

El Índice de Excavabilidad del Macizo Rocoso (RME): Nueva metodología para escoger el método óptimo de construcción de túneles

En este artículo –traducción del presentado el pasado abril en el Congreso de la ITA (Seúl) y que incluye unos comentarios recientemente elaborados–, se presenta el Índice de Excavabilidad del Macizo Rocoso (RME) que los autores consideran eficaz para predecir la excavabilidad mediante tuneladoras para roca (TBM); proporcionando una cuantificación del rendimiento de las tuneladoras y constituyendo una nueva herramienta para escoger el método constructivo de un túnel empleando TBMs. El RME se basa en cinco parámetros específicamente relacionados con el comportamiento del macizo rocoso y las características de las TBMs. Este índice ha sido comprobado con datos procedentes de 22,9 km de túneles construidos con TBM. Se han establecido varias correlaciones entre el RME y algunos parámetros significativos del rendimiento de las TBMs, como la Velocidad Media de Avance (Average Rate of Advance, ARA).

Palabra clave: AVANCE, CORTE, EMPUJE, EXCAVABILIDAD, MACIZO, PAR, RENDIMIENTO, RME, ROCA, TBM, TÚNEL, VELOCIDAD.

**Z.T. BIENIAWSKI VON PREINL,
B. CELADA TAMAMES.**
Profesores U.P. de Madrid, Escuela de Ingenieros de Minas.

**J.M. GALERA FERNÁNDEZ y
M. ALVAREZ HERNÁNDEZ.**
Geocontrol, S.A.

Cuando se analiza el desarrollo de las tuneladoras y los hitos conseguidos en los últimos años se comprueba que la utilización de las modernas tuneladoras para roca (TBMs) proporciona espectaculares rendimientos y logros; pero también supone complejos desafíos y problemas para los diseñadores y constructores que deben hacer grandes esfuerzos para esclarecer la interacción entre las características del macizo rocoso y el rendimiento de las TBMs.

El concepto de *carga de roca* presentado por Terzaghi en 1946, seguido del de *tiempo de autoestabilidad* introducido por Lauffer en 1958, y del índice **RQD** de Deere en 1964, fueron intentos de ayudar a seleccionar los sostenimientos que debían aplicarse, cuando se construían túneles por el método clásico de perforación y voladura.

En aquellos años la selección de los equipos necesarios para la excavación de un túnel se dejó a la discreción de los Constructores, con una incidencia mínima de los Proyectistas.

Hay que recordar que los métodos, más modernos, de clasificación de macizos rocosos (Wickham *et al.*, 1972; Bieniawski, 1973, y Barton, 1974) estaban fundamentalmente dirigidos hacia los túneles construidos mediante perforación y voladura, sin considerar los túneles construidos con TBMs.

Hoy en día esta situación ha cambiado; pues las TBMs han aumentado en potencia y tamaño, extendiéndose su campo de aplicación; de tal forma que su uso condiciona fuertemente el proyecto del túnel.

Más aún, la selección de una tuneladora para construir un túnel puede suponer un gran progreso debido a la mejora en la seguridad

en el trabajo y excelentes rendimientos que se pueden conseguir; pero también es fuente de profundas decepciones cuando las características de la tuneladora no están bien adaptadas a las condiciones del terreno y la tuneladora queda atrapada durante meses y, a veces, debe ser rescatada empleando métodos clásicos, como la simple excavación a mano o los explosivos.

La situación parece haber evolucionado recientemente hacia el empleo combinado del método de perforación y voladura con las tuneladoras; lo cual ha actualizado el concepto de excavabilidad del macizo rocoso y ha hecho revivir problemas que fueron planteados en la década de los 80.

Sin embargo, todavía existe una clara dificultad: cómo evaluar eficazmente la interacción entre las características del terreno, cuantificadas por las clasificaciones geomecánicas del **RMR** o **Q**, y diseño y rendimiento de una TBM.

Ciertamente, se han hecho algunos intentos para resolver esta dificultad; pero la definición de las características de las TBMs sigue siendo un tema reservado a los fabricantes de las tuneladoras y a los constructores de los túneles; los cuales se basan, fundamentalmente, en experiencias previas.

Estado del arte sobre la excavabilidad de túneles

La *excavabilidad*, que se define como la facilidad que presenta un terreno para ser excavado, fue estudiada hace dos décadas por Kirsten (1982), y la excavabilidad y los modelos para predecir el rendimiento de las tuneladoras

han sido estudiados por Barton (2000), Alber (2000), Bieniawski (2004), Blindheim (2005) y otros.

En esencia se admite que la elección entre construir un túnel con una tuneladora y hacerlo con un método de perforación y voladura puede ser cuantificada basándose en la calidad del terreno y las características de las tuneladoras.

Un ejemplo de una expresión orientada a esta tarea es el Q_{TBM} presentado por Barton (2000):

$$Q_{TBM} = RQD_0 / J_n \cdot x J_n \cdot J_a \cdot x J_w / SRF \cdot x \sigma_{MASS} / Fx20 / CLI \cdot x q / 20 \quad (1)$$

Donde:

CLI = Índice de duración de los cortadores.

