

Revisión y puesta al día del sistema RME para determinar el rendimiento de tuneladoras.

# Nuevas aplicaciones del Índice RME para la selección del tipo de tuneladora

El índice *Rock Mass Excavability (RME)* fue presentado en 2006, para evaluar la excavabilidad del terreno y ser utilizado como una herramienta para escoger el tipo de tuneladora más apropiado para construir un túnel. En este artículo se presentan los resultados de los trabajos de investigación realizados sobre el concepto del *RME* durante la segunda mitad de 2006 y 2007, y que han permitido establecer unas correlaciones entre el *RME* y el *ARA<sub>r</sub>*, para poder obtener los rendimientos de los tres tipos de tuneladoras más frecuentes: TBM abiertas, escudos simples y dobles escudos.

El índice *Rock Mass Excavability* fue presentado en el Congreso de la ITA celebrado en Seul, *Bieniawski et al* (2006), para evaluar la excavabilidad del terreno y ser utilizado como una herramienta para escoger el tipo de tuneladora más apropiado para construir un túnel.

El *RME* se calculaba valorando los cinco parámetros siguientes:

- Resistencia a compresión simple de la roca intacta ( $\sigma_d$ ), puntuándolo entre 0 y 15 puntos.
- *Drilling Rate Index*, puntuándolo entre 0 y 15 puntos.
- N° de discontinuidades presentes en el frente, su orientación respecto al eje del túnel y la homogeneidad del frente, puntuándolos entre 0 y 40 puntos.
- Tiempo de autoestabilidad de la excavación, puntuándolo entre 0 y 25 puntos.
- Afluencia de agua en el frente de la excavación, puntuándolo entre 0 y 5 puntos.

La suma de las evaluaciones de estos cinco parámetros varía entre 0 y 100 puntos y cuanto mayor es el *RME* más fácilmente resulta la excavación del terreno.

A lo largo de 2007, tras algunas sugerencias recibidas del Prof. *Evert Hoek* y del Dr. *Remo Grandori* (*Seli Spa*), y tras haber ampliado la base de datos inicial con otros

datos procedentes de los túneles de *San Pedro* (España), *Gilgel Gibe II* (Etiopía) y *Katzenberg* (Alemania), se reconsideró la ponderación de los cinco parámetros que integraban el *RME* y tras el oportuno análisis estadístico con la base de datos ampliada se decidieron las siguientes modificaciones:

**Palabra clave:** ARA, DOBLE ESCUDO, ESCUDO, EXCAVABILIDAD, RME, TBM, TÚNEL.

- **Z.T. BIENIAWSKI**, *Bieniawski Design Enterprises*. Prescott, Arizona, USA.
- **B. CELADA**, Catedrático de *Obras Subterráneas*. U.P Madrid.
- **J.M. GALERA**, *Geocontrol*, S.A. Madrid.
- **I. TARDÁGUILA**, *Geocontrol*, S.A. Madrid.

- Aumentar la ponderación de la resistencia a compresión simple de 15 a 25 puntos.
- Reducir la ponderación del efecto de las discontinuidades en el frente de 40 a 30 puntos.

En el **Cuadro 1** se muestran los nuevos criterios de cálculo del *RME* aplicando las nuevas ponderaciones.

Para evitar errores en la interpolación se recomienda que la evaluación de los cinco parámetros que integran el *RME* se haga a partir de las gráficas presentadas en las **Figs. 1 y 2**.

## Parámetro para predecir el avance de las tuneladoras

Para poder utilizar el *RME* como herramienta para predecir el avance de las tuneladoras se decidió emplear el concepto del *Avance Medio en un tramo del Túnel*, que se identifica con los términos *Average Rate of Advance, ARA*.

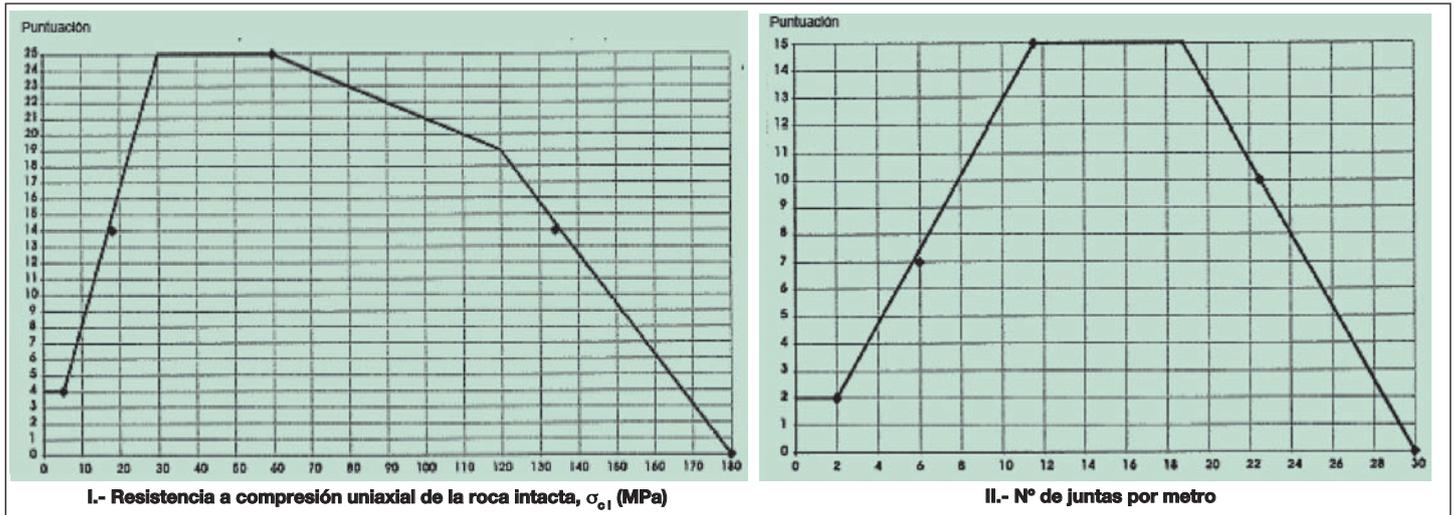
El *ARA* se calcula dividiendo la longitud de un tramo de túnel, homogéneo desde el punto de vista del *RME*, entre el tiempo invertido en su excavación y se expresa en m/día.

