

REVISIÓN DEL ÍNDICE ROCK MASS EXCAVABILITY (RME). APLICACIÓN ESPECÍFICA A LOS DOBLES-ESCUDOS

R. BIENIAWSKI, Universidad Politécnica de Madrid
B. CELADA, Universidad Politécnica de Madrid
J.M. GALERA, Geocontrol S.A.

0. RESUMEN

En este trabajo se presenta una actualización de los criterios de valoración del índice Rock Mass Excavability (RME), presentado en el Congreso de la International Tunnelling Association en 2006, que pretende dar al RME una mayor aplicación práctica.

También se presentan dos nuevos índices, denominados Factor de Aprendizaje y Factor de Equipo; que se han establecido para tener en cuenta la interacción entre el terreno, la tuneladora y el equipo que la maneja.

Finalmente, se incluye una nueva correlación para determinar las velocidades de avance los Dobles-Escudos, trabajando en modo doble-escudo.

1. ANTECEDENTES

La investigación sobre el RME se inició en el año 2004 con el objetivo de establecer un índice, similar al RMR, que estuviera específicamente orientado hacia la predicción de la excavabilidad de los macizos rocosos y pudiera ser empleado para seleccionar el método de excavación; ya fuera mediante explosivos, medios mecánicos puntuales o tuneladoras.

El RME fue presentado en el Congreso de la ITA, celebrado en Seúl, Bieniawski *et al.* (2006), y su puesta a punto se llevó a cabo analizando 387 tramos de los túneles de Guadarrama, ADIF (2005), Abdalajís (Weber *et al.*, 2005) y de la Línea 9 del Metro de Barcelona (De la Valle, 2002).

Estos 387 tramos totalizaban una longitud de túnel de 22,9 km y, fundamentalmente, provenían de los dos tubos del Túnel de Guadarrama, excavados desde la boca Norte.

De cada uno de los 387 tramos estudiados se conocían datos referentes a su geometría (diámetro de excavación y longitud), característicos del terreno (RMR, DRI, σ_{ci} , número de juntas y orientación en el frente,...) y de la tuneladora (velocidad de avance, coeficiente de utilización, penetración, par y empujes aplicados,...).

Después de un análisis estadístico se llegó a definir el RME como la suma de las valoraciones de cinco parámetros; de acuerdo con los criterios que se muestran en el **Cuadro 1.I.**

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 con 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.

Cuadro 1.I.- Criterios de evaluación de los parámetros que definen el RME 06.

Una vez calculado el RME para cada uno de los tramos estudiados se correlacionó este índice con la velocidad media de avance en cada tramo (ARA); expresada en m/día. En la **Figura 1.a** se presenta la correlación encontrada entre el RME y el ARA.

Finalmente, en el trabajo presentado en Seúl, se incluían correlaciones entre el RME y algunos parámetros que definían el funcionamiento de las tuneladoras, como la energía específica de excavación, la velocidad de penetración, el empuje y par aplicados en la cabeza de corte.

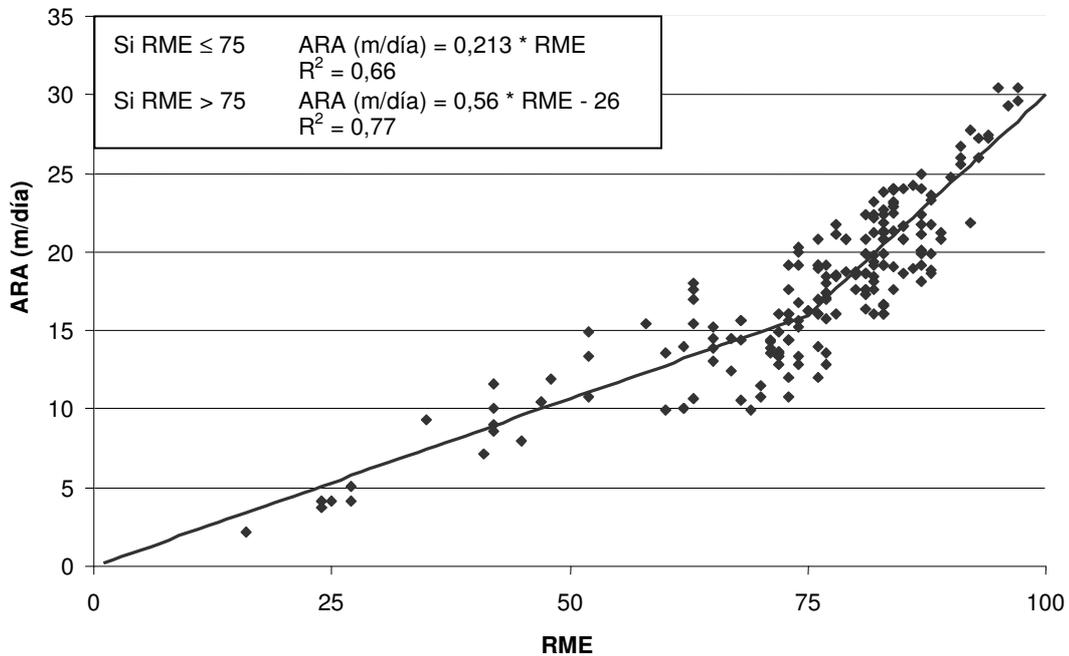


Figura 1.a.- Correlación entre ARA (m/día) y RME.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados presentados en 2006 en Seúl, mostraban las excelentes posibilidades que ofrecía el RME para valorar la excavabilidad del terreno con tuneladoras; pero, desde un punto de vista práctico, su utilidad era limitada.

