Cuando no es necesario el hormigón proyectado (en macizos de calidad muy buena) puede ser conveniente el uso ocasional de mallazo como protección contra la caída de cuñas rocosas aisladas.

6.4. Cerchas

Es frecuente en España el uso de cerchas en macizos rocosos de calidad media ($RMR < 50$). El tipo de cercha depende tanto de la calidad del macizo rocoso como del ancho del túnel. En estas recomendaciones se consideran cerchas ligeras las TH-21, y medias a pesadas las TH-29 y las HEB. En túneles de 5 / 6 m de ancho se utilizarían las cerchas TH-16 como ligeras y las TH-21 como pesadas.

En todos los casos las cerchas se deben arriostrar entre sí mediante tresillones. El uso de forros de entibación (mediante chapas continuas o pequeñas tablestacas) es poco frecuente en España, donde se prefiere sustituirlos por mallaos cuando es necesario en macizos de calidad mala a muy mala.

6.5. Método Bernold

El método BERNOLD integral (con cerchas de montaje, chapas continuas solapadas y relleno de hormigón) sigue siendo una opción válida para macizos de calidad mala o muy mala. Sin embargo su utilización ha decaído en España debido a la popularización del Nuevo Método Austriaco.

En todo caso la combinación de cerchas HEB con chapas BERNOLD, apoyadas sobre las alas de las cerchas, y con relleno de hormigón bombeado o proyectado, constituye un mé-