F = Fuerza media aplicada por cortador

q = contenido en cuarzo (%) del terreno.

Esta expresión ha tenido una importante difusión; pero, también, ha sido severamente criticada muy recientemente (Blindheim, 2005).

En el trabajo realizado se ha investigado la idoneidad del índice Q_{TBM} ; pero los resultados obtenidos no han sido buenos, debido a que la definición de la resistencia del macizo rocoso (σ_{MASS}), que se basa en la *inversión de σ_c para determinar la resistencia del macizo rocoso corrigiéndola según su densidad*, hace su aplicación inviable. Sin embargo, Abrahão y Barton (2003) aplicaron la ecuación (1) con sus 21 parámetros enfatizando que la interacción terreno-tuneladora es muy compleja.

Básicamente, en las etapas previas de esta investigación, hemos revisado todos los métodos existentes en relación con la excavabilidad

de los macizos rocosos y la utilización de tuneladoras.

Para resumir los aspectos más importantes de esta revisión, se puede indicar que, en la literatura, existen cinco índices relevantes: RQD_{TBM} (Deere), N (Kirsten), RMR_{TBM} (Bieniawski), RMI_{TBM} (Palmstrom) y Q_{TBM} (Barton). El más renombrado de ellos es el Q_{TBM} que, a veces, se presenta como el más útil de los cinco índices examinados.

Como hemos indicado, analizamos con gran cuidado la aplicabilidad del índice Q_{TBM} a los datos de que disponíamos sobre los 22,9 km de túneles construidos con tuneladora; pero llegamos a la conclusión de que el índice Q_{TBM} no proporcionaba resultados satisfactorios.

En los últimos dos meses hemos encontrado otro argumento que apoya nuestra conclusión sobre el Q_{TBM} después de leer un importante estudio realizado en Noruega por A. Palmstrom y E. Broch titulado: *Uso y mal uso de los sistemas de clasificación de los macizos rocosos con referencia especial al sistema Q*. Este artículo está actualmente en prensa y será publicado en 2006 en la revista *Tunnelling and Underground Space Technology*.

De este trabajo citamos literalmente: *Se concluye que el índice QTBM es complejo e incluso confuso y no es recomendable su uso.*

Para justificar esta conclusión Palmstrom y Broch han escrito lo siguiente:

Sapigni et al. (2004) en su artículo "TBM performance estimation using rock mass classification" han analizado la utilidad del índice Q_{TBM} en tres túneles, con una longitud acumulada de 14 km, excavados en rocas metamórficas en el Norte de Italia; en los cuales se determinaron cuidadosamente los índices RMR , Q y Q_{TBM} .

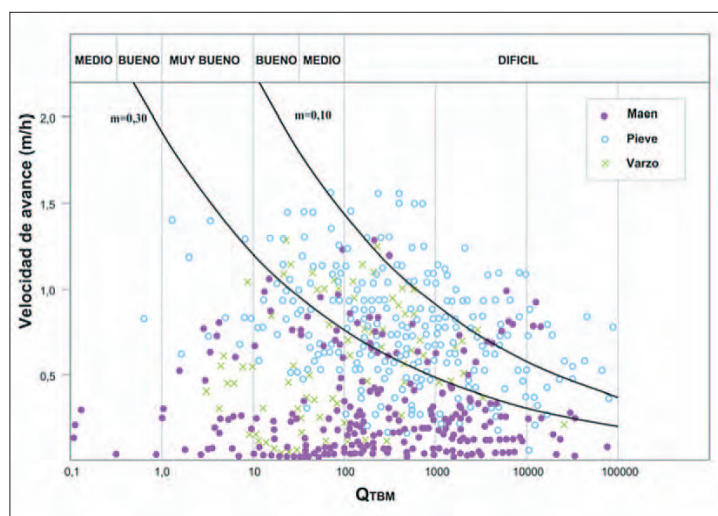
Basándose en análisis estadísticos Sapigni et al. encontraron una correlación razonable entre los valores del RMR y la velocidad de penetración neta; pero concluyen que la dispersión de los resultados era demasiado importante para que este índice pueda utilizarse para predecir los rendimientos de las tuneladoras.

Sin embargo, las correlaciones obtenidas a base del Q y el nuevo Q_{TBM} fueron todavía peores. Estos autores encontraron particularmente difícil explicar las malas correlaciones obtenidas usando el índice Q_{TBM} ; ya que se supone que este índice se fundamenta en una correcta estimación de la interacción entre las características del macizo rocoso y los parámetros de funcionamiento de las tuneladoras, con una orientación relevante hacia el uso de las TBMs.

En particular, el índice Q_{TBM} tiene una sensibilidad muy baja frente a la velocidad neta de penetración y el coeficiente de correlación, que se obtiene con él, es incluso peor que el que se obtiene con el índice Q convencional o con otros parámetros básicos, como la resistencia a compresión simple de la roca intacta.

En la Figura A se ilustran estos resultados y en ella se aprecia claramente la mala corre-

[Figura A] **Velocidad de avance para tres túneles construidos con tuneladora en función de Q_{TBM} (Sapigni et al. 2002).**



lación entre la velocidad de avance y el índice Q_{TBM} . Esta evidente mala correlación pone de manifiesto la dificultad de predecir correctamente el rendimiento de las tuneladoras, que depende de numerosos parámetros.