Ello es debido a que la excelente correlación entre el RME y el ARA que se muestra en la Figura 1.a está basada en datos conjuntos de tuneladoras tipo Doble-Escudo y Simple Escudo; de tal forma que a partir de esta correlación no se pueden diferenciar las velocidades de avance que se obtienen con los distintos tipos de tuneladora y este dato es esencial para poder elegir el tipo de máquina más apropiado para cada túnel.

Por ello, a lo largo de 2006, se ha seguido investigando sobre el RME para conseguir que tenga una mayor utilidad práctica y se ha avanzado en las siguientes líneas de investigación:

- I. **Adaptación al proceso constructivo del túnel**, diferenciado las distintas velocidades de avance que se pueden obtener, en el mismo terreno, a medida en que aumenta la longitud excavada del túnel y mejora la adaptación entre la tuneladora, su tripulación y el terreno.

- II. **Diferenciación del tipo de tuneladora empleada**, distinguiendo entre los Dobles-Escudos, trabajando en modo doble-escudo o escudo-simple, los Simples Escudos y las TBM abiertas.
- III. **Ajuste de los criterios de valoración del RME**, aumentando el número de tramos de túneles estudiados, con objeto de conseguir la mejor representatividad del RME.

En los apartados siguientes se presentan los resultados obtenidos a lo largo de 2006, siguiendo estas tres líneas de investigación.

2.1. ADAPTACIÓN AL PROCESO CONSTRUCTIVO

En la construcción del Túnel de Guadarrama, constituido por dos tubos de 9,5 m de diámetro de excavación y 28 km de longitud, se han utilizado cuatro tuneladoras del tipo Doble-Escudo; dos fabricadas por HERRENKNECHT y las otras dos, por WIRTH.

En la **Figura 2.1.a**, (ADIF, 2005), se presentan los avances obtenidos por las cuatro tuneladoras hasta el día 5 de abril de 2005.

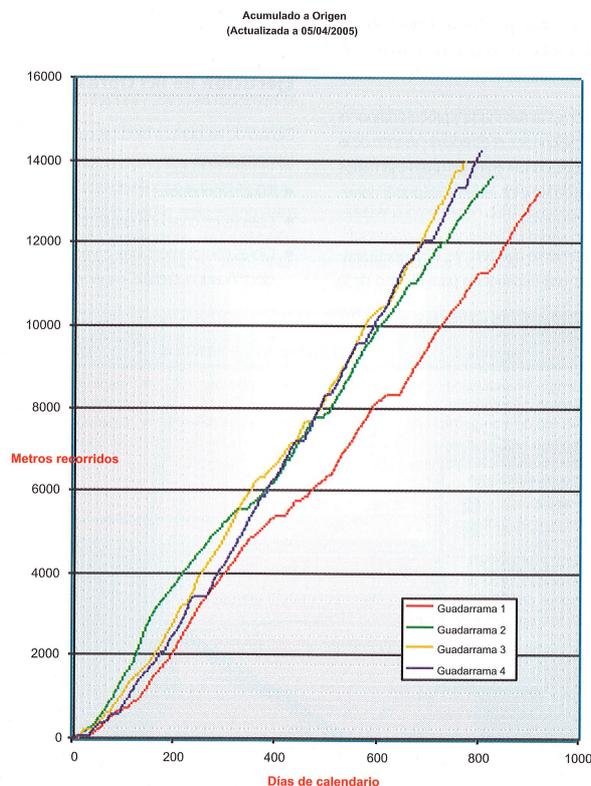


Figura 2.1.a.- Avances acumulados obtenidos por las tuneladoras del Túnel de Guadarrama (ADIF, 2005).

A partir de los datos contenidos en la Figura 2.1.a se ha elaborado el **Cuadro 2.1.I**; que contiene información muy interesante sobre el funcionamiento de estas tuneladoras.

TUNELADORA	FABRICANTE	LONGITUD EXCAVADA AL 5-4-05	LONGITUD EXCAVADA EN 700 DÍAS (km)	AVANCE MEDIO (m/día)
1 (S)	HERRENKNECHT	13,3	9,4	14,5
2 (S)	WIRTH	13,6	11,5	16,6
3 (N)	WIRTH	14,1	12,3	18,2
4 (N)	HERRENKNECHT	14,3	12,0	17,7

Cuadro 2.1.I.- Datos sobre las cuatros tuneladoras del Túnel de Guadarrama.

Por lo que se refiere a la longitud del túnel excavada por cada máquina, hay que señalar que la diferencia constructiva más notable es que las dos tuneladoras que avanzaban desde la Boca Norte excavaron la falla de La Umbría, de unos 500 m de longitud, situada en la parte central del túnel.

Si se analiza la longitud de túnel excavada por cada máquina, al cabo de 700 días de funcionamiento, aparecen notables diferencias. Así, la Tuneladora 3 logró excavar 12,3 km de túnel en los primeros 700 días; mientras que la Tuneladora 1 sólo excavó 9,4 km en ese mismo período. **En estos 700 días la Tuneladora 3 logró avanzar un 31% más que la Tuneladora 1.**

Si se consideran los avances medios, obtenidos en la excavación de todo el túnel, las diferencias entre las tuneladoras vuelven a ser muy significativas.

