

Selección de tuneladoras para macizos rocosos con frentes estables

En este trabajo se presentan los últimos desarrollos de la metodología basada en el llamado *Rock Mass Excavability (RME) Index*, que ha sido desarrollado con la colaboración del ADIF y la financiación de Geocontrol. Mediante el índice *RME* es posible evaluar la dificultad que presentan los terrenos para ser excavados, predecir los avances de las tuneladoras, seleccionar el tipo de tuneladora más apropiado y predecir el consumo de cortadores. Hay que señalar que el índice *RME* no es aplicable a los terrenos que generan frentes inestables, en los que es necesario aplicar una presión para estabilizarlos.

Con las tuneladoras se pueden conseguir resultados impresionantes en la construcción de túneles; tal como ha sucedido en las sucesivas ampliaciones del *Metro de Madrid*, donde con facilidad se alcanzaban avances del orden de 1000 m/mes; en la construcción del *Túnel de Guadarrama* (AVE Madrid – Valladolid) donde se han conseguido –a lo largo de 14 km de excavación– avances medios de 530 m/mes, y en el *Túnel de La Cabrera* (AVE Madrid – Levante) donde se han batido ampliamente todos los récord mundiales.

A pesar de estos grandes éxitos, no hay que olvidar que las tuneladoras constituyen un sistema muy rígido en el que es muy difícil introducir modificaciones durante la obra y con el que las posibilidades de actuar sobre el terreno son mucho más reducidas que en los métodos convencionales.

Estas circunstancias han sido el origen de algunos fracasos importantes, entre los que cabe citar:

- **Túnel de Pinglin**, actualmente denominado *Túnel de Hsuehshan* (Taiwan), cuya construcción se inició en 1991 y finalizó en 2004. En este túnel dos tuneladoras tipo Doble-Escudo, de 11,8 m de diámetro, quedaron atrapadas durante más de un año.
- **Túnel de Hallandsås**, que formará parte de la línea de alta velocidad entre Malmö y Gotemburgo (Suecia), cuya construcción fue iniciada en 1992 y se piensa que finalice en 2015. En este túnel una tuneladora tuvo que ser retirada; pues se hundió en unas argilitas sin poder avanzar. Posteriormente la excavación se retomó mediante medios convencionales y, actualmente, se está utilizando de nuevo una tuneladora.

La mayor dificultad con que puede encontrarse una tuneladora son los cambios imprevistos del terreno y, por esa razón, se considera imprescindible que las previsiones sobre los avances de las tuneladoras estén relacionadas directamente con la calidad del terreno; ya que, en

caso contrario, la probabilidad de que las previsiones se aproximen a la realidad es muy baja.

Evaluación de la excavabilidad del terreno

Hasta ahora no existía una metodología específica para valorar la excavabilidad del terreno; ya que los índices habitualmente empleados para evaluar el comportamiento tensional del terreno, como el *RMR* de Bieniawski o el *Q* de Barton, no tienen en cuenta los parámetros que habitualmente están relacionados con excavabilidad y su aplicación para predecir los avances de las tuneladoras lleva consigo una excesiva dispersión (Sapigni et al. 2002).

Para solventar este problema, en base a las experiencias habidas durante la construcción de los *Túneles de Guadarrama*, *San Pedro y Abdalajís* en España, así como las obtenidas durante la construcción del *Túnel de Katzberg* (Alemania) y los del complejo hidroeléctrico *Gilge Gibe II* (Etiopía) se desarrolló el índice denominado *Rock Mass Excavability (RME)*; que, inicialmente, se orientó hacia la previsión de los avances de las tuneladoras.

El *RME* fue presentado en el Congreso de la ITA en Seoul (Bieniawski et al. 2006) y du-

Palabras clave: ABRASIVIDAD, AVANCES DE TUNELADORA, CONSUMO DE CORTADORES, EXCAVABILIDAD, ÍNDICE CERCHAR, RME.



Bieniawski, Richard. Bieniawski Design Enterprise.

CELADA, Benjamín. GEOCONTROL, S.A.

TARDÁGUILA, Isidoro. GEOCONTROL, S.A.

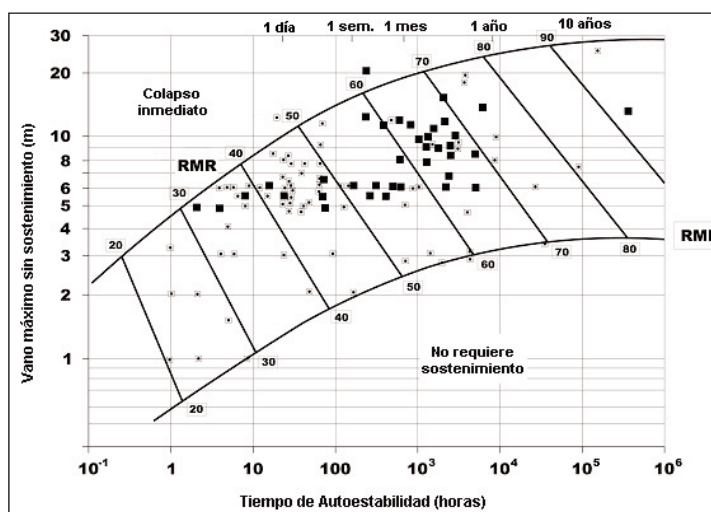
rante 2007 y 2008 se continuaron los trabajos de investigación para mejorar su aplicación.