Palmstrom y Broch piensan que hay una objeción importante sobre el desarrollo que el índice Q_{TBM} ha tenido en los últimos años e incluso sobre el mal uso que se ha hecho de este índice; pues creen que el desarrollo del índice Q_{TBM} ha ido más lejos que los objetivos que el propio Q_{TBM} pretendía alcanzar en sus orígenes.

Como conclusión, Palmstrom y Broch afirman: El índice Q_{TBM} se planteó como una herramienta para estimar el índice de penetración PR de las TBMs y, junto con el parámetro m , relacionado con los rendimientos de la tuneladora, se supone que se puede obtener una estimación de la velocidad de avance (AR).

Nosotros apreciamos que varios de los parámetros que definen el índice Q_{TBM} son irrelevantes o incluso confusos, en relación con el rendimiento de las TBMs y su efecto conjunto es difícil de apreciar.

Los trabajos hechos hasta ahora indican una mala correlación e incluso que no existe correlación entre este índice y los resultados obtenidos. Por ello, nosotros recomendamos que no se use el índice Q_{TBM} .

Después de la contundente recomendación de Palmstrom y Broch y de la aplastante evidencia de los datos aportados, nosotros concluimos que la modificación de los sistemas de clasificación geomecánica existentes, RMR o Q , no es una vía recomendable para predecir el rendimiento de las tuneladoras.

Alber (1996, 2000), concentrándose en los problemas contractuales que puede presentar el uso de las TBMs, ha intentado establecer una estimación probabilística de la influencia que tienen los rendimientos sobre el coste de la construcción. El RMR fue utilizado por Grandori et al. (1995) para diferenciar rangos del terreno en los que el rendimiento de las tuneladoras era significativamente diferente, en función del tipo de tuneladora: abierta (TBM) o

Doble-Escudo (DE). Bieniawski (2004) hizo una revisión del concepto de excavabilidad del macizo rocoso basándose en el RMR ajustado para TBMs.

Por ello; se llega a la conclusión de que el desarrollo de complejas ecuaciones que combinen la calidad del macizo rocoso, definida mediante el índice RMR o Q , con parámetros adicionales relacionados con las características de las tuneladoras, no es una vía adecuada para resolver el problema. En otras palabras, es muy dudoso que una sola fórmula pueda incluir todos los parámetros que tienen una influencia significativa para definir la calidad del terreno y los rendimientos de las TBMs.

De hecho, algunos expertos (Grandori y Mendaña, 2005) opinan que los índices RMR y Q son más eficaces cuando se usan, como habitualmente sucede, de acuerdo con los objetivos para los que fueron creados. Por ello, el ajustar estos sistemas para poderlos emplear en la definición de algunos parámetros de las TBMs puede ser contraproducente y sólo puede crear confusión; tal como se ha indicado con anterioridad en relación con el Q_{TBM} . Mas aún, mientras la abrasividad es un importante factor para estimar el desgaste de los cortadores y el rendimiento de las TBMs, este parámetro no es decisivo para escoger entre una TBM abierta y un Doble-Escudo.

Consecuentemente con todo lo anterior, se considera que un indicador específico, no basado en índices como el RMR o Q , es más útil para evaluar la interacción entre el terreno y la tuneladora y, por ello, en este artículo se presenta un nuevo índice que se considera adecuado para conseguir estos objetivos.

Concepto del índice de excavabilidad del macizo rocoso

Los autores de este artículo, como proyectistas y consultores en la construcción de túneles, consideran que era necesario disponer de una ayuda objetiva que facilitara la toma de decisiones en la elección entre la construcción de un túnel con tuneladora o mediante perforación y voladura; pues, en base a la experien-

cia e información disponibles, consideran que actualmente no hay una alternativa real que pueda utilizarse para este propósito.

A pesar de que el sistema presentado en este artículo está todavía en fase de evolución para introducir en él un ajuste fino, los autores han decidido compartir con los lectores los resultados de los trabajos realizados, que consideran una buena solución al problema y, a la vez, quieren tener la oportunidad de recibir una crítica constructiva por parte de aquellos que se han visto implicados en desafíos similares.

A continuación se presentan los datos con los que se ha trabajado y la primera versión del *RME*.

Base de datos

Los parámetros que definen el *RME* y sus criterios de ponderación han sido definidos tras un complejo análisis estadístico de los datos asociados a 387 tramos de distintos túneles, en cada uno de los cuales el avance de la tuneladora no se ha visto afectado por problemas mecánicos y, por lo tanto, en ellos el avance sólo puede depender de las características del terreno.

La longitud acumulada de túnel que suponen los 387 tramos estudiados es de 22,9 km; que han sido, fundamentalmente, excavados con tuneladoras tipo Doble-Escudo, trabajando en dos modos: como Doble-Escudo y como un Escudo simple.

Aunque se ha previsto extender el concepto del *RME* a los métodos clásicos de construcción con perforación y voladura; hasta ahora no se ha trabajado en esa dirección.