De nuevo los mejores rendimientos han sido obtenidos por la Tuneladora 3, que consiguió una media, en toda la excavación del túnel, de 18,2 m/día; frente los 14,5 m/día obtenidos por la Tuneladora 1, que fue la que obtuvo menor rendimiento relativo.

De acuerdo con este criterio **la Tuneladora 3 logró un 25% más de rendimiento que la Tuneladora 1.**

Podría pensarse que las diferencias entre los resultados de las Tuneladoras 1 y 3 se deben a que éstas son de distinto fabricante; sin embargo, la Tuneladora 3, fabricada por WIRTH, ha avanzado en 700 días un 2,5% más que la Tuneladora 4 y su rendimiento ha sido superior en un 2,8% al de la Tuneladora 4.

Estas cifras, en sí mismas son poco significativas, y menos aún si se tiene en cuenta que la Tuneladora 3 empezó a trabajar después que la Tuneladora 4 y que la posición relativa entre las Tuneladoras 3 y 4 no ha variado a lo largo de la obra.

De esta forma la excavación con la Tuneladora 4 ha proporcionado una información muy valiosa sobre el terreno; que ha sido aprovechada por la Tuneladora 3, que avanzaba detrás de la 4.

Estos datos ponen de manifiesto que los rendimientos de las tuneladoras de la boca Norte no dependen sustancialmente del fabricante de la tuneladora.

En el Túnel de Guadarrama, después de haber excavado cada Tuneladora entre 13 y 14 km, las características de los terrenos que han excavado las tuneladoras pueden considerarse prácticamente similares; con la excepción de los 500 m de la falla de La Umbría, que además fueron excavados por las Tuneladoras 3 y 4.

De acuerdo con todo lo anterior, parece evidente que las diferencias en los rendimientos entre las tuneladoras del Túnel de Guadarrama han sido debidas a la distinta habilidad de los equipos que tripulaban estas máquinas.

Otro aspecto interesante, que se ha puesto en evidencia durante la construcción del Túnel de Guadarrama, es que a medida que aumentaba la longitud de túnel excavada los rendimientos que se obtenían con cada máquina iban aumentando paulatinamente.

El análisis de los rendimientos obtenidos en tramos del túnel, sucesivamente, alejados del portal, ha puesto de manifiesto que en terrenos semejantes los rendimientos aumentaban del orden del 15% cuando se llevaban excavados unos 10 km.

Dado que el RME debe reflejar la excavabilidad del macizo rocoso, con independencia del proceso constructivo y de los medios empleados, en base a las consideraciones anteriores es razonable que para correlacionar el ARA realmente obtenido en la construcción de un tramo de túnel con el RME se corrija el ARA para tener en cuenta el efecto de la longitud de túnel que se lleva excavada y el grado de acoplamiento entre la tripulación, la tuneladora y el terreno.

Así puede establecerse que

$$ARA_R = ARA_T \times F_A \times F_E$$

siendo:

ARA_R = velocidad media de avance, m/día, obtenida realmente en un tramo de túnel.

ARA_T = valor del ARA para correlacionarlo con el RME.

F_A = factor de aprendizaje, en función de la longitud de túnel excavada.

F_E = factor de equipo, relacionado con el grado de acoplamiento entre la tripulación, la tuneladora y el terreno.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la construcción de los Túneles de Guadarrama y Abdalajís, en los **Cuadros 2.1.I** y **2.1.II** se muestran los valores propuestos para los coeficientes F_A y F_E .

LONGITUD DE TÚNEL EXCAVADA (m)	FACTOR DE APRENDIZAJE (F_A)
0,5	0,50
1,0	0,86
2,0	0,97
4,0	1,00
6,0	1,07
8,0	1,12
10,0	1,15
12,0	1,20

Cuadro 2.1.I.- Valores del coeficiente de aprendizaje (F_A).

ACOPLAMIENTO EQUIPO/TUNELADORA/TERRENO	FACTOR DE EQUIPO (F_E)
Bastante eficiente	0,88
Eficiente	1,00
Muy eficiente	1,15

Cuadro 2.1.II.- Valores del coeficiente de equipo (F_E).

2.2. DIFERENCIACIÓN DEL TIPO DE TUNELADORA

Con objeto de dar la máxima utilidad al RME se considera que deben establecerse una correlación entre el RME y el ARA para cada uno de los tipos de tuneladora actualmente empleados: Doble-Escudo, Escudo Simple y TBM abierta.

La mayor parte de los datos en los que, hasta ahora, se basa esta investigación proviene de la construcción de los Túneles de Guadarrama y Abdalajís Oeste; construidos con tuneladoras tipo Doble-Escudo y por ello, a lo largo de 2006, los trabajos se han orientado a obtener una correlación entre el RMR y el ARA específica para los Dobles-Escudos, con diámetro de excavación de 10 m.

La correlación entre el RME y el ARA para los Escudos Simples y las TBM abiertas, será abordada a lo largo de 2007.