Los tramos que se utilizan para obtener el *ARA* deben cumplir las siguientes condiciones:

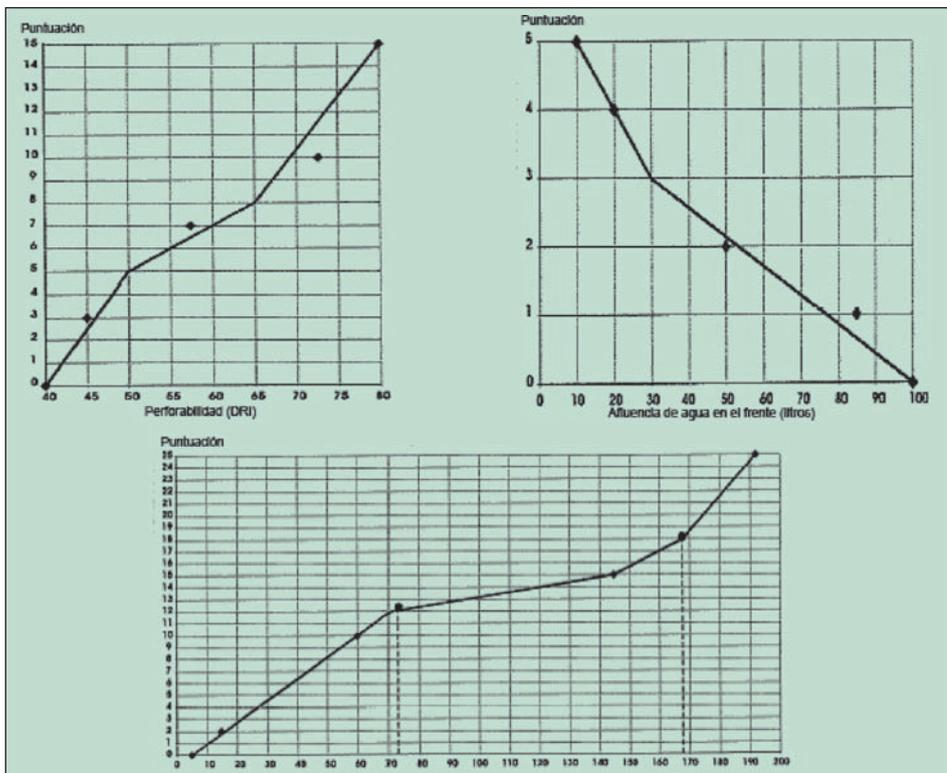
- Su longitud debe ser superior a 30 m.
- A lo largo del tramo no deben producirse variaciones significativas de las condiciones geomecánicas.

Resistencia a Compresión uniaxial para la roca intacta [0 - 25 puntos]										
$\sigma_d$ (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			N° 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] .- Ponderación de los parámetros que integran el RME08.



[Figura 1] .- Gráficas para la valoración de  $\sigma_{ci}$  y del número de discontinuidades en el frente.



[Figura 2] .- Gráficas para la valoración del DRI, Tiempo de Autoestabilidad y Afluencia de agua en el frente.

- A lo largo del tramo no se consideran reparaciones extraordinarias de mantenimiento de la tuneladora.
- A lo largo del tramo el tiempo dedicado a la excavación debe estar comprendido entre el 30 % y el 60 % del ciclo de trabajo.

Para evitar errores es necesario aclarar que se ha desechado la posibilidad de calcular el **ARA** a partir de la velocidad de penetración, que normalmente varía entre 6 y 60 mm/min ; ya que, aunque este parámetro esté disponible a tiempo real en la cabina de control de las tuneladoras, su integración a lo largo de 24 horas implica, normalmente, unos errores importantes.

Ello es debido a que para calcular el avance diario a partir de la velocidad de penetración, es necesario conocer el porcentaje del día que la tuneladora dedica a la excavación pura y la experiencia indica que conocer este dato con una precisión razonable es una tarea casi imposible.

De acuerdo con todo lo anterior debe quedar claro que el **ARA no puede ser utilizado para predecir avances record de las tuneladoras**; ya que éstos están ligados a velocidades de penetración y porcentajes del tiempo dedicado a la excavación extraordinariamente altos, que se salen del rango en el que el **ARA** es representativo.

## ARA teórico y real

El **RME** sólo está pensado para evaluar la excavabilidad del terreno, teniendo en cuenta la orientación del eje del túnel respecto a la familia de discontinuidades más importante.

Por ello; para tener en cuenta factores específicos importantes como el diámetro del túnel el grado de adaptación de la tripulación de la tuneladora al terreno y la experiencia de ésta es necesario definir un **ARA real (ARA<sub>R</sub>)** que corrija la previsión del **ARA** derivado directamente del **RME**, que se denominará en lo sucesivo **ARA teórico (ARA<sub>T</sub>)**.

La relación entre ambos es la siguiente:

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

Donde:

$F_E$  = factor que valora la habilidad del equipo que tripula la tuneladora.

$F_A$  = factor que valora la adaptación al terreno excavado.

$F_D$  = factor que tiene en cuenta el diámetro de la excavación.

En los apartados siguientes se aclara la definición de los tres factores que relacionan el **ARA<sub>R</sub>** con el **ARA<sub>T</sub>**.

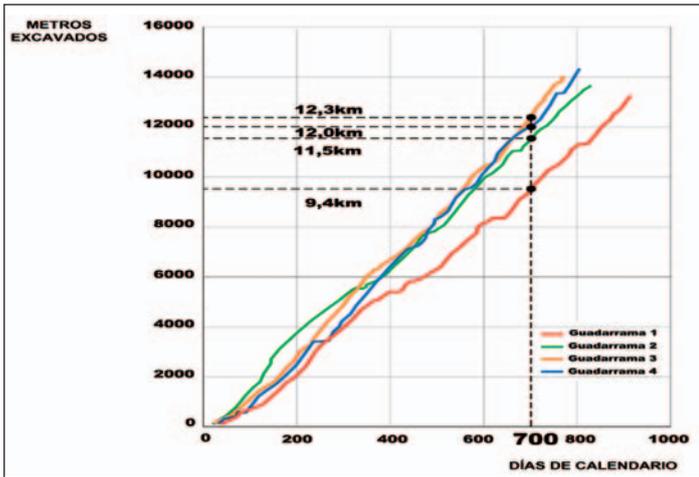
## Factor de equipo (F<sub>E</sub>)

Durante la construcción del Túnel de Guadarrama, con tipología bitubo y 28 km de longitud, se puso en evidencia la influencia que tiene la experiencia de la tripulación de una tuneladora sobre los resultados obtenidos.

Este túnel fue excavado, entre octubre de 2002 y diciembre 2004, con cuatro tuneladoras tipo Doble-Escudo; trabajando dos en cada uno de los tubos del túnel.

Las tuneladoras eran gemelas, dos fabricadas por *Wirth* y las otras dos por *Herrenknecht*.

Los terrenos excavados por cada una de las cuatro tuneladoras han sido prácticamente los mismos, con la salvedad de que sólo las



[Figura 3] .- Evolución del avance de las cuatro tuneladoras del Túnel de Guadarrama.

TUNELADORA	FABRICANTE	LONGITUD EXCAVADA EN 700 DÍAS (KM)		AVANCE MEDIO (M/DÍA)	
		TOTAL	%	TOTAL	%
GU-1 (BOCA SUR O)	HERRENKNECHT	9,4	100	13,4	100
GU-2 (BOCA SUR E)	WIRTH	11,5	122	16,4	122
GU-3 (BOCA NORTE O)	WIRTH	12,3	131	17,6	131
GU-4 (BOCA NORTE E)	HERRENKNECHT	12,0	128	17,1	128

[CUADRO II].- Resultados de las cuatro tuneladoras del Túnel de Guadarrama tras 700 días de trabajo.

dos tuneladoras que trabajaban por la boca Norte atravesaron los 450 m de la falla de la *Humbria*, situada en la parte central del túnel.