La información asociada a cada uno de los 387 tramos estudiados cubre los siguientes datos:

- Datos geométricos: que se refieren básicamente a la localización del tramo, el diámetro de excavación y la longitud del tramo.
- Datos del terreno: que están constituidos por los índices *RMR*, *DRI*, características de la matriz rocosa, orientación de las juntas existentes en el terreno y presencia de agua.
- Datos de la tuneladora: que se refieren a la velocidad de avance, coeficiente de utilización de la tuneladora, índice de penetración, velocidad de rotación de la cabeza de corte, par aplicado en la cabeza de corte, empuje sobre los cortadores y energía específica de excavación.

En la *Tabla I* se muestra el origen de los 387 tramos estudiados que corresponden a tres obras distintas: Túneles de Guadarrama, Túnel Oeste de Abdalajís y tramo en roca de la Línea 9 del Metro de Barcelona. Para disponer de una información más detallada sobre estos túneles, se remite al lector a las siguientes publicaciones: *ADIF* (2005), *De la Valle* (2002) y *Weber et al.* (2005).

[Tabla I] Origen de los 387 tramos analizados.

Túnel	Modo de excavación	Regiones estructurales (Nº)	Longitud acumulada
Guadarrama 3	Escudo Simple	37	958,4
	Doble Escudo	136	7.726,9
Guadarrama 4	Escudo Simple	61	849,4
	Doble escudo	115	8.869
Abdalajís Oeste	Escudo simple	14	755
	Doble-Escudo	19	2.378
Línea 9	Escudo simple	5	1.421
TOTAL		387	22.958,1

Selección de los parámetros que integran el RME

El índice *RME* se define evaluando cinco parámetros con las calificaciones que se muestran en la *Tabla II*. La selección de los cinco parámetros que integran el *RME* se ha basado en un proceso de *Análisis Lineal Discriminante*; que se ha llevado a cabo utilizando el programa denominado *R*, desarrollado por el Departamento de Estadística y Teoría de Probabilidad de la Universidad Tecnológica de Viena.

Como resultado de este análisis se encontró que los parámetros que tenían mayor influencia sobre la velocidad media de avance (*ARA*) de las tuneladoras, expresada en m/día, eran: perforabilidad, espaciado de las discontinuidades y tiempo de autoestabilidad. A este grupo de parámetros más influyentes, estadísticamente, sobre el *ARA* se decidió incorporar otros dos para definir el comportamiento del terreno: resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta y caudal de agua infiltrada en la excavación; ya que, en muchos casos, estos parámetros tienen una gran influencia en el rendimiento de las tuneladoras.

Una vez que finalizó la selección de los parámetros que integran el *RME* se efectuó un nuevo análisis estadístico, minimizando el error en la previsión del *ARA* para cada uno de los 387 tramos estudiados mediante el *RME*. De esta minimización de errores se han obtenido los criterios de valoración que se han presentado en la *Tabla II*.

Hay tres excepciones importantes en la aplicación del *RME*, la primera es que hay que tener presente que, **sea cual sea el valor del RME asignado a un tramo, si alguno de los cinco parámetros de clasificación se califica con 0 se admite que el valor del ARA en ese tramo será inferior a 2 m/día**. La segunda excepción que hay que tener en cuenta es que si σ_{ci} es menor de 5 MPa en el caso de que se trate de una tuneladora escudada, que no utiliza grippers, la calificación correspondiente a este parámetro debe ser 1 en vez de 0; ya que las tuneladoras sin grippers tienen menos problemas para anclarse en los terrenos débiles.

Finalmente, la tercera excepción se refiere a la presencia de agua en los terrenos arcillosos o limolíticos, que se degradan muy rápidamente ante caudales moderados de agua. Por eso, en estos terrenos se considera que

Resistencia a Compresión uniaxial de la roca intacta (0-15 puntos)									
σ_{ci} (MPa)	< 5	5-30	30-90	90-180	>180				
Puntuación	0 (*1)	10	15	5	0				
Perforabilidad (0-15 puntos)									
DRI	> 80	80-65	65-50	50-40	<40				
Puntuación	15	10	7	3	0				
Discontinuidades en el frente de excavación (0-40 puntos)									
Homogeneidad		Nº de juntas por metro					Orientación respecto al eje del túnel		
Homogéneo	Mixto	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	Perpendicular	Oblicua	Paralela
Puntuación: 10	0	5	10	20	15	0	10	5	0
Tiempo de autoestabilidad (0-25 puntos)									
Horas	<5	5-24	24-96	96-192	>192				
Puntuación	0	2	10	15	25				
Afluencia de agua (0-5 puntos)									
Litros/seg.	>100	70-100	30-70	10-30	<10				
Puntuación	0	1	2	4 (**0)	5				

(* Para doble-escudo y escudo simple.

(**) Para rocas arcillosas.

[Tabla II] Criterios de evaluación de los parámetros que definen el RME.

la calificación referente a la presencia de agua debe ser 0 si se estima que la afluencia de agua en el túnel es mayor de 10 l/s.

En esencia hay que tener presente que cuanto mayor es el valor del **RME** más apropiada resulta la construcción de un túnel con tuneladora.