2.3. AJUSTE DE LOS CRITERIOS DE VALORACIÓN DEL RME₀₆

El ajuste de los criterios de valoración del RME₀₆ es una necesidad que se deriva del hecho de haber incrementado notablemente la base de datos con la que se definió este índice; con la incorporación de más datos procedentes de los túneles de Guadarrama y Abdalajís Oeste.

Para trabajar con esta base de datos ampliada se ha tenido en cuenta que los Dobles-Escudos tienen dos modos de trabajo.

El primero es cuando realmente trabajan como Doble-Escudo; de tal forma que el avance se hace apoyándose en los grippers y, de esta forma, la colocación del anillo de dovelas no frena el avance y el grado de utilización de la tuneladora es el máximo posible.

El segundo modo de trabajo de los Dobles-Escudos es cuando avanzan apoyándose en los anillos de dovelas, como en un Escudo Simple, debido a que la presión inducida por los grippers en el terreno induce la caída de piedras sobre el escudo telescópico dificultando, notablemente, el avance del escudo trasero o re-gripping.

Evidentemente, cuando un Doble-Escudo trabaja como Simple Escudo la colocación de los anillos de dovelas frena el avance de la tuneladora, desciende su grado de utilización y, por lo tanto, el avance.

La decisión de pasar del modo Doble-Escudo al de Simple Escudo se toma en obra muchas veces sin acogerse a un criterio claro y unívoco; lo cual es fuente de incertidumbres y errores.

Por ello, para ajustar los criterios de valoración del RME₀₆ se ha tomado la decisión de trabajar sólo con los datos de los tramos de túnel que han sido excavados con Doble-Escudo trabajando en modo Doble-Escudo, por considerar estos datos como los más fiables.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En los apartados siguientes se presentan los resultados obtenidos, a lo largo de 2006, para mejorar las prestaciones del RME.

3.1. RME₀₇

Para realizar un ajuste fino en los parámetros de valoración del RME, se ha trabajado con una base de datos integrada por 175 tramos de túneles, cuya longitud acumulada es de 16,4 km; tal como se muestra en el **Cuadro 3.1.I.**

TÚNEL	TRAMOS ANALIZADOS	LONGITUD ACUMULADA (km)	PROPORCIÓN (%)
Guadarrama 3	71	7.155	43,3
Guadarrama 4	62	7.468	45,7
Abdalajís Oeste	42	1.768	11,0
TOTAL	175	16.391	100,0

Cuadro 3.1.I.- Tramos de túnel analizados.

En los trabajos realizados para ajustar las valoraciones de los cinco parámetros que integran el RME se han seguido los siguientes criterios:

- I. Se ha trabajado con los datos de los tramos de túnel con RME > 70; ya que corresponden a los terrenos más apropiados para los Dobles-Escudos. Esto ha supuesto trabajar con 157 tramos; lo cual supone el 89,7% de los 175 tramos que integraban la base de datos de partida.
- II. Se han establecido unas relaciones analíticas para valorar cada uno de los parámetros que integran el RME, con objeto de minimizar los errores en la calificación.

Estas relaciones se han establecido por pasos definiendo una función analítica para cada uno de los parámetros del RME: σ_c ; DRI..., y calculando en cada caso el coeficiente de correlación RME/ARA_T. Si este coeficiente era mejor que el obtenido con el RME₀₆ se aceptaba la función analítica y, en caso contrario, se seguía buscando una mejor.

- III. Una vez establecidas las relaciones analíticas para definir la valoración de los cinco parámetros del RME se modificó su valoración máxima, variándolos de dos en dos, y se calculó para cada hipótesis el nuevo coeficiente de correlación. En cada caso, la hipótesis se aceptaba si el coeficiente de correlación era mejor que el obtenido en las hipótesis anteriores.

Después de trabajar con veintidós hipótesis se ha llegado a la versión ajustada del RME₀₇ que se muestra en la **Tabla 3.1.I.**

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(**0)		5	

** Para rocas arcillosas.

Tabla 3.1.I.- Valores característicos del RME₀₇.

En esta tabla se presentan los valores característicos para cada uno de los tramos en que se han dividido los campos de variación de cada parámetro y sólo debe utilizarse para tener una visión de conjunto del RME.

Para valorar de forma precisa cada parámetro deben utilizarse las cinco gráficas presentadas en la **Figura 3.1.a**.

Respecto al RME₀₆ la nueva versión RME₀₇ supone dos cambios apreciables.

1. La valoración máxima de σ_{ci} pasa de 15 puntos en el RME₀₆ a 25 puntos en el RME₀₇.
2. La valoración máxima del efecto de las discontinuidades en el frente pasa de 40 puntos en el RME₀₆ a 30 puntos en el RME₀₇.

Estas modificaciones, además de ser resultado del análisis estadístico realizado, están en concordancia con algunas observaciones realizadas a los autores por expertos relevantes en la utilización de tuneladoras; como es el caso de Remo Grandiori (SELI, Spa.).

Una vez recalculados los valores del RME₀₇ para cada uno de los 175 tramos de túneles de la base de datos, en la **Figura 3.1.b** se muestra la correlación encontrada entre el RME₀₇ y el ARA_T para los Dobles-Escudos; trabajando como dobles-escudos.