En la **Fig. 3** se muestra la evolución del avance de cada una de las cuatro tuneladoras que excavaron el Túnel de Guadarrama y en ella se aprecia claramente que al cabo de 700 días de excavación había grandes diferencias entre los avances de las tuneladoras:

- GU - 1: 9,4 km
- GU - 2: 11,5 km
- GU - 3: 12,3 km
- GU - 4: 12,0 km

En el **Cuadro II** se comparan los metros excavados a los 700 días de trabajo y los avances medios logrados por cada tuneladora y en él se puede apreciar claramente que el origen de la tuneladora no ha sido relevante en este caso y, dado que los terrenos excavados por cada tuneladora son semejantes, se debe concluir que las importantes diferencias observadas son atribuibles a la diferente habilidad de los equipos que tripularon las tuneladoras.

De acuerdo con lo anterior se ha definido el **Factor de Equipo ( $F_E$ )**, siguiendo las sugerencias del Dr. Remo Grandori, mediante la ecuación:

$$F_E = 0,7 + F_{E1} + F_{E2} + F_{E3}$$

Donde los factores  $F_{E1}$ ,  $F_{E2}$  y  $F_{E3}$  se evalúan de acuerdo con los criterios mostrados en el **Cuadro III**. De acuerdo con estos criterios el valor mínimo de  $F_E$  es 0,7 y el máximo 1,20; valores que concuerdan bastante bien con los datos extremos mostrados en el **Cuadro II**.

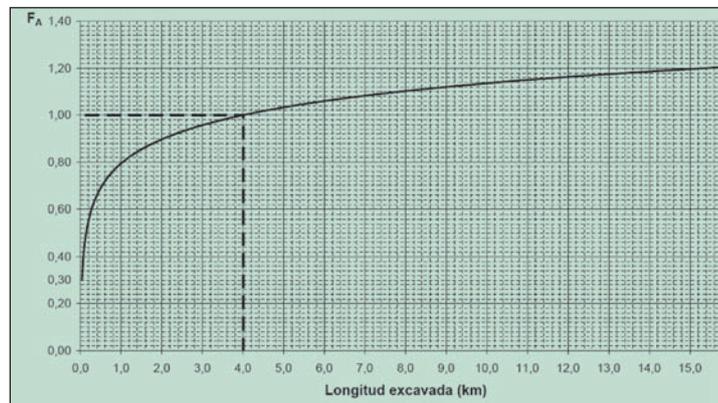
### Factor de adaptación al terreno ( $F_A$ )

Durante la construcción del Túnel de Guadarrama, cuando se llevaban excavados varios

kilómetros, se observó que en tramos con un RME similar la misma tuneladora conseguía avances superiores a medida que era mayor la longitud que había excavado desde el origen.

A partir de estas experiencias se ha definido el **factor de adaptación al terreno ( $F_A$ )** mediante la curva representada en la **Fig. 4**; que también engloba el tramo de aprendizaje que comprende los primeros cientos de metros excavados.

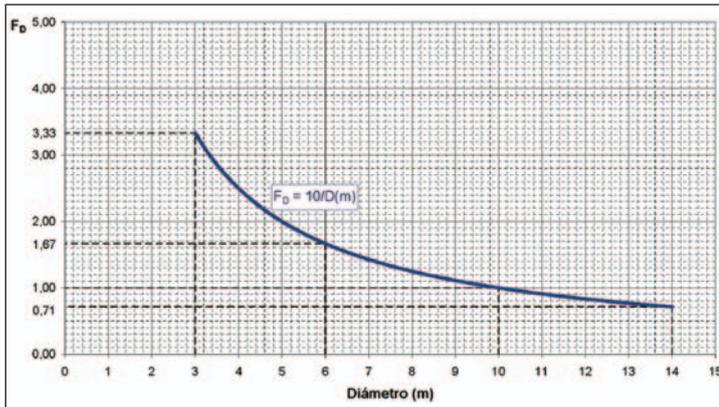
De acuerdo con dicha figura se considera que  $F_A = 1$  cuando se llevan excavados 4 km



[Figura 4].- Variación  $F_A$  con la longitud excavada.

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	NO	NO	≤ 1 MES	> 1 MES
Valor de $F_{E3}$	0,075	0	0	0,075	0

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



■ [Figura 5].- Variación de  $F_D$  con el diámetro de excavación.



■ [Foto 1].- TBM abiertas utilizadas en los túneles de Lotschberg (Suiza) y San Pedro (España).

de túnel, y este valor aumenta hasta  $F_A = 1,2$  cuando se alcanzan los 16 km de excavación.

Por el contrario, cuando se inicia la excavación con tuneladora se supone que  $F_A = 0,3$ ; es decir los avances suponen sólo el 30 % de los que se alcanzan en régimen de crucero.

### Factor relacionado con el diámetro de excavación

Para definir el factor que tiene en cuenta el efecto del diámetro de la excavación sobre la velocidad de avance ( $F_D$ ) se ha adoptado la expresión:

$$F_D = 10 / D(m)$$

donde  $D$  es el diámetro de la excavación, expresado en m. En la Fig. 5 se representa la variación de  $F_D$  frente al diámetro de excavación.

### Correlación entre el RME y el $ARA_T$ para los tipos más frecuentes de tuneladoras

Para poder correlacionar el RME con los avances de las tuneladoras, a través del  $ARA_T$ , hay que tener presente que la valoración de la resistencia a compresión simple, que se ha mostrado en la Fig. 1 (I), supone admitir dos escenarios completamente diferentes para el trabajo de la tuneladora. En esa figura se observa que una valoración de 16 puntos puede obtenerse en un terreno con resistencia a compresión simple de 20 MPa y también en otro cuya resistencia sea de 130 MPa.

Por ello, suponiendo que los otros cuatro parámetros que integran el RME tuvieran también la misma valoración resultaría que ambos tendrían el mismo RME.

Sin embargo es evidente que la tuneladora que trabajara en un terreno de  $\sigma_{cI} = 20$  MPa obtendría unos avances muy superiores a los que lograría la tuneladora que trabajara en otro terreno con  $\sigma_{cI} = 130$  MPa.

Por ello, al correlacionar los valores homogeneizados del  $ARA_T$  de la base de datos con

la que trabajamos con los correspondientes valores del RME se ha considerado necesario distinguir dos tipos de terrenos; según que su resistencia a compresión simple sea mayor o menor que 45 MPa.

En los apartados siguientes se presentan las correlaciones encontradas para los tipos más habituales de tuneladoras.

### TBM abiertas

Las tuneladoras más antiguas que se conocen son las TBM abiertas y se llaman así porque el terreno excavado se puede observar inmediatamente detrás de la cabeza de la tuneladora; tal como se aprecia en la Foto 1.

Estas tuneladoras avanzan apoyándose contra el terreno mediante unos *grippers* y para estabilizar la excavación se colocan sostenimientos tradicionales.