Validación del **RME** con casos prácticos

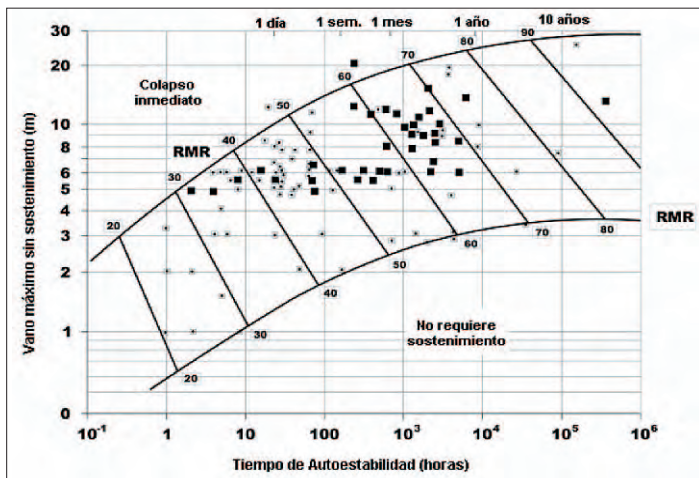
En la **Figura 1** se muestra la distribución de los valores del **RME** de los tramos con los que se ha trabajado, donde se aprecia que la mayor parte de los valores se concentran en el intervalo de 60 a 90 puntos.

Es importante aclarar que con las calificaciones presentadas en la **Tabla II** las regiones que han sido excavadas con un Doble-Escudo trabajando en modo de doble-escudo tienen un **RME** mayor que el de las regiones que se han excavado en modo simple-escudo. Este hecho es importante ya que concuerda perfectamente con la práctica real; pues un Doble-Escudo sólo trabaja en modo de simple-escudo cuando la inestabilidad del terreno dificulta la operación de *regripping*.

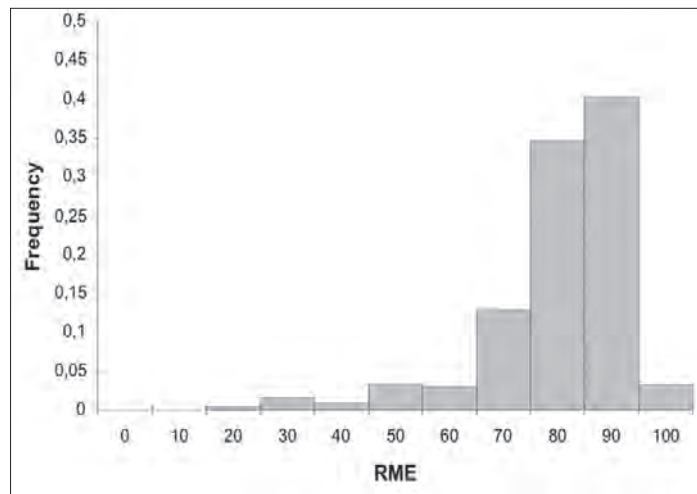
Determinación de los parámetros que integran el **RME**

En la práctica los valores de cuatro de los cinco parámetros que integran **RME** se podrán conocer como resultado de las campañas de reconocimiento habituales. El quinto parámetro, tiempo de autoestabilidad, puede estimarse a partir del conocido gráfico que se muestra en la **Figura 2**; debido a *Bieniawski* (1979). Como los casos reales utilizados para establecer dicha figura corresponden a aplicaciones del método de perforación y voladura; en el caso de que se vaya a emplear una tuneladora debe utilizarse la correlación de *Alber* (1996) definida por la expresión:

$$RMR_{TBM} = 0,8 \cdot RMR_{D\&B} + 20 \quad (2)$$



[Figura 2] **Tiempo de autoestabilidad en función del RMR y de la máxima distancia sin sostenimiento.**



[Figura 1] **Distribución del RME para los 387 tramos estudiados.**

Sin embargo en este trabajo el tiempo de autoestabilidad de cada tramo estudiado se ha confirmado mediante cálculos tenso-deformacionales en tres dimensiones.

Correlación entre **ARA** y **RME**

La velocidad media de avance, **ARA**, expresada en m/día es el parámetro más significativo para comparar los rendimientos de varios métodos constructivos en el proyecto de un túnel determinado. De hecho, durante la construcción de un túnel, el **ARA** puede ser fácilmente determinado; pues es la velocidad de avance entre dos puntos del trazado, suficientemente separados.

De acuerdo con lo anterior; una de las aplicaciones más importantes del **RME** es predecir, con una precisión razonable, el valor del **ARA** esperado para un tramo de túnel de características homogéneas.

En este breve artículo, solo se presenta la correlación entre el **RME** y el **ARA** para tuneladoras tipo Doble-Escudo. Los resultados referentes al uso de TBMs abiertas serán publicados más adelante.

Los análisis estadísticos realizados han proporcionado correlaciones, como la que se muestra en la **Figura 3**, entre el **RME** y el

ARA para tuneladoras de tipo Doble-Escudo. En esta figura se aprecia que correlación entre **RME** y **ARA** puede considerarse lineal, si el rango de los valores del **RME** se divide en dos:

- Para valores de **RME** superior a 75, la regresión es:

$$ARA \text{ (m/día)} = 0.56 \cdot RME - 26 \quad (3)$$

El coeficiente de correlación es $R = 0.87$ y los valores extremos del **ARA** son 16.0 y 30 m/día, para valores respectivos del **RME** de 75 y 100.