En esta figura se aprecia claramente que los tramos de túnel en los que con más frecuencia los Dobles-Escudos trabajan como dobles-escudos corresponden a valores de RME₀₇ > 70 y que para valores RME₀₇ < 50, en los 175 tramos analizados, los Dobles-Escudos no han trabajado en modo doble-escudo.

3.2. EJEMPLO DE CÁLCULO DEL RME

Con objeto de dejar totalmente claro el cálculo del RME₀₇, en la **Figura 3.2.a** se presenta un ejemplo de cálculo de un caso real utilizando las gráficas de valoración presentadas en la Figura 3.1.a.

3.3. AJUSTE DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL RME₀₇ Y EL ARA_T PARA LOS DOBLES-ESCUDOS TRABAJANDO COMO DOBLES-ESCUDOS

El coeficiente de correlación calculado para el ajuste, representado en la Figura 3.1.b, en la región RME₀₇>70, es de R = 0,76 que es aceptable; pero indica que existe una dispersión apreciable en el ajuste realizado.

Para disminuir la dispersión en el ajuste se han analizado los datos disponibles intentando mejorar el sentido físico del ajuste realizado.

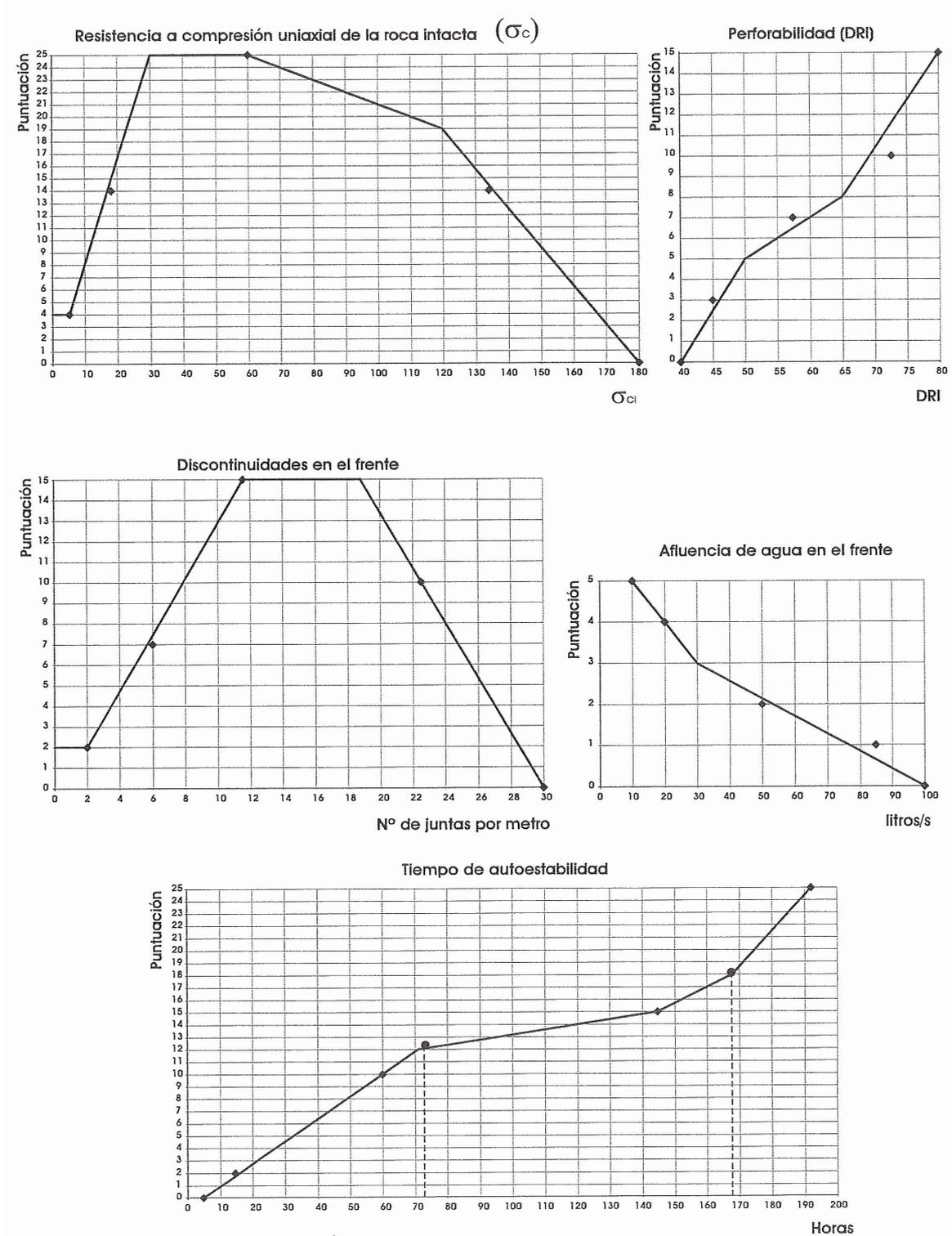


Figura 3.1.a.- Valoración de los parámetros del RME₀₇.