Para correlacionar el  $ARA_T$  con el RME se dispone de datos sobre 49 tramos del Túnel de San Pedro (España); de los cuales 30 corresponden a terrenos con  $\sigma_{cI} > 45$  MPa y 19 a terrenos con  $\sigma_{cI} < 45$  MPa.

Tal como se indica en el Cuadro IV, estos 49 tramos suponen una longitud acumulada de túnel de 1.724 m; lo cual significa que el tramo medio tiene una longitud de unos 35 m.

En la Fig. 6 se muestran los puntos representativos de los 49 tramos de túnel estudiados y las correlaciones encontradas, que corresponden a las ecuaciones:

Para  $\sigma_{cI} > 45$  MPa:

$$ARA_T = 0,839 \cdot RME - 40,8 \quad (1)$$

Para  $\sigma_{cI} < 45$  MPa:

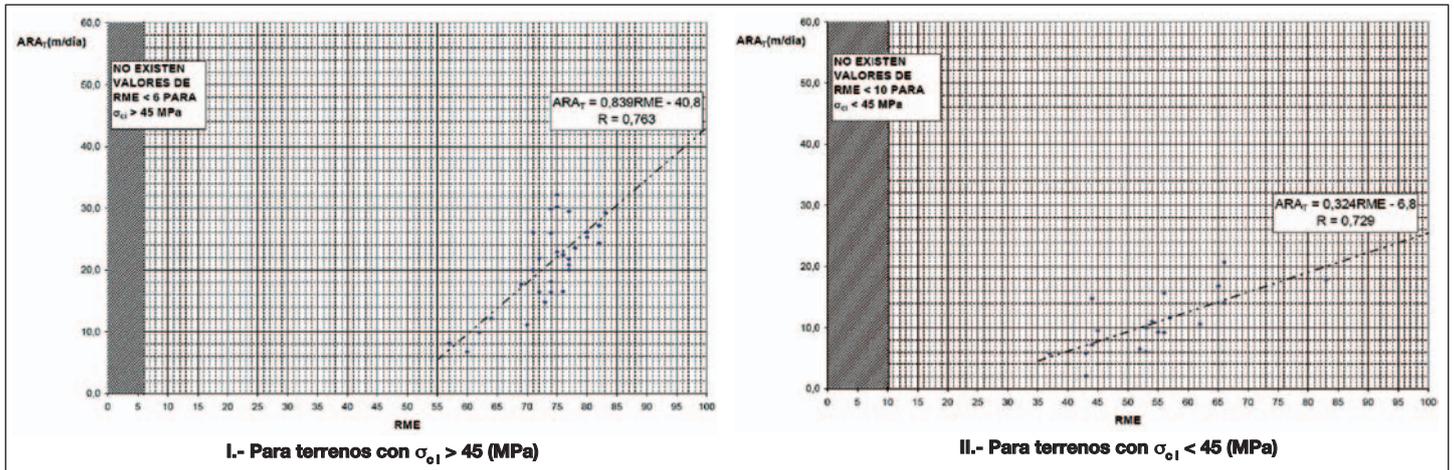
$$ARA_T = 0,324 \cdot RME - 6,8 \quad (2)$$

A partir de estas correlaciones se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. Para terrenos con  $\sigma_{cI} > 45$  MPa el avance medio máximo, es de unos 43 m/día. Y en el caso de que  $\sigma_{cI} < 45$  MPa este valor desciende a unos 25 m/día. Esta diferencia es lógica, ya que en los terrenos poco resistentes es preciso colocar sostenimientos más robustos que en los terrenos de mayor resistencia; lo cual frena el avance de las TBM.
2. En el caso de terrenos con  $\sigma_{cI} > 45$  MPa, los avances medios estimados para  $RME < 55$  están por debajo de los 6 m/día. Situación que también es lógica; ya que el RME baja de 55 puntos para combinaciones de terrenos muy resistentes,  $\sigma_{cI} > 150$  MPa, y homogéneos, que son muy difíciles de excavar.
3. Para valores del RME inferiores a 35 puntos, actualmente, no se dispone de datos fiables sobre los avances de las TBM abiertas; aunque todo hace indicar que, para  $\sigma_{cI} < 45$  MPa, los avances medios de estas tuneladoras en estos terrenos serán inferiores a 5 m/día.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE DE LA ROCA INTACTA (MPa)	Nº TRAMOS	LONGITUD ACUMULADA (m)	%
> 45	30	1.013,7	58,8
≤ 45	19	710,4	41,2
TOTAL	49	1.724,1	100

■ [Cuadro IV].- Distribución de los tramos construidos con TBM abierta.



■ [Figura 6].- Correlaciones entre RME y ARAT para las TBM abiertas.

## Escudos simples

Los Escudos simples se diferencian esencialmente de las TBM en que el sostenimiento-revestimiento de la excavación no se hace con elementos convencionales, sino con anillos de dovelas y en que la máquina no se apoya en el terreno para avanzar; sino en el último anillo de dovelas colocado.

Por lo que se refiere a la cabeza de excavación hay que señalar, que la de los Escudos simples suele ser casi idéntica a la de las TBM's; aunque cuando se prevé excavar terrenos blandos algunos discos se sustituyen por herramientas cortadoras, como se aprecia en la Foto 2.

Para encontrar las correlaciones entre el RME y el  $ARA_T$ , en el caso de los Escudos simples se dispone de 62 tramos correspon-

dientes a los Túneles de Guadarrama (España) y Katzenberg (Alemania).

En el Cuadro V. se indican las características de estos 62 tramos que totalizan 3.620 m de túnel, con una longitud media de los tramos de unos 58 m.

En la Fig. 7 se representan los puntos correspondientes a los 62 tramos estudiados y las correlaciones encontradas, que corresponden a las ecuaciones siguientes:

$$\text{Para } \sigma_{ci} > 45 \text{ MPa:} \quad ARA_T = 10 \ln(RME) - 13 \quad (3)$$

$$\text{Para } \sigma_{ci} < 45 \text{ MPa:} \quad ARA_T = 23 \left( 1 - 242^{\frac{45-RME}{17}} \right) \quad (4)$$

A partir de estas correlaciones se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. Para terrenos con  $\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$  el avance medio máximo estimado es de unos 33 m/día y en el caso de terrenos con  $\sigma_{ci} > 45 \text{ MPa}$ , este valor desciende a unos 23 m/día.
2. Para los terrenos con  $\sigma_{ci} > 45 \text{ MPa}$  el avance medio previsto es prácticamente independiente del valor del RME; aunque a partir del RME = 50 puntos desciende bruscamente por la misma razón expuesta en el apartado de TBM abiertas.
3. En el caso de los terrenos con  $\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$  la experiencia indica que con los Escudos se pueden obtener avances razonables en todo el rango de variación del RME; aunque no hay datos concretos para RME < 34.



■ [Foto 2].- Cabeza de uno de los escudos que excavó el túnel de Katzenberg.