El *RME* tiene una estructura similar a la del *RMR*, ya que se calcula sumando la valoración de cinco parámetros; aunque se diferencia de él en que tres de estos cinco parámetros están relacionados con la excavabilidad.

Los parámetros que es necesario evaluar para calcular el *RME* son los siguientes:

1. Resistencia a compresión simple de la roca intacta (σ_c): (0-25 puntos)
2. *Drilling Rate Index (DRI)*: (0-15 puntos)
3. Discontinuidades en el frente de excavación: (0-30 puntos)
4. Tiempo de autoestabilidad del frente: (0-25 puntos)
5. Afluencia de agua en el frente: (0-5 puntos)

La resistencia a compresión simple y el índice *DRI* pueden ser determinadas mediante sencillos ensayos de laboratorio, la valoración del efecto de las discontinuidades en el frente del túnel exige hacer un levantamiento geotécnico del terreno y el tiempo de autoestabilidad puede calcularse mediante el ábaco de la *Fig. 1*.



[Figura 1] .- Ábaco para el cálculo del tiempo de autoestabilidad.

Es conveniente recordar que para calcular el tiempo de autoestabilidad hay que utilizar el **RMR** del terreno excavado con tuneladora (**RMR_{TBM}**) que está definido (Alber, 1996) por la relación:

$$RMR_{TBM} = 0,80 RMR + 20$$

Finalmente, la valoración de la posible afluencia de agua en el terreno debe estimarse en función de las características hidrogeológicas locales.

En el **Cuadro 1** se muestran los criterios medios para la evaluación de los cinco parámetros que integran el **RME**; aunque, para evitar interpolaciones y conseguir mayor precisión es más recomendable utilizar los gráficos que se presentan en las **Figs. 2 y 3**.

Para valorar la homogeneidad del frente del túnel se ha considerado que los terrenos se pueden clasificar en tres grandes grupos; según el valor de la resistencia a compresión simple de la roca intacta (σ_{ci}):

- Rocas semi-duras: $\sigma_{ci} < 45$ MPa
- Rocas duras: $45 \text{ MPa} < \sigma_{ci} < 120$ MPa
- Rocas muy duras: $\sigma_{ci} > 120$ MPa

A partir de estos tres grupos se han considerado seis situaciones típicas para el frente de un túnel; que, con sus valoraciones, se muestran en la **Fig. 4**.

A partir del valor del **RME** la excavabilidad de los terrenos puede clasificarse en cuatro grandes grupos:

- I.- Excelente: $80 < RME < 100$
- II.- Muy buena: $60 < RME < 79$
- III.- Buena: $40 < RME < 59$
- IV.- Mala: $RME < 40$

Estimación de la velocidad de avance de las tuneladoras

Para estimar la velocidad de avance de una tuneladora se podría partir de la penetración neta, definida por los milímetros avanzados en cada rotación de la cabeza de la tuneladora, o de la velocidad de penetración, expresada en mm/minuto; pero para llegar a obtener el avance en un día de trabajo es necesario conocer el porcentaje de tiempo en el que la tuneladora está realmente excavando.

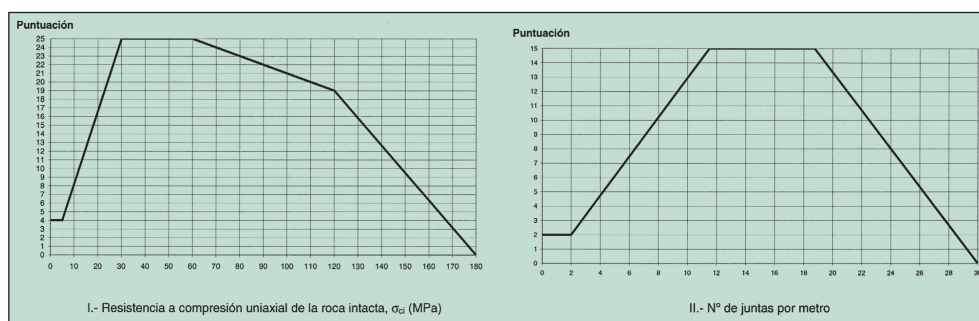
Como este parámetro es difícil de conocer con precisión; en la metodología del **RME**, se ha considerado preferible trabajar con los avances medios diarios (**ARA**) conseguidos en tramos *normales* de un túnel.

Estos tramos *normales* deben reunir las siguientes características:

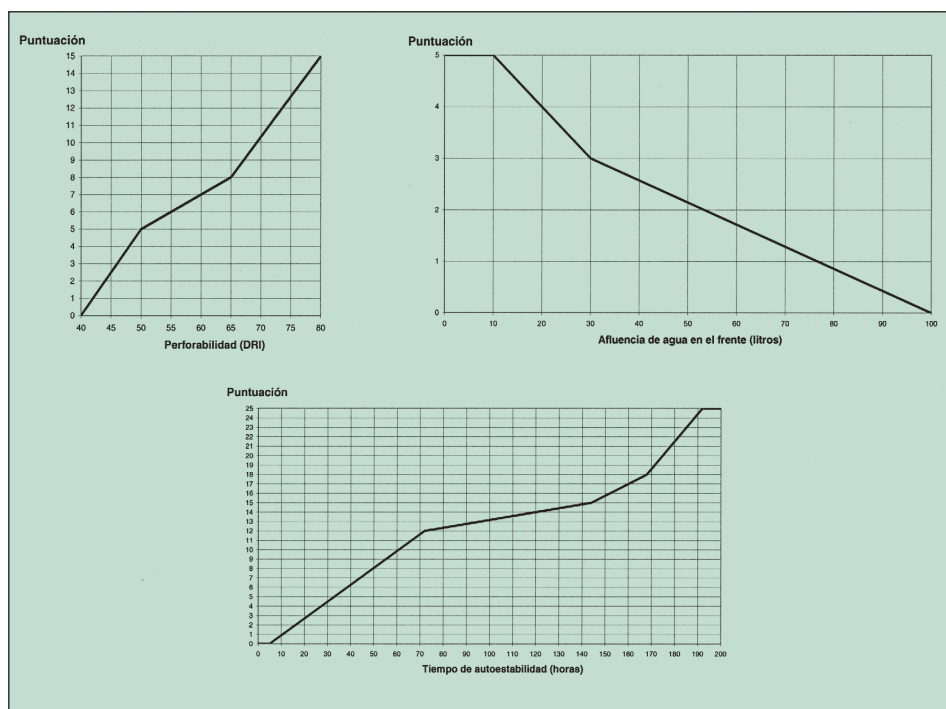
- La Longitud debe ser superior a 30 m.
- Las características geomecánicas del terreno no deben variar sensiblemente dentro del tramo.
- En el tramo no se consideran reparaciones extraordinarias de mantenimiento de la tuneladora o del back-up.

Resistencia a Compresión uniaxial para la roca intacta [0 - 25 puntos]										
σ_{ci} (MPa)		<5		5-30		30-90		90-180		>180
Puntuación para el valor central		4		14		25		14		0
Perforabilidad [0 – 15 puntos]										
DRI		>80		80-65		65-50		50-40		<40
Puntuación para el valor central		15		10		7		3		0
Discontinuidades en el frente de excavación [0 – 30 puntos]										
Homogeneidad			Nº de juntas por metro					Orientación con respecto al eje del túnel		
Homogéneo		Mixto	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	Perpendicular	Oblicua	Paralela
Puntuación para el valor central	10	0	2	7	15	10	0	5	3	0
Tiempo de autoestabilidad [0 – 25 puntos]										
Horas		<5		5-24		24-96		96-192		>192
Puntuación para el valor central		0		2		10		15		25
Afluencia de agua [0 – 5 puntos]										
Litros/seg.		>100		70-100		30-70		10-30		<10
Puntuación para el valor central		0		1		2		4		5

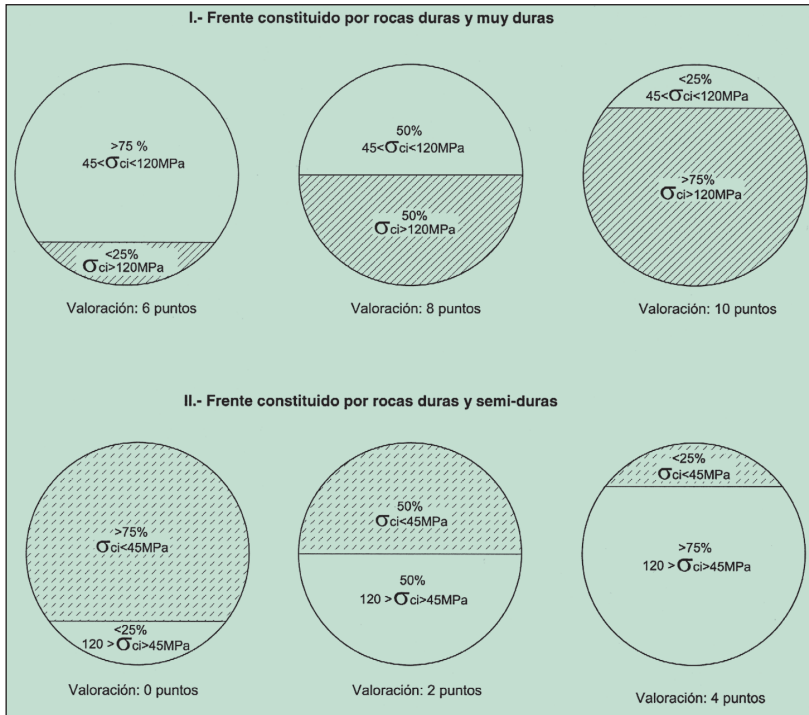
■ [CUADRO 1] .- Valoraciones medias de los cinco parámetros que integran el RME08.



■ [Figura 2] .- Gráficas para la valoración de σ_{ci} y del número de discontinuidades en el frente.



■ [Figura 3] .- Gráficas para la valoración del DRI, Tiempo de Autoestabilidad y Afluencia de agua en el frente.



[Figura 4] .- Valoración del grado de homogeneidad del frente.

Estos datos se han clasificado y analizado y de ellos se ha obtenido información de 336 tramos *normales* de túneles, que superan una longitud de 26 km y corresponden a tramos construidos con los tres tipos de tuneladoras más habituales: *TMB Abierta*, *Escudo Simple* y *Doble Escudo*.