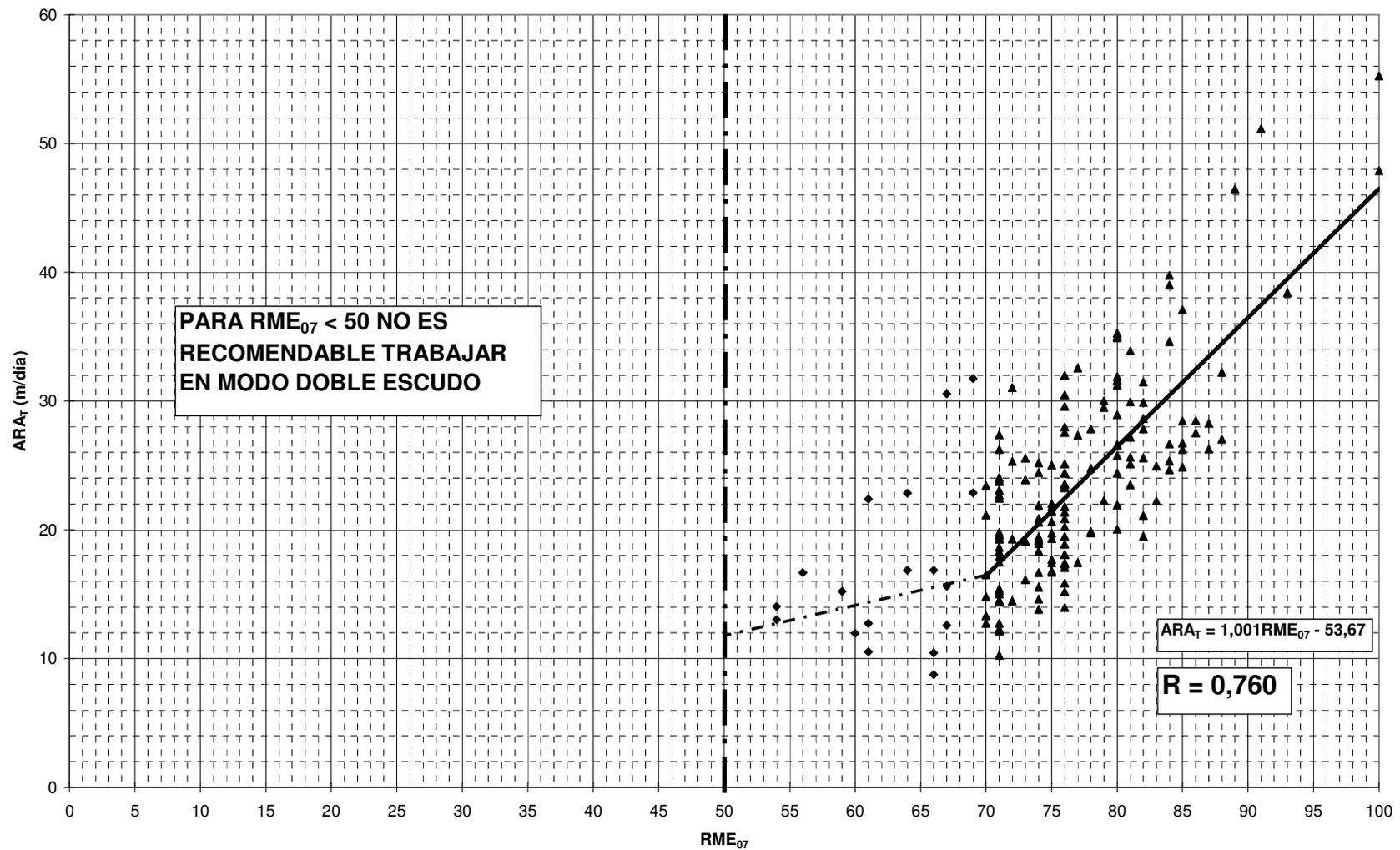
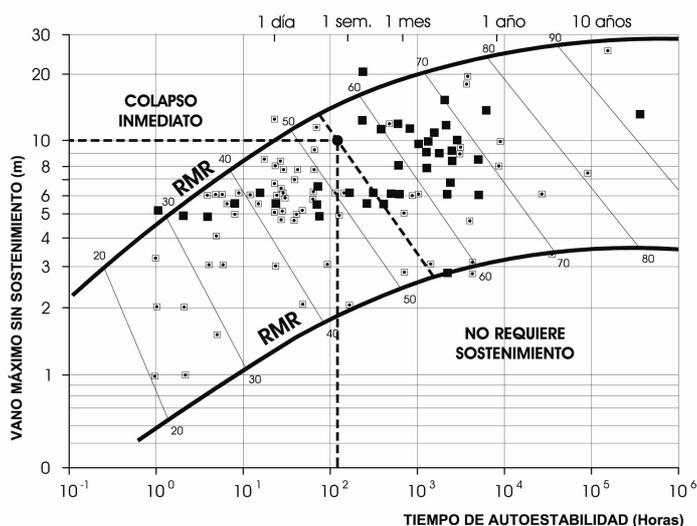


Figura 3.1.b.- Correlación inicial entre el RME_{07} y ARA_T para los Dobles-Escudos trabajando como dobles-escudos.