## Dobles escudos apoyándose en los grippers

Las tuneladoras tipo *doble-escudo* son una combinación de una TBM y un Escudo; de tal forma que estas tienen una cabeza de excavación y unos grippers para apoyarse en el terreno similares a los de las TBM, cuando éste es de buena calidad, y también un erector de dovelas para colocar los anillos de sostenimiento-revestimiento, sobre los cuales la tuneladora puede apoyarse para avanzar cuando el terreno no tiene la resistencia necesaria.

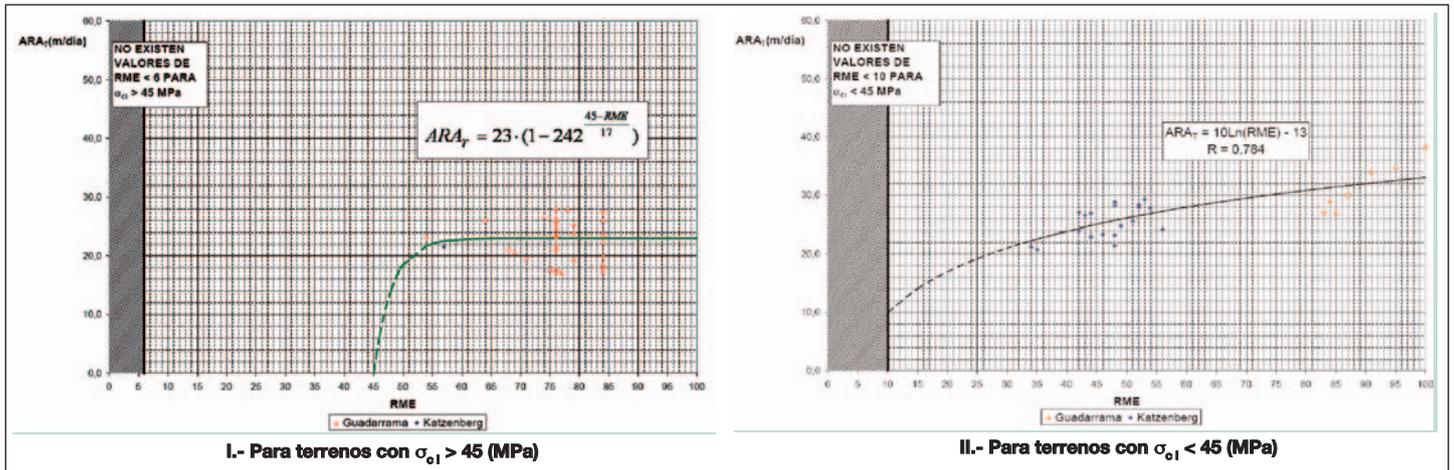
Mecánicamente, las tuneladoras de este tipo constan de dos escudos cilíndricos que deslizan sobre otro interior a éstos. En el Escudo delantero se aloja la rueda de corte, el rodamiento principal y el sistema de accionamiento de la rueda de corte. En el Escudo trasero están alojados los grippers y los cilindros de empuje para avanzar apoyándose en las dovelas.

En la Foto 3 se muestra una de las tuneladoras tipo *Doble-Escudo* que excavó el Túnel de Guadarrama.

Cuando el terreno permite el apoyo de los grippers, el *Doble-Escudo* avanza apoyándose

TÚNEL	$\sigma_{ci}$ (MPa)	Nº DE TRAMOS	LONGITUD ACUMULADA (m)	PROPORCIÓN %
KATZENBERG	< 45	20	1.560	43,1
	> 45	1	52	1,5
GUADARRAMA	< 45	7	128	3,5
	> 45	34	1.880	51,9
<b>TOTAL</b>		<b>62</b>	<b>3.620</b>	<b>100,0</b>

■ [Cuadro V].- Distribución de los tramos construidos con Escudos simples



[Figura 7].- Correlaciones entre RME y ARAT para los escudos.

se en ellos y simultáneamente se colocan los anillos de dovelas, con lo cual se aprovecha todo el tiempo disponible para excavar.

Cuando el terreno no permite el apoyo de los grippers el *Doble-Escudo* se apoya en el último anillo para avanzar, al igual que un escudo simple, y la excavación debe detenerse mientras se monta el anillo de dovelas.

En el Túnel de Guadarrama cuando las cuatro tuneladoras habían excavado 54,3 km, durante el 75 % de la longitud excavada los *Dobles-Escudos* avanzaron apoyándose en los grippers y el 25 % restante se apoyaron en el último anillo de dovelas para avanzar. ADIF (2005).

En este trabajo sólo se consideran como excavados con *Doble-Escudo* los tramos en los que éstos avanzaron apoyándose en los grippers. Los tramos del Túnel de Guadarrama construidos apoyándose en los últimos anillos de dovelas se consideran construidos por un Escudo y los datos correspondientes a estos tramos se han incluido en el análisis presentado en el apartado de escudos simples.

Para correlacionar el RME con el  $ARA_T$  en el caso de los *Dobles-Escudos* se dispone de datos sobre 225 tramos de los Túneles de Guadarrama (España), Abdalajís Oeste (España), Gilgel Gibe II Inlet (Etiopía) y Gilgel Gibe II Outlet; cuya longitud acumulada es de 20,7

km, por lo que la longitud media de estos tramos es de 92 m.

En el **Cuadro VI** se muestra la distribución de los 225 tramos analizados.

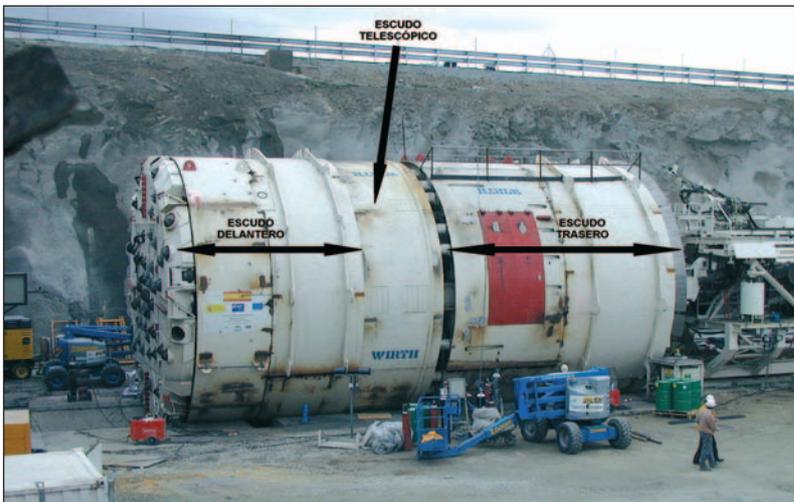
En la Fig. 8 se muestran los 225 puntos representativos de los 225 tramos de túneles construidos con *Dobles-Escudos* y las correlaciones entre el RME y ARAT, que están definidas por las ecuaciones:

Para  $\sigma_{ci} > 45$  MPa:  
 $ARA_T = 0,422 \cdot RME - 11,6$

Para  $\sigma_{ci} < 45$  MPa:  
 $ARA_T = 0,661 \cdot RME - 20,4$

A partir de estas correlaciones se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. Para terrenos con  $\sigma_{ci} < 45$  MPa el avance medio máximo estimado es de unos 45 m/día y en el caso de terrenos con  $\sigma_{ci} > 45$  MPa este valor desciende a unos 30 m/día.
2. Para terrenos con  $\sigma_{ci} < 45$  MPa y  $RME < 45$  no hay datos de *Dobles-Escudos* excavando apoyándose en los grippers; pues probablemente, para valores de  $RME < 45$  los *Dobles-Escudos* no podrán avanzar apoyándose con los grippers en el terreno y funcionarán como un Escudo.
3. Tampoco hay datos referentes a túneles construidos en terrenos con  $\sigma_{ci} > 45$  MPa y  $RME < 50$  puntos; aunque en estos casos, muy probablemente, se producirá una caída importante del  $ARA_T$ , que será prácticamente nulo para  $RME = 45$ .