Para cada uno de estos tramos se ha calculado el avance medio por día ARA_R y, después de homogeneizado para obtener el ARA_T , se han correlacionado con el **RME**.

Como resultado del análisis estadístico realizado se han obtenido las correlaciones que se presentan en las **Figs. 6 y 7**.

La **Figura 6** es de aplicación para los túneles excavados en macizos con rocas semi-duras (σ_{ci} < 45 MPa); mientras que la **Figura 7** es de aplicación cuando las rocas excavadas pueden calificarse de duras o muy duras (σ_{ci} > 45 MPa).

En el caso de que se excaven macizos con rocas de dureza media; si el **RME** es superior a 75 puntos, la tuneladora más ventajosa es el *Doble-Escudo* y si el **RME** es inferior a 75 puntos, la tuneladora más recomendable es el *Escudo-Simple*.

Obviamente, dado que un Doble-Escudo puede trabajar como Simple Escudo, los *Dobles-Escudos* pueden cubrir con ventaja todo el campo de variación del **RME** para rocas con σ_{ci} < 45 MPa; siempre y cuando el Doble-Escudo deje de utilizar los *grippers* y pase

- A lo largo del tramo el tiempo dedicado a la excavación debe estar comprendido entre el 30 % y el 60 % del tiempo disponible.

Dado que cada túnel tiene unas características determinadas, por lo que se refiere al diámetro de excavación, longitud del túnel y cualificación del equipo que conduce la tuneladora; resulta necesario definir un **ARA** teórico u homogeneizado, cuya expresión es la siguiente:

$$ARA_T = \frac{ARA_R}{F_E \cdot F_A \cdot F_D}$$

Siendo:

ARA_R = Avance medio diario, obtenido en un tramo dado de un túnel.

F_E = Factor que depende de la capacitación de la tripulación de la tuneladora.

F_A = Factor que depende de la adaptación al terreno excavado.

F_D = Factor que depende de diámetro de excavación.

El factor de equipo (F_E) está definido por la expresión:

$$F_E = F_{E1} + F_{E2} + F_{E3}$$

Y las variables se determinan con los criterios F_{E1} , F_{E2} y F_{E3} contenidos en el **Cuadro II**.

El factor de adaptación al terreno excavado (F_A) está definido por la gráfica que se muestra en la **Fig. 5**, en función de la longitud de túnel que lleva excavada la tuneladora con la misma tripulación

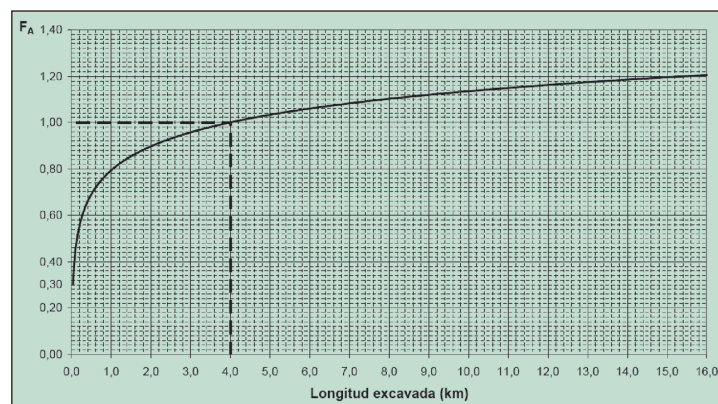
Finalmente el factor que depende del diámetro de excavación, F_D , está definido por:

$$F_D = \frac{10}{D(m)}$$

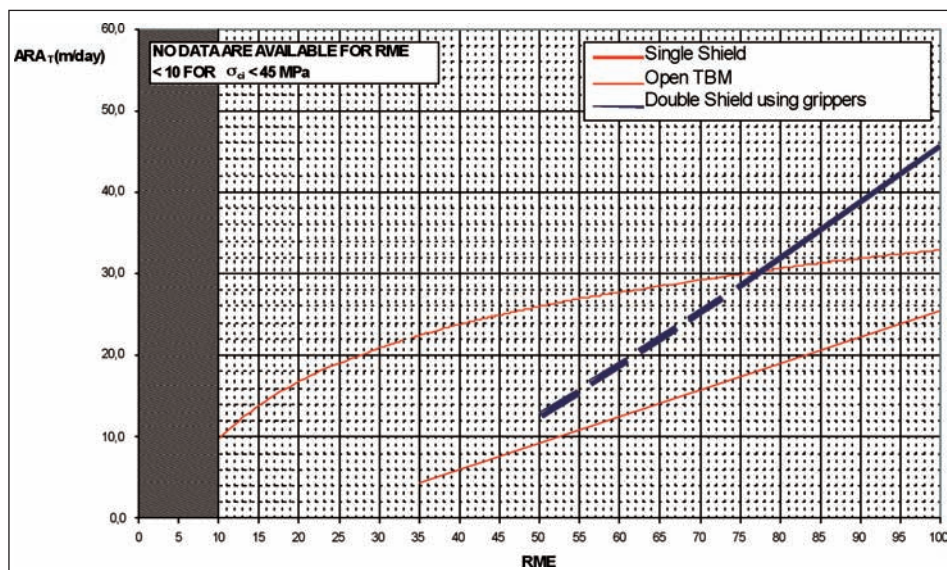
Durante el período 2004-2007 se han ido recogiendo datos sobre diversos túneles construidos con tuneladoras; totalizando una longitud acumulada de más de 100 km de túneles.