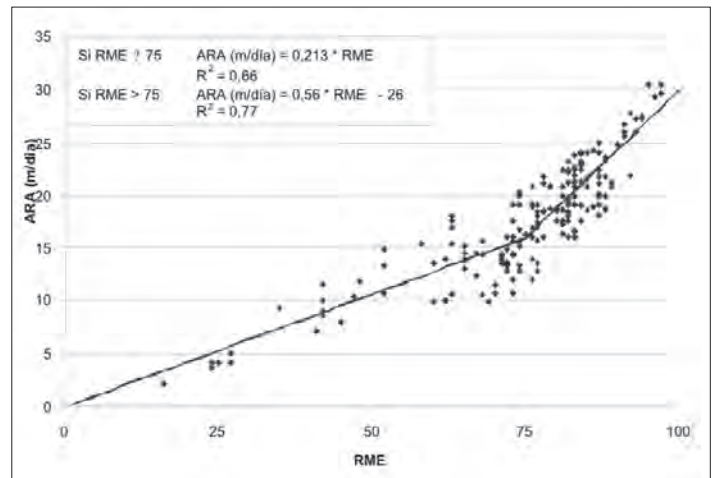
- Para valores del **RME** inferiores a 75, la expresión es:

$$ARA \text{ (m/día)} = 0.213 \cdot RME \quad (4)$$

El coeficiente de correlación es $R = 0.81$ y los valores extremos del **ARA** son 5.32 y 16,0 m/día para valores respectivos del **RME** de 25 y 75.

Basándose en estos resultados, se pueden establecer los siguientes criterios en cuanto a la utilización de los dobles-escudo:

- **RME >75**: corresponde a terrenos en los que se obtendrán avances superiores a 16 m/día, en los que el empleo de doble-escudo es muy recomendable.



[Figura 3] **Correlación entre **ARA** (m/día) y **RME**.**

- $50 < RME < 75$: las velocidades de avance que se obtendrán en estos terrenos estará comprendida entre 10 y 16 m/día; por lo que el uso de doble-escudo en estos terrenos es bastante recomendable,
- $25 < RME < 50$: las velocidades de avance en estos terrenos estarán comprendidas entre 5 y 10 m/día; por lo que el caso de doble-escudo en estos terrenos no es muy recomendable,
- $RME < 25$: las velocidades de avance en estos terrenos serán inferiores a 5 m/día y en ellos se considera desaconsejable el uso de doble-escudo.

Los criterios anteriores se han establecido con datos de túneles cuyo diámetro de excavación es del orden de 10 m; por ello, para poder evaluar la velocidad de avance cuando se construyen túneles con otro diámetro se propone utilizar un coeficiente corrector, K_D , definido por la expresión:

$$K_D = 0.007D^3 + 0,1637D^2 - 1.2859D + 4.5158 \quad (5)$$

Algunos valores característicos de K_D son los siguientes:

Diámetro del túnel (m)	12	11	10	8	5
K_p	0,5	0,8	1,0	1,1	1,3

Utilizando el coeficiente K_p en la **Figura 4** se presentan las correlaciones entre el **RME** y el **ARA** para algunos diámetros de excavación significativos.

Correlaciones del RME con algunos parámetros significativos

Como resultado de los trabajos realizados se han obtenido correlaciones entre el **RME** y algunos parámetros significativos; aunque de los que sólo se presentan las que se consideran más significativas: velocidad de penetración (**PR**), Energía Específica, Empuje y Par.

Energía Específica de Excavación

El concepto de *energía específica de excavación* (E_s) en este trabajo ha sido tomado como *préstamo* de la técnica de las perforaciones para gas y petróleo; donde fue utilizado hace ya bastantes años (Teale, 1965). Para definir la Energía específica de excavación se usa la siguiente expresión:

$$E_s = F / A + 2\pi NT / A \cdot ARA \quad (6)$$

Donde:

E_s = Energía específica de excavación (kJ/m^3).

- F = Empuje aplicado a la cabeza de corte (kN).
- A = Sección excavada (m^2).
- N = Velocidad de rotación de la cabeza de corte (rps).
- T = Par aplicado en la cabeza de corte ($\text{kN}\cdot\text{m}$).
- ARA = Velocidad media de avance (m/s).