[Foto 3].- *Doble-Escudo* empleado en los Túneles de Guadarrama.

TÚNEL	$\sigma_{ci}$ (MPa)	Nº DE TRAMOS	LONGITUD ACUMULADA (m)	PROPORCIÓN %
GUADARRAMA 3	< 45	11	947,2	4,6
	> 45	60	6.208,5	30,0
GUADARRAMA 4	< 45	24	2.290,8	11,0
	> 45	38	5.178,0	25,0
ABDALAJÍS OESTE	< 45	15	639,9	3,1
	> 45	27	1.128,2	5,4
GILGEL GIBE II INLET	< 45	5	432,7	2,1
	> 45	13	906,8	4,4
GILGEL GIBE II OUTLET	< 45	5	432,7	2,1
	> 45	32	2.983,4	14,4
<b>TOTAL</b>		<b>225</b>	<b>20.715,5</b>	<b>100,0</b>

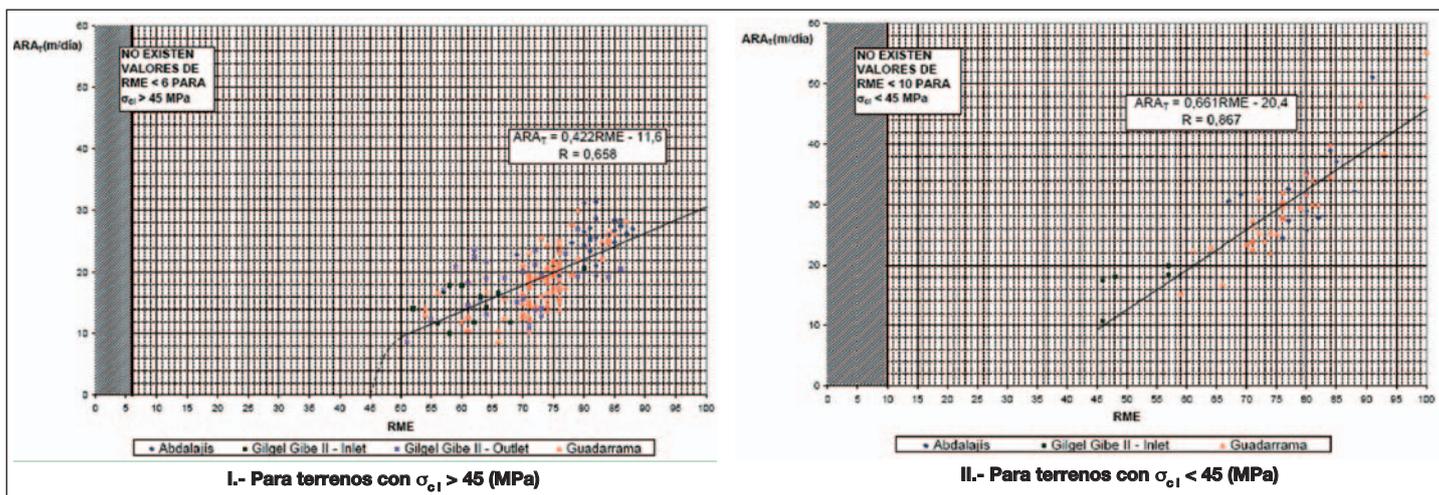
[Cuadro VI].- Distribución de los tramos construidos con *Doble Escudo* apoyándose en los grippers.

### Elección del tipo de tuneladora

En los apartados siguientes se presentan algunos criterios para la elección del tipo de tuneladora, derivados de las aplicaciones del RME.

### Campo de aplicación de cada tipo de tuneladora

En los apartados siguientes se acotan los campos de aplicación de cada tuneladora, en función del RME del terreno.



■ [Figura 8].- Correlaciones entre RME y ARAT para dobles-escudos apoyándose en los grippers.

### Terrenos con $\sigma_{ci} > 45 \text{ MPa}$

En la Fig. 9 se presentan conjuntamente las correlaciones presentadas en los apartados anteriores para los terrenos con  $\sigma_{ci} > 45 \text{ MPa}$ ; que, simplificada, se pueden denominar *terrenos resistentes*.

En esa figura, además de las tres correlaciones ya presentadas, se ha incorporado una cuarta que corresponde al *Doble-Escudo Optimizado*. Este modo de trabajo corresponde a un *Doble Escudo* en el que se consiga pasar, con la máxima precisión posible, de apoyarse en el terreno utilizando los grippers a apoyarse en el último anillo de dovelas, a medida que cambien las características del terreno.

A partir de la Fig. 9 se pueden establecer los siguientes criterios generales para la utilización de las tuneladoras en los *terrenos resistentes*:

1. En el entorno de valores de  $RME \approx 75$  puntos se consiguen avances de unos 22 m/día, con cualquier tipo de tuneladora.
2. Para terrenos con  $RME$  claramente superiores a 75, los mejores resultados se obtienen con las *TBM's abiertas*.
3. Para terrenos con  $RME$  claramente inferiores a 75, los mejores resultados se obtienen con los *Dobles-Escudos Optimizados*.
4. Los *Escudos* son las tuneladoras que consiguen los peores avances en los terrenos con  $\sigma_{ci} > 45 \text{ MPa}$ .

### Terrenos con $\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$

De forma análoga a lo expuesto en el apartado anterior, en la Fig. 10 se presentan las correlaciones entre  $RME$  y  $ARA_T$  para los terrenos con  $\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$ . De las gráficas incluidas en esta figura se obtienen las conclusiones siguientes:

1. En los terrenos con  $\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$  las tuneladoras que obtienen los mejores resultados son los *Dobles-Escudos Optimizados*;