EXPERIENCIA DEL CONTRATISTA	SIN EXPERIENCIA	1 a 5 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA	6 a 10 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA	11 a 20 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA	>21 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA
Valor de F_{E1}	0	0,05	0,10	0,15	0,2
CUALIFICACIÓN DEL PERSONAL DE LA TUNELADORA	POCO ENTRENADO Y SIN EXPERIENCIA EN TUNELADORAS	ENTRENADO; PERO SIN EXPERIENCIA EN TUNELADORAS	ENTRENADO Y CON EXPERIENCIA EN TUNELADORAS		
Valor de F_{E2}	0	0,1	0,15		
SUMINISTRO DE REPUESTOS	EXISTENCIA DE REPRESENTANTE LOCAL DEL FABRICANTE DE LA TUNELADORA			TIEMPO NECESARIO PARA RECIBIR REPUESTOS	
	SI			≤ 1 MES	> 1 MES
Valor de F_{E3}	0,075			0,075	0

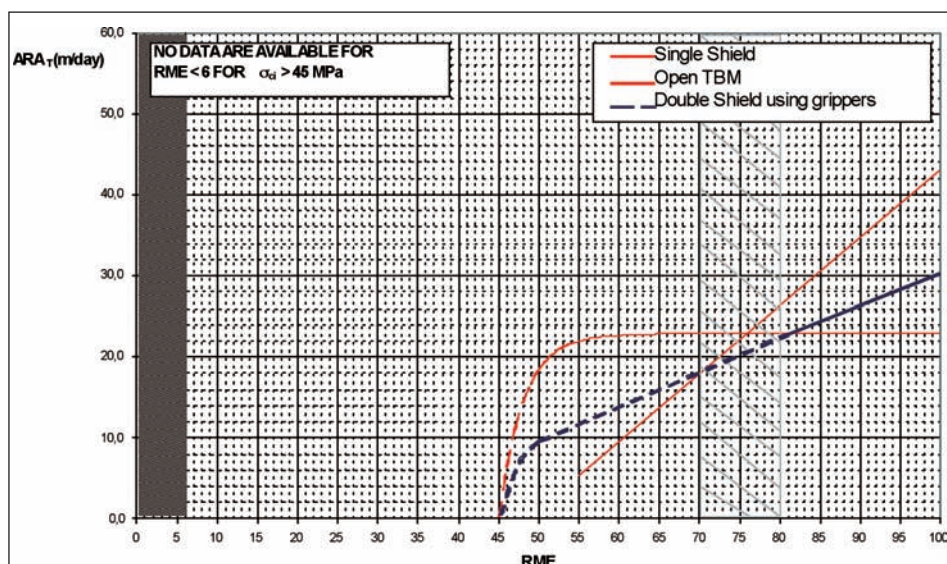
[CUADRO II] .- Criterios para evaluar F_{E1} , F_{E2} y F_{E3} .



[Figura 5] .- Definición de F_A en función de la longitud excavada.



[Figura 6] .- Avances medios diarios excavando en rocas semi-duras ($\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$).



[Figura 7] .- Avances medios diarios excavando en rocas duras o muy duras ($\sigma_{ci} > 45 \text{ MPa}$).

a apoyarse en los anillos de dovelas cuando el **RME** baje de 75 puntos.

Al excavar macizos con rocas de dureza media ($\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$) las **TBM** abiertas son las tuneladoras que consiguen peores resultados; lo cual es debido a que en estos terrenos, debido a su baja resistencia, es preciso colocar sostenimientos pesados que ralentizan el avance de las **TBM** abiertas.

En el caso de los macizos con rocas duras o muy duras ($\sigma_{ci} > 45 \text{ MPa}$), a partir de la Fig. 7 se pueden obtener las tres conclusiones siguientes:

- 1ª Para valores del **RME** comprendidos entre 70 y 80 puntos con los tres tipos de tuneladoras se obtienen avances similares.
- 2ª Si el **RME** es superior a 80 puntos, las tuneladoras que proporcionan los mejores resultados son las **TBM** abiertas.

3ª Si el **RME** es inferior a 70 puntos, las tuneladoras que proporcionan los mejores resultados son los **Escudos Simples**.

Tiempo neto de excavación

En general los túneles construidos con tuneladoras tienen varios kilómetros de longitud y en su construcción se suele atravesar tramos de terreno de características muy diferentes.

Por ello; para escoger el tipo de tuneladora más conveniente es necesario determinar el tiempo neto de excavación del túnel dividiéndolo en tramos en los que el **RME** sea prácticamente homogéneo y calculando el **ARA_R**, en cada tramo y para cada tipo de tuneladora, mediante las correlaciones antes presentadas.

A partir de la longitud de cada tramo, se puede calcular el tiempo que se invertirá en excavarlo y, evidentemente, la tuneladora más

recomendable será aquella que permita un menor tiempo neto de excavación para la suma de todos los tramos del túnel.

Hay que tener en cuenta que la metodología del **RME** no es aplicable a los tramos en falla; ya que las correlaciones entre el **RME** y el **ARA_T** se han determinado trabajando con datos de tramos *normales*.