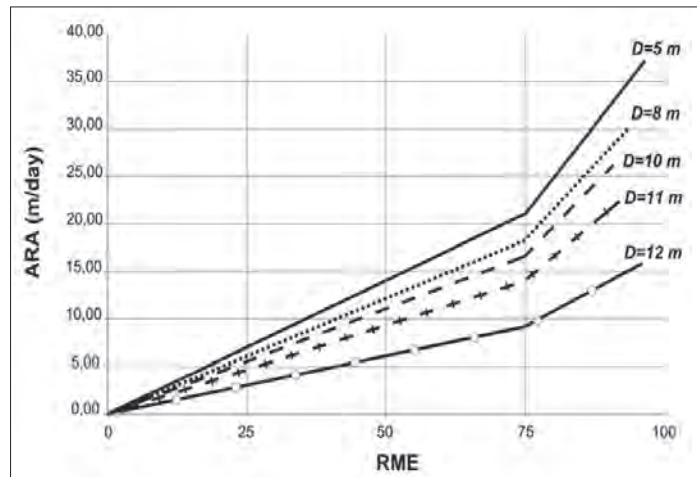
La ecuación (6) tiene dos términos, el primero representa la energía específica consumida en la cabeza de corte debida al empuje sobre los cortadores y el segundo correspon-

de a la energía consumida en la cabeza de corte para hacerla girar.

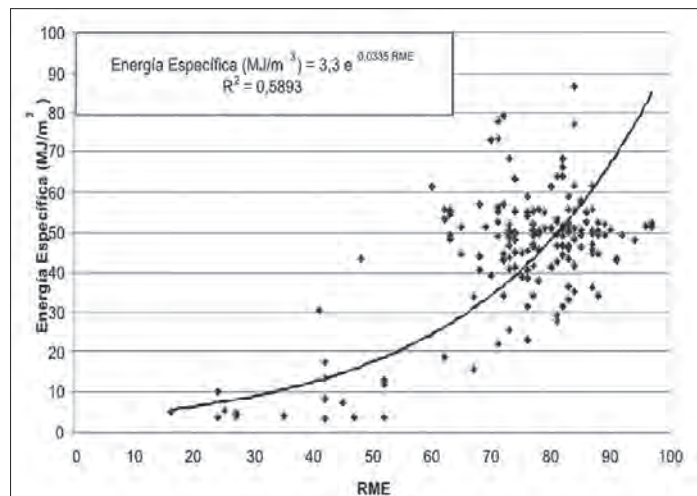
En la **Figura 5** se muestra la correlación encontrada entre el **RME** y la *Energía Específica*, con un coeficiente de correlación $r = 0,76$.

Velocidad de Penetración (PR)

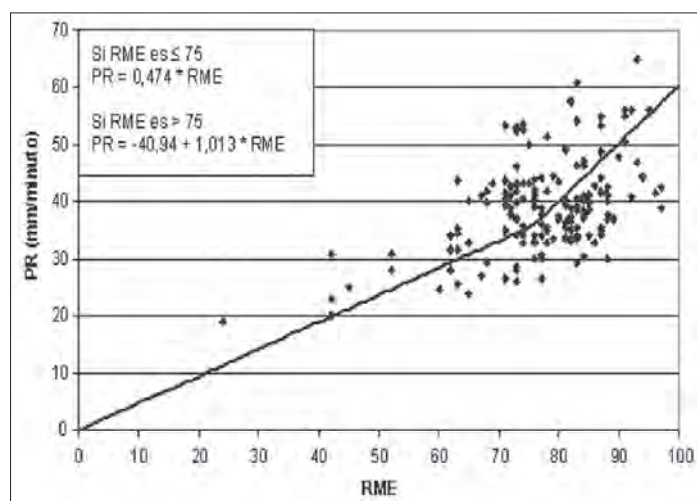
La **Figura 6** muestra la correlación entre el **RME** y la Velocidad de penetración (**PR**), que normalmente se expresa en mm/min. Hay que tener en cuenta que el **ARA** es proporcional a **PR**, en función del porcentaje medio de utilización de la tuneladora en un tramo, y



[Figura 4] Correlación entre ARA (m/día) y RME para distintos diámetros de excavación.



[Figura 5] Correlación entre el RME y Energía Específica.



[Figura 6]- Correlación entre el RME y la Penetración Neta.

por ello esta correlación, al igual que la del **ARA** mostrada en la *Figura 3*, se ha linealizado en dos tramos.

Empuje por cortador y por aplicador en la cabeza de corte

Las *Figuras 7 y 8* muestran, respectivamente, las correlaciones del **RME** con el par de giro y el empuje por cortador (F_c) aplicados en la cabeza de corte. Los correspondientes coeficientes de correlación son 0,71 y 0,64.

Conclusiones

Después de tres años de estudio y análisis de los datos de 387 tramos de túnel construidos con tuneladoras de roca, del tipo Doble-Escudo y Simple-Escudo, se ha definido un índice para valorar la excavabilidad del terreno; denominado **RME**.

El **RME** quiere ser una nueva herramienta que permita a los Proyectistas y Constructores estimar el avance de las tuneladoras, en los tramos homogéneos de terreno, con objeto de que les sirva de ayuda para decidir el método de construcción más apropiado.