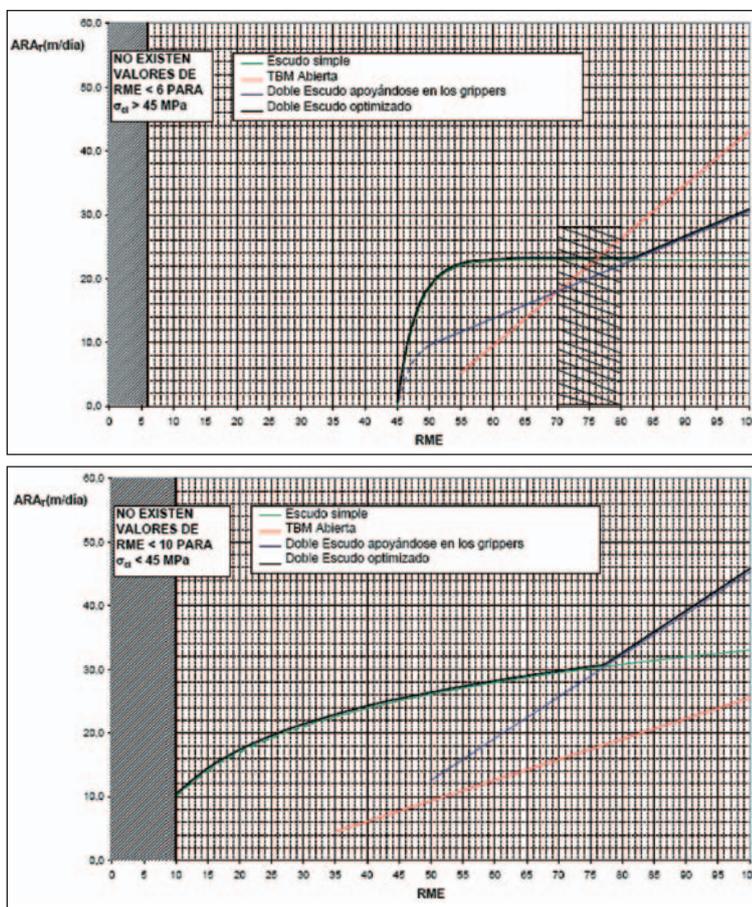
sea cual sea el valor del  $RME$ .

2. Sólo cuando el terreno tenga valores del  $RME < 77$  es más favorable la utilización de un *Escudo*; ya que en estos terrenos ese tipo de máquina proporciona los mismos resultados que los *Dobles-Escudos*, es más fácil de usar y exige una menor inversión.
3. Con las *TBM abiertas* se obtienen los peores resultados en estos terrenos; sea cual sea el valor del  $RME$ .

### Paso de las zonas de falla

El paso de las zonas de falla es el punto más débil de la utilización de las tuneladoras debido, en gran parte, a las grandes limitaciones que impone la cabeza de corte para inspeccionar el estado del frente y poner en práctica las medidas necesarias para estabilizarlo.

A este problema del frente, que es común a los tres tipos de tuneladoras estudiados, hay que añadir otro específico de las *TBM abiertas* derivado de la colocación del sostenimiento, que deberá ser muy resistente en las zonas



■ [Figura 9].- Correlación entre RME y ARAT para terrenos con  $\sigma_{ci} > 45 \text{ Mpa}$ .

■ [Figura 10].- Correlación entre RME y ARAT para terrenos con  $\sigma_{ci} < 45 \text{ Mpa}$ .

de falla y a la dificultad de apoyar los *grippers* en un terreno poco resistente.

Por ello es muy frecuente que, al atravesar las zonas de falla, tuneladoras que han obtenido excelentes rendimientos vean dramáticamente frenado su avance con paradas prolongadas durante muchos días y que, en casos extremos, sea imposible reanudar el avance.

Para evitar estos graves inconvenientes es preciso adoptar los siguientes criterios:

1. Hacer los esfuerzos necesarios en la fase de proyecto para situar las fallas con precisión y evaluar correctamente su comportamiento mecánico.
2. Establecer una metodología precisa para el paso de los tipos de fallas que se prevean.
3. Equipar las tuneladoras con los medios mecánicos necesarios para inyectar espumas en la cámara de excavación y para construir con eficiencia paraguas de micropilotes.
4. En el caso de las TBM abiertas es imprescindible que el sostenimiento pueda colocarse inmediatamente detrás de la cabeza de corte.
5. Durante la excavación en la zona de falla hay que controlar con esmero que no se produzcan sobre-excavaciones; para ello es preciso un control continuo del peso del terreno excavado, en relación con la penetración, e inspeccionar visualmente la cámara de excavación cada pase de avance.
6. En cuanto se detecte una sobre-excavación en la cámara, un Técnico experimentado debe evaluar el riesgo de que la sobre-excavación aumente y, ante la más mínima duda, debe pararse el avance e inyectar espumas entre la cabeza de corte y el terreno.

Si se respetan los criterios anteriores la mayoría de las zonas de falla se podrán excavar con tuneladoras, incluso con avances sorprendentemente altos; tal como ha sucedido en la falla de la Umbría, atravesada por los Túneles de Guadarrama

De acuerdo con experiencias habidas en España, en los últimos 15 años, en el **Cuadro VII** se indican los avances que se pueden conseguir en las zonas de falla, respetando los criterios anteriores en función del tipo de tuneladora, las condiciones del frente y la dificultad de sostenimiento.

### Cálculo del tiempo neto de excavación

Utilizando las correlaciones presentadas entre el *RME* y *ARA<sub>T</sub>*, para los tres tipos de tuneladora, y aplicando los criterios para estimar los avances en las zonas de falla, que se han propuesto en el apartado anterior es posible calcular el tiempo neto de excavación de un túnel dado.

Para ello, la primera operación a realizar es dividir el túnel en tramos de terreno homogéneos según el *RME* y valorar las condiciones de las zonas de falla.

Una vez hecha esta tramificación hay que calcular el tiempo neto de excavación de cada tramo, empleando las correlaciones presentadas entre el *RME* y *ARA<sub>T</sub>*, así como la estimación de los avances en las zonas de falla.

La suma de los tiempos de excavación de cada tramo es el tiempo neto de excavación del túnel, que permitirá calcular la velocidad media de excavación para cada tipo de tuneladora.

Hay que tener presente que el tiempo neto de excavación no incluye las paradas por operaciones extraordinarias de mantenimiento, previstas o no previstas, ni el empleado en el montaje y desmontaje de las tuneladoras.

A título de ejemplo a continuación se expone el cálculo del tiempo neto de excavación de un túnel de 5.970 m en el que se han distinguido los siete tramos homogéneos siguientes:

1. **Calizas sanas**, con  $\sigma_{cI} = 84$  MPa y *RME* = 95, a lo largo de 1.825 m.
2. **Zona de falla 1**, con un recubrimiento medio de 42 m, caudal estimado de agua de unos 0,25 litros/ min x m<sup>2</sup> frente, terreno con tipología de bloques y longitud total de 125 m.
3. **Pizarras y areniscas**, con  $\sigma_{cI} = 35$  MPa y *RME* = 65, a lo largo de 480 m.

4. **Zona de falla 2**, con un recubrimiento medio de 284 m, caudal estimado de agua de unos , terreno de tipología arcillosa y longitud total de 85 m.

5. **Calizas fracturadas**, con  $\sigma_{cI} = 68$  MPa y *RME* = 74, a lo largo de 2.420 m.

6. **Zona de falla 3**, con un recubrimiento medio de 97 m, con terreno completamente seco y con tipología de bloques, con una longitud total de 75 m.

7. **Pizarras sanas**, con  $\sigma_{cI} = 67$  MPa y *RME* = 84, a lo largo de 960 m.