Para calcular el tiempo previsto para la excavación del túnel, al tiempo neto de excavación hay que sumar el tiempo dedicado al paso de las fallas y el necesario para hacer las reparaciones generales, que no están incluidas en el ciclo de trabajo habitual.

Paso de las zonas de falla

Se consideran *zonas de falla* los tramos del terreno en los que su excavabilidad resulta más difícil que la del resto del túnel debido a la presencia del propio plano de falla, de la roca mecanizada a ambos lados de éste y de la roca, contigua a la zona mecanizada, que ha resultado alterada por la circulación de agua al disminuir la permeabilidad por efecto de la falla.

Hay que tener presente que, con esta definición, en los túneles con bajo recubrimiento, en los cuales la alteración producida por la circulación del agua es intensa, una simple falla de 1 m de espesor puede dar lugar a una zona de falla que tenga un espesor de varias decenas de metros.

A pesar de que las zonas de falla son siempre tramos de dificultad elevada, en los túneles construidos con tuneladora, hay que tener presente que en muchos de ellos se pueden obtener avances medios comprendidos entre 5 y 10 m/día; siempre que se den las dos condiciones siguientes:

- I.- La zona de falla está suficientemente reconocida; de tal forma que puede evitarse que la tuneladora se hique en ella de improviso.
- II.- La tuneladora dispone de los medios tecnológicos necesarios para el tratamiento de las inestabilidades que se produzcan en el frente de excavación.

En base a las experiencias habidas en los *Túneles de Guadarrama, Abdalajís y San Pedro*, en el año 2008 se presentaron unas estimaciones sobre las posibles velocidades de avance en las zonas de falla (*Bieniaswki et al.* 2008) que se reproducen en el **Cuadro III**.

Estas estimaciones están hechas atendiendo al recubrimiento sobre clave en la zona de falla, cuyo aumento es desfavorable debido a la baja calidad mecánica de los terrenos fallados; a la presencia de agua que siempre es desfavorable, de manera especial en las fallas de naturaleza arcillosa y al tipo de terreno mecanizado por la falla, que si es de tipo bloque, es más desfavorable que si se trata de un terreno arcilloso.

RECUBRIMIENTO (m)	< 50			50-200			> 200 (sin squeezing extremo)		
AGUA EN EL FRENTE $\left(\frac{l}{\text{min.m}^2}\right)$	SECO			SECO			SECO		
	< 0,1			< 0,1			< 0,1		
	> 0,1			> 0,1			> 0,1		
TIPO DE TERRENO	Bloques	Arcilloso	Cualquiera	Bloques	Arcilloso	Cualquiera	Bloques	Arcilloso	Cualquiera
AVANCE MEDIO CON ESCUDO $\left(\frac{m}{\text{día}}\right)$	10-20	> 40	5-20	1-10	10-20	> 40	5-15	1-5	5-15
AVANCE MEDIO CON TBM $\left(\frac{m}{\text{día}}\right)$	10-15	5-15	1-5	5-15	1-10	1-5	5-10	1-5	< 1

[CUADRO III].- Estimación de los avances en zonas de fallas.

Consumo de cortadores

El consumo de cortadores en las tuneladoras es un índice que tiene una fuerte incidencia en los resultados de las tuneladoras; directamente por el coste de los cortadores cambiados e indirectamente por el tiempo de excavación que se pierde al cambiar los cortadores.

Para hacer una previsión sobre el consumo de cortadores se consideró necesario complementar el **RME** con un parámetro relacionado específicamente con la abrasividad del terreno; pues ninguno de los cinco parámetros que integran el **RME** está relacionado directamente con la abrasividad.

Después de analizar los distintos ensayos actualmente utilizados para evaluar la abrasividad del terreno, *Nilsen et al* (2006) y *Thuro y Käsling* (2009) se llegó a la conclusión de que el más representativo de todos es el **Índice de Abrasividad Cerchar (IAC)**.

En la **Fig. 8** se ilustra el procedimiento para la determinación del **IAC**; que es realmente simple, pues consiste en desplazar una punta de acero, bajo una carga de 7kg, sobre una muestra de roca a lo largo de 1 cm.

El **IAC** se determina como la pérdida de la altura de la punta de acero, expresada en décimas de milímetro y presenta los valores característicos que se muestran en el **Cuadro IV**.

En ensayo para determinar el **IAC** es muy fácil de realizar y este índice, además, presenta la ventaja de estar muy bien correlacionado con el contenido de cuarzo equivalente de la roca; tal como se muestra en la **Fig. 9**, (*Thuro y Käsling*, 2009).

Para encontrar una relación entre el **RME**, el **IAC** y el número de cortadores cambiados, a lo largo de 2008 se revisaron los datos de los 336 tramos *normales* de la base de datos y se realizaron ensayos para determinar el **IAC** de los tramos en los que no se conocía este índice.

Este trabajo fue parcialmente financiado por el **Instituto Madrileño de Desarrollo (IMADE)**, con el contrato **PIE/312/2008** y por el programa **PROFIT** del Ministerio de Industria, con el contrato **IAP-530000-2008-50**.