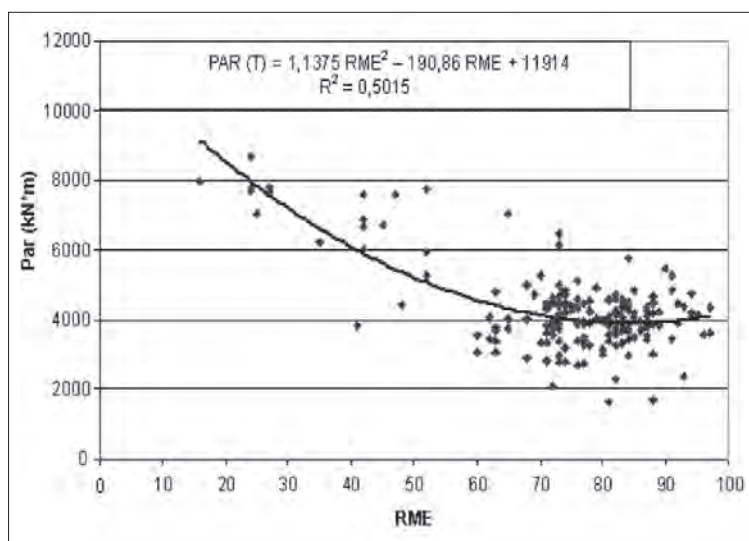
En el futuro próximo se prevé realizar nuevos trabajos incorporando datos sobre tuneladoras abiertas clásicas (TBM) con objeto de poder extender las correlaciones hasta ahora encontradas a todos los tipos de tuneladoras de roca.

Agradecimientos

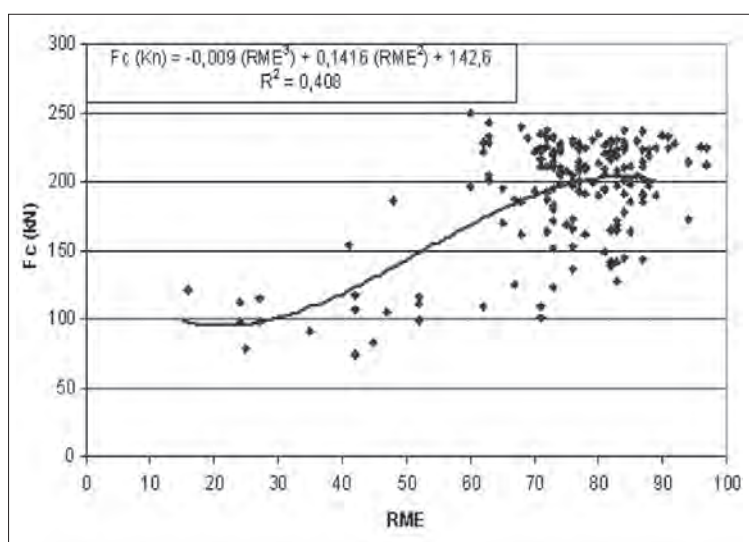
Los autores desean agradecer la colaboración y los pertenecientes permisos obtenidos del ente Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (**ADIF**), así como de la empresa pública de la Generalitat de Catalunya *Gestió D'Infraestructures, S.A. (GISA)* que han facilitado la realización de este trabajo.

Referencias

- ABRAHÃO, R.A. and BARTON, N., 2003. *Employing TBM prognosis model*. Tunnels & Tunnelling Int., Vol. 35(12), pp. 20-23.
- ADIF, 2005. *Túnel de Guadarrama*. Ed. Entorno Gráfico, 579 p.
- ALBER, M., 1996. *Classifying TBM contracts*. Tunnelling & Tunnelling Int., Vol. Dec., pp. 41-43.
- ALBER, M., 2000. *Advance rates for hard rock TBMs and their effects on project economics*. Tunnelling & Underground Space Technology, Vol. 15 (1), pp. 55-60.
- BARTON, N., 2000. *TBM tunneling in jointed and faulted rock*. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.



[Figura 7]-
Correlación
entre el
RME y el par
(T) aplicado
en la cabeza
de corte.



[Figura 8]-
Correlación
entre el
RME y el
empuje por
cortador
aplicado en
la cabeza de
corte.

- BARTON, N., 2005. *Comments on 'A critique of Q_{TBM} '*. Tunnels & Tunnelling Int., July 2005, pp. 16-19.
- BIENIAWSKI, Z.T., 2004. *Aspectos clave en la elección del método constructivo de túneles*. Proc. Jornada Técnica, Madrid, pp.1-37. Also in: Ingeopress, No. 126, pp. 50-68.
- BLINDHEIM, O. T., 2005. *A critique of Q_{TBM}* . Tunnels & Tunnelling Int., June 2005, pp. 32-35.
- DE LA VALLE, N., 2002. *Barcelona's new backbone runs deep*. Tunnels & Tunneling Int. March 2002.
- GRANDORI, R., 2004. *The Abdalajís Tunnel (Málaga, Spain): The new double-shield universal TBM challenge*. Proc. Int. Congr. on Mechanized Tunnelling, Torino, pp. 35-42.
- KIRSTEN, H.A.D., 1982. *A classification for excavation in natural materials*. Civil Engr in S. Africa, July, p. 293.
- MENDAÑA, F., 2004. *Double shield TBMs in the construction of the Guadarrama tunnels*. Proc. Int. Congr. On Mechanized Tunnelling, Torino, pp. 207-224.

Información:

Benjamín Celada
GEOCONTROL, S.A.
Cristobal Bordiu, 19
28003 Madrid
Tel.: 91 553 17 63
E-mail: bcelada@geocontrol.es