CÁLCULO DEL RME

TÚNEL: Abdalajís **P.K.:** 3+245 **LITOTIPO.:** Calizas
RECUBRIMIENTO: 250 m **R.M.R.:** 43 **Ø EXCAVACIÓN:** 10,0 m

1.- Estimación del tiempo de autoestabilidad.



$$RMR_{TBM} = 0,80 \cdot RMR + 20 = \dots 54 \dots$$

Tiempo de autoestabilidad: **110** horas

2.- Valoración de los parámetros de RME

* Resistencia a compresión simple de la roca intacta	$\sigma_C = \dots 67 \dots$ MPa	⇒	24
* Perforabilidad	DRI = 76	⇒	13
* Discontinuidades			
Homogeneidad: Homogeneo	⇒	10	} ⇒ 25
Nº de juntas por metro: 21	⇒	12	
Orientación respecto al eje del túnel: 3	⇒	3	
* Tiempo de autoestabilidad:	horas 110	⇒	14
* Afluencia de agua en el frente:	l/s 65	⇒	1,5

RME₀₇ Calculado

77,5

Figura 3.2.a.- Ejemplo de cálculo del RME₀₇.

Considerando la gráfica de valoración de la resistencia a compresión simple de la roca intacta, σ_{ci} , mostrada en la Figura 3.1.a, se ha llegado a la conclusión de que un mismo valor del RME_{07} puede corresponder a un terreno con una $\sigma_{ci} < 60$ MPa y a otro con $\sigma_{ci} > 60$ MPa.

Aunque los dos terrenos tengan el mismo valor del RME es evidente que el que tenga una $\sigma_{ci} < 60$ MPa permitirá obtener avances de la tuneladora superiores al que tenga una $\sigma_{ci} > 60$ MPa.

Este hecho ha podido ser claramente constatado en los Túneles de Guadarrama, en donde en tramos con terrenos auto-estables y con $\sigma_{ci} < 30$ MPa se han obtenido los mejores avances; comprendidos entre 40 y 50 m/día.

De acuerdo con estos hechos, se ha llegado a la conclusión de que la correlación entre el RME_{07} y el ARA_T para los dobles-escudos, trabajando en modo doble-escudo está mejor definida por dos rectas; una para $\sigma_{ci} > 45$ MPa y otra para $\sigma_{ci} \leq 45$ MPa.

En la **Figura 3.3.a** se representa el resultado de las correlaciones encontradas que están definidas por las relaciones siguientes:

$$\text{Para } \sigma_{ci} \leq 45 \text{ MPa; } \quad ARA_T = 0,813 \cdot RME_{07} - 32,56 \quad R = 0,865$$

$$\text{Para } \sigma_{ci} > 45 \text{ MPa; } \quad ARA_T = 0,597 \cdot RME_{07} - 24,88 \quad R = 0,744$$

Esta correlación es muy útil para predecir las velocidades de avance que se obtendrían con un Doble-Escudo trabajando como doble-escudo, a la vez que mejora y simplifica el ajuste presentado en la Figura 3.1.b.

4. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En los apartados siguientes se comentan las líneas futuras de investigación que se prevé seguir para mejorar las prestaciones del RME.

4.1. APLICACIÓN A LA FASE DE PROYECTO DE UN TÚNEL

Para completar las prestaciones del RME en su aplicación a la fase de proyecto de un túnel se está trabajando en las siguientes líneas de investigación:

- I. Correlacionar el RME_{07} con el ARA_T para los Simples-Escudos y los Dobles-Escudos trabajando en modo simple-escudo.
- II. Correlacionar el RME_{07} con el ARA_T para las TBM clásicas.