Al igual que en el caso de las correlaciones entre el **RME** y el **ARA_r**, para correlacionar el

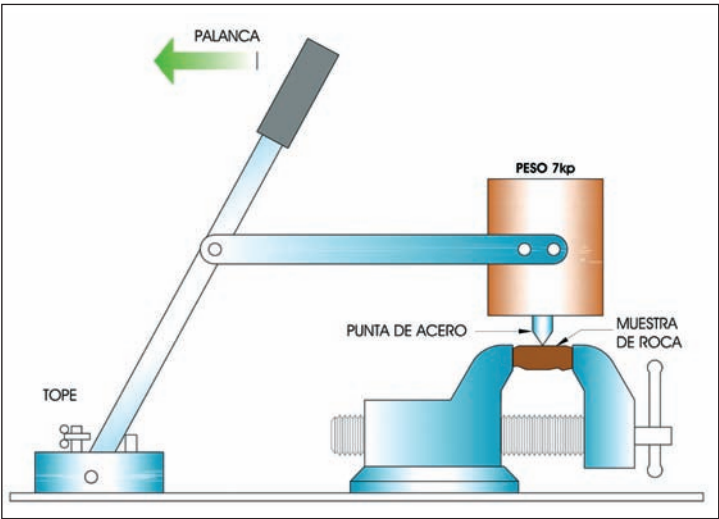
RME y el **IAC** con el **ARA** se han dividido los terrenos en dos grandes grupos; el primero está integrado por las rocas de dureza media,

$\sigma_{cl} < 45$ MPa, y el segundo por las rocas duras y muy duras, $\sigma_{cl} > 45$ MPa.

En la **Fig. 10** se presenta la correlación encontrada entre el **RME** e **IAC** con el cociente entre el número de cortadores cambiados en un tramo y los metros cúbicos excavados en ese mismo tramo.

En esta figura se aprecia que el consumo de cortadores es máximo para valores del **RME** comprendidos entre 55 y 60 puntos.

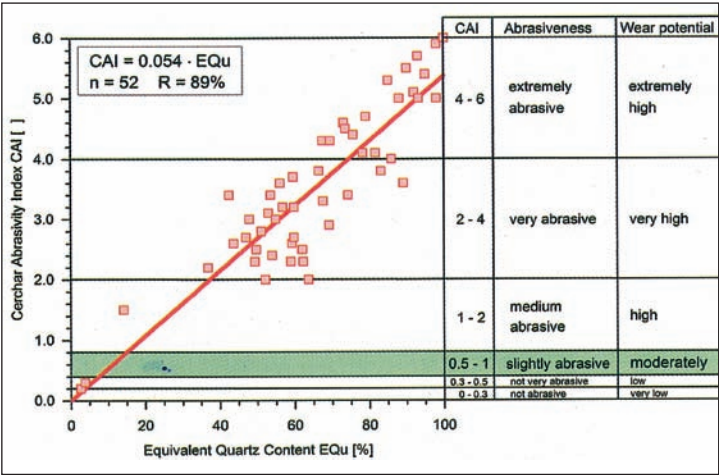
En el caso de la curva correspondiente a las rocas muy abrasivas, **IAC** > 3, el máximo consumo de cortadores supone 0,01 cambios/m³ excavado. Esto, para un túnel de 10 m de diámetro, que tiene 78 m² de sección, supone cambiar 0,78 cortadores cada m³ excavado.



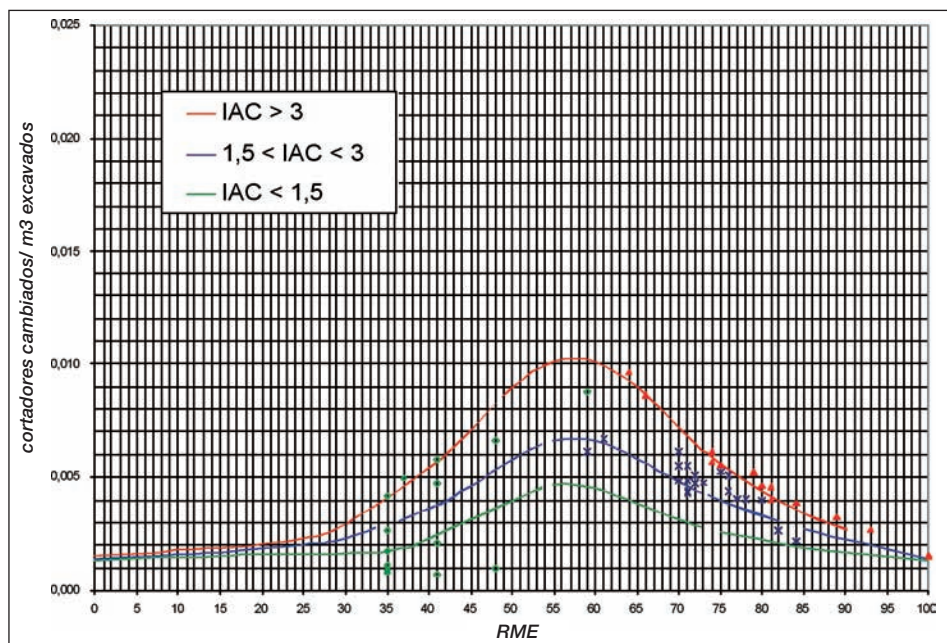
[Figura 8].- Determinación del Índice de Abrasividad Cerchar.

IAC	GRADO DE ABRASIVIDAD	ROCAS TÍPICAS
> 4	MUY ALTO	GRANITO, GNEIS, ANFIBOLITAS, PEGMATITAS
2-4	ALTO	ARENISCAS, DOLERITA
1-2	MEDIO	PIZARRAS
< 1	BAJO	CALIZAS

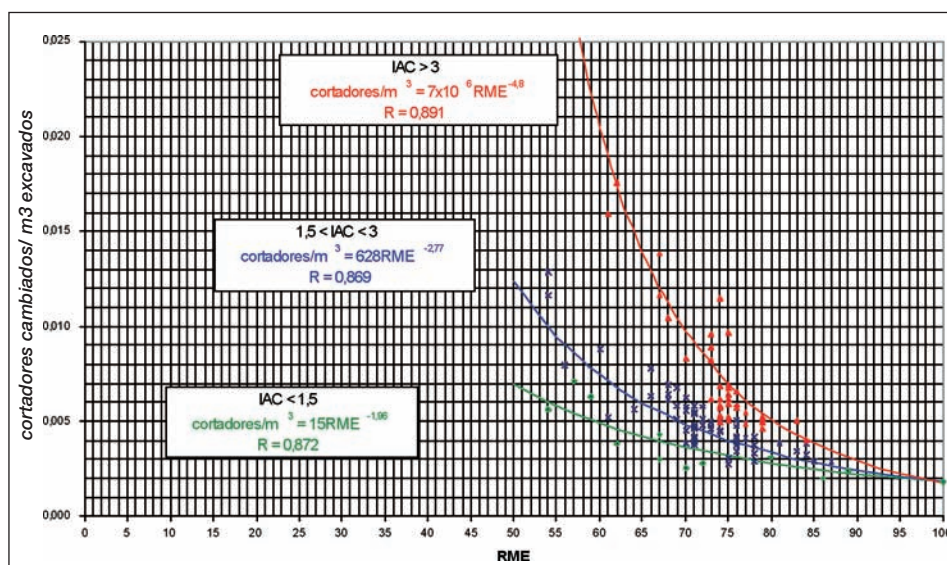
[CUADRO IV].- Grado de abrasividad según el IAC.



[Figura 9].- Relación entre el Índice de Abrasividad Cerchar y el contenido de cuarzo equivalente.



[Figura 10].- Correlación entre el RME e IAC con el número de cortadores cambiados por m³ excavado.



[Figura 11].- Correlación entre el RME e IAC con el número de cortadores cambiados por m³ excavado.

En la **Fig. 11** se muestra la gráfica homóloga a la anterior para las rocas duras y muy duras, $\sigma_{ci} > 45$ MPa.

En este caso, para las rocas muy abrasivas, el consumo de cortadores tiende al infinito para valores del **RME** próximos a 50 puntos; esto es lógico pues para rocas con $\sigma_{ci} > 45$ MPa, el **RME** se aproxima a 50 puntos sólo en el caso de rocas sin fracturar y muy resistentes; que, en la práctica, no son excavables con tuneladora.

Conclusiones

Desde su presentación en el año 2006 el índice **RME** ha sido objeto de importantes mejo-

ras para conseguir que se consolide como una herramienta de proyecto, que sea útil en la elección del tipo de tuneladora más apropiado para un túnel dado.

Las mejoras que se han introducido en el **RME** son las siguientes:

- Criterios objetivos para evaluar la homogeneidad del frente de los túneles.
- Correlaciones específicas entre el **RME** y el **Avance medio diario (ARA_d)** para los tres tipos más normales de tuneladoras.
- Correlaciones entre el **RME**, el **Índice de Abrasividad Cerchar** y el consumo específico de cortadores.

En la actualidad el **RME** esta siendo utilizado con éxito en varias partes para predecir los avances de las tuneladoras en función de las características del terreno y aunque se siguen realizando investigaciones, no se espera que se hagan modificaciones a la metodología actual antes del año 2012.

Bibliografía

- ALBER, M. *Classifying TBM contracts*, *Tunnels & Tunnelling International*, Dic. 1996.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M.; ÁLVAREZ, M^a. *Rock Mass Excavability (RME) Index*. *ITA World Tunnelling Congress*. Seoul. Korea. 2006.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M. *Predicting TBM excavability*. *Tunnels & Tunnelling International*. Sep. 2007.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M., TARDÁGUILA I. *Nuevas aplicaciones del índice RME para la selección del tipo de tuneladora*. *Ingeopres*, Madrid, Nov. 2008.
- INSTITUTO POLITÉCNICO DE TORINO. *Int. Congress Mechanized Tunnelling: Challenging case histories*. *Hsuehshan Tunnel*. Torino, Nov. 2004.
- NILSEN, B., DAHL, F., HOLZHÄUSER, J. AND RALEIGH, P. *Abrasivity testing for rock and soils*. *Tunnels & Tunnelling International*. Abr. 2006.
- SAPIGNI, M., BERTI, M., BETHAZ, E., BOSILLO, A., CARDONE, E. *TBM performance estimation using rock mass classifications*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, N° 32, 2002.
- THURO, K., KÄSLING, H. *Classification of the abrasiveness of soil and rock*. *Geomechanics and Tunnelling*. Vol. 2, Abr. 2009, Berlin.