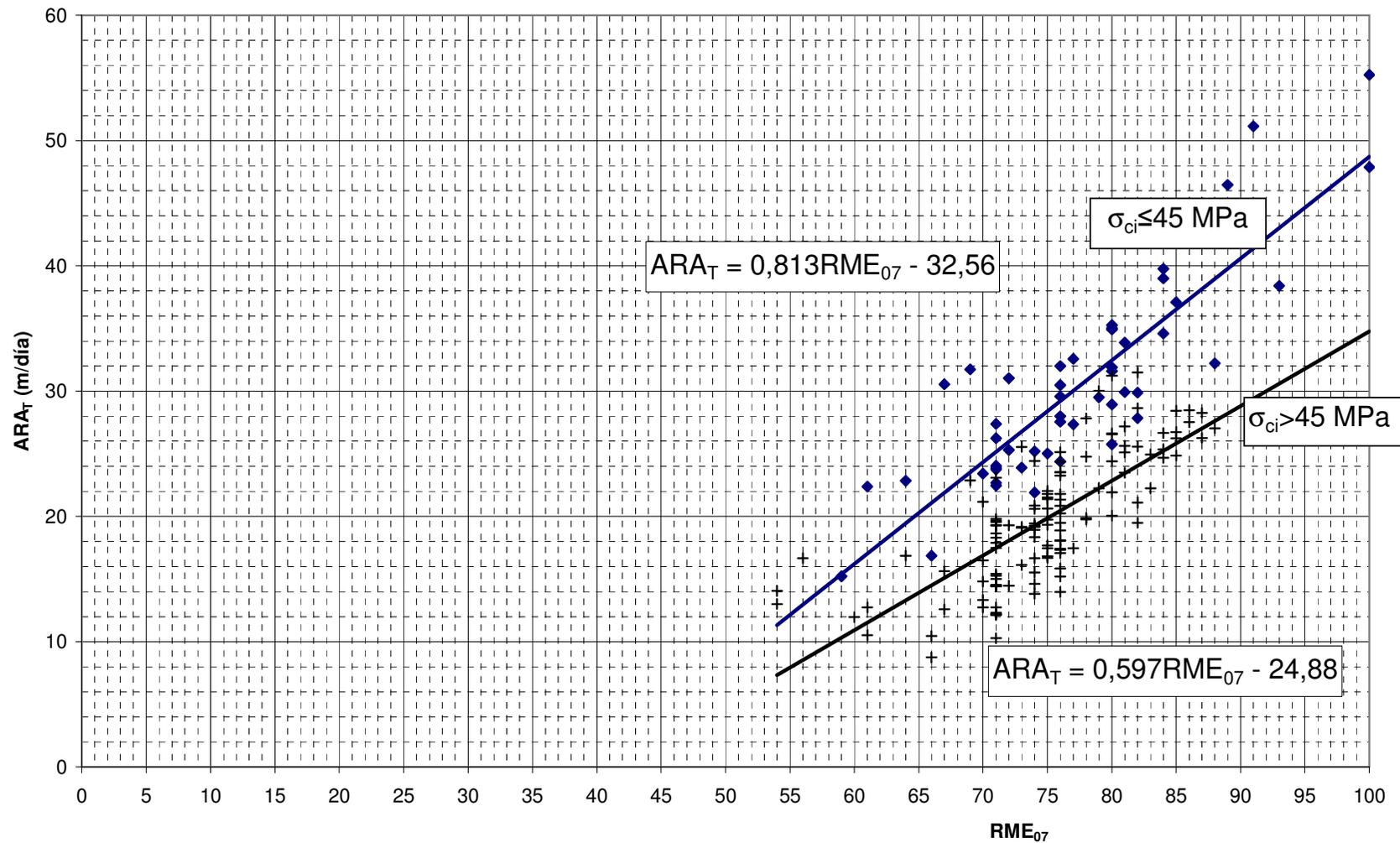


Figura 3.3.a.- Correlación final entre RME₀₇ y ARA_T para los Dobles-Escudos trabajando como dobles-escudos.

- III. Establecer los campos de aplicación de los métodos convencionales de construcción de túneles, en función del RME.

4.2. APLICACIÓN A LA FASE DE UTILIZACIÓN DE UN DOBLE-ESCUDO

Los Dobles-Escudos son tuneladoras complejas en las que la decisión de trabajar en modo doble-escudo o simple-escudo es difícil de tomar con objetividad y la mayor parte de las veces esta decisión se basa en la experiencia del responsable de la tuneladora.

Para poder tomar la decisión de trabajar en modo doble-escudo o simple-escudo con más objetividad sería muy interesante disponer de un criterio técnico ligado exclusivamente a las características de la excavación.

Este criterio no puede basarse exclusivamente en el RME ya que la caída de piedras en el escudo telescópico, que dificulta el re-gripping, está directamente asociada al tiempo de auto-estabilidad y a la falta de resistencia del terreno para aceptar la sobre-presión inducida por los grippers.

Otro problema que hay que resolver es la dificultad que se plantea en un Doble-Escudo para inspeccionar el terreno; pues la tuneladora, físicamente, es como un cilindro cerrado que dificulta notablemente la inspección del terreno.

Por ello, en base a la experiencia adquirida en los últimos cinco años, parece que para establecer este criterio se deberían utilizar parámetros relacionados con la interacción entre la tuneladora y el terreno; como son la energía específica de excavación o la granulometría del escombros procedente del frente de excavación.

5. CONCLUSIONES

Con objeto de dar al RME una mayor utilidad práctica se han desarrollado dos líneas de trabajo; por un lado, se han introducido dos coeficientes que tienen en cuenta la interacción real entre la tuneladora, el equipo que la maneja y el terreno. Estos dos coeficientes, denominados Factor de aprendizaje (F_a) y Factor de equipo (F_e) permitan pasar del ARA teórico, previsto a partir del RME, al ARA realmente obtenido en la realidad.

Por otro lado, se ha incrementado la base de datos disponibles con nuevos datos sobre tramos de túneles construidos con Dobles-Escudos trabajando en modo doble-escudo. Trabajando con la base de datos ampliada se ha establecido una nueva tabla de valoración de los cinco parámetros que integran el RME y se ha ajustado una relación específica entre el RME_{07} y el ARA_T para los Dobles-Escudos, trabajando en modo doble-escudo.

En un próximo futuro se espera poder encontrar otras correlaciones específicas para los Escudos-Simples y los Dobles-Escudos trabajando en modo escudo-simple, así como para las TBM clásicas y los métodos convencionales.

6. **BIBLIOGRAFÍA**

- ◆ ADIF. “El Túnel de Guadarrama”. Ed. Entorno Grafico. Madrid, 2005.
- ◆ Bieniawski, Z.T.; Celada, B.; Galera, J.M. y Álvarez, M. “Rock Mass Excavability (RME) Indicator: New Way to Selecting the Optimum Tunnel Construction Method”. ITA World Tunnelling Congress. Seoul, 2006.
- ◆ Dela Valle, N. “Barcelona’s new backbone runs deep”. Tunnels & Tunnelling Int. June 2005.
- ◆ Weber, W.; Daoud, H. y Fernández, E. “Challenging TBM tunnelling at Abdalajís”. Tunnels & Tunnelling Int. May 2005.

_____ . _____