Con estos datos se han estimado las velocidades medias de avance en los tramos normales mediante las correlaciones entre el *RME* y el *ARA<sub>T</sub>*, antes presentadas; en las zonas de falla los avances se han estimado considerando el valor medio del rango recomendado, para cada tipo de falla, en el **Cuadro VII**.

En el **Cuadro VIII** se presenta el cálculo del tiempo de excavación para cada uno de los tramos en que se ha dividido el túnel, y en él se aprecia que el menor tiempo neto de excavación se consigue con un *Doble-Escudo optimizado*; que, teóricamente, haría la excavación en 270 días, con una velocidad media de 22,1 m/ día .

Hay que tener presente que el concepto *Doble-Escudo optimizado* significa que la tuneladora trabaja apoyándose en los *grippers* cuando el terreno lo permite, y que, en cuan-

TRAMO	TERRENO	RME Medio	LONGITUD ACUMULADA (m)	$\sigma_{cI}$ (MPa)	AVANCES MEDIOS ( $\frac{m}{día}$ )			DURACIÓN DE LA EXCAVACIÓN DEL TRAMO (Días)		
					TBM Ab.	ESCUDOS	DOBLE-E OPTIMIZADO	TBM Abierta	ESCUDOS	DOBLE-ESC. OPTIMIZADO
1	Calizas sanas	95	1.825	84	38,9	23,0	28,4	46,9	79,3	64,3
2	Zona de falla 1	-	125	-	3,0	5,5	5,5	41,6	22,7	22,7
3	Pizarras y areniscas	65	480	35	14,3	28,7	28,7	33,6	16,7	16,7
4	Zona de falla 2	-	85	-	3,0	5,5	5,5	28,3	15,5	15,5
5	Calizas fracturadas	74	2.420	68	21,3	23,0	23,0	113,6	105,2	105,2
6	Zona de falla 3	-	75	-	10,0	15,0	15,0	7,5	5,0	5,0
7	Pizarras sanas	84	960	67	29,7	23,0	23,8	32,3	41,7	40,3
TOTAL			5.970		19,6	20,9	22,1	303,8	286,1	269,7

### ■ [Cuadro VIII].- Cálculo comparativo del tiempo neto de excavación de un túnel.

RECUBRIMIENTO (m)	< 50			50-200			> 200 (sin squeezing extremo)					
	SECO	< 0,1	> 0,1	SECO	< 0,1	> 0,1	SECO	< 0,1	> 0,1			
TIPO DE TERRENO	Bloques	Arcilloso	Cualquiera	Bloques	Arcilloso	Cualquiera	Bloques	Arcilloso	Cualquiera			
AVANCE MEDIO CON TUNELADORA ESCUDADA ( $\frac{m}{día}$ )	10-20	> 40	5-20	1-10	10-20	> 40	5-15	1-5	5-15	20-40	1-10	< 1
AVANCE MEDIO CON TBM ( $\frac{m}{día}$ )	10-15	5-15	1-5	5-15	1-10	1-5	5-10	1-5	< 1			

### ■ [Cuadro VII].- Estimación de los avances posibles en zonas de falla.

to no se pueden apoyar los *grippers*, pasa a trabajar como *Escudo Simple*.

La consecución de este objetivo en la realidad exige un estricto control de los parámetros de excavación y un mantenimiento mecánico adecuado del sistema telescópico de la tuneladora; pues, en el caso de que esto no se cumpla, los avances del *Doble-Escudo* se aproximarían a los logrados con un *Escudo Simple* e incluso podrían ser inferiores a éstos.

## Conclusiones

Los trabajos de investigación realizados sobre el sistema *RME* durante la segunda mitad de 2006 y el año 2007 han permitido establecer correlaciones entre el *RME* y el *Average Rate of Advance teórico (ARA<sub>T</sub>)* para poder obtener los rendimientos de los tres tipos de tuneladoras más frecuentes: *TBM abiertas*, *Escudos Simples* y *Dobles-Escudos*.

Del análisis de estas correlaciones se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales:

- I.- **Para terrenos de muy buena excavabilidad**, con *RME* > 80, y  $\sigma_{c,i}$  > 45 MPa, **las TMB Abiertas son las tuneladoras con mejores rendimientos**; mientras que si  $\sigma_{c,i}$  < 45 MPa, **son los Dobles Escudos las tuneladoras más recomendables**.
- II.- **Para terrenos con excavabilidad buena**, con *RME* comprendido entre 70 y 80 puntos, los tres tipos de tuneladoras proporcionan rendimientos similares si  $\sigma_{c,i}$  > 45 MPa. En el caso de que la resis-

tencia a compresión simple de la roca intacta sea menor de 45 MPa las *TBM's abiertas* proporcionan avances mucho menores que las tuneladoras escudadas.

- III.- **Para terrenos con excavabilidad media o baja**, con *RME* < 70 puntos los *Escudos Simples* son las tuneladoras más apropiadas.

Utilizando las correlaciones entre el *RME* y el *ARA<sub>T</sub>*, junto con las recomendaciones sobre los posibles avances en el paso de las zonas de falla que se han presentado, se puede calcular el tiempo neto de excavación con cada tipo de tuneladora y, a partir de estos resultados, seleccionar la más apropiada.

En la actualidad se está trabajando en dos líneas para mejorar las aplicaciones del *RME*; la primera en la puesta a punto de un programa informático para calcular el tiempo de excavación de un túnel, y la segunda está orientada a obtener criterios para contribuir a mejorar el control del avance de las tuneladoras y en ella se está trabajando, además del *RME*, con el *Rock Mass Rating (RMR)* y la *Energía Específica de excavación*.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al *Administrador de Infraestructuras Ferroviarias de España (ADIF)* por haber permitido utilizar la información procedente de los Túneles de *Guadarrama*, *Abdalajís* y *S. Pedro*; al Dr. *Remo Grandori* por haber facilitado datos de los túneles del complejo hidroeléctrico *Gilgel*

*GIBE II*, en Etiopía; y a *D. Luis A. Macías*, de *Martí Ibérica S.A.*, por las gestiones que realizó para poder acceder a la información procedente del Túnel de *Katzenberg* (Alemania).

También desean dar las gracias a las empresas constructoras *ACS*, *FCC*, *Ferrovial-Agroman*, *Vías y Construcciones*, *Sacyr*, y a la *UTE S. Pedro*, por su colaboración, respectivamente, en la adquisición de los datos procedentes de los túneles de *Guadarrama*, *Abdalajís Oeste* y *S. Pedro*, y a la agrupación *Zublin-W&F-Martí-Jäger* por facilitar los datos sobre la construcción del Túnel de *Katzenberg*.

Finalmente, desean expresar su reconocimiento a *D. José Carballo Rodríguez* que, gracias a la *Beca Bieniawski* de 2006, ha desarrollado eficientemente el complejo tratamiento estadístico de los datos que han hecho posible este trabajo.

## Bibliografía

- ADIF. *El túnel de Guadarrama*. Ed. Entorno Gráfico, Madrid, 2005.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M.; ÁLVAREZ, M<sup>a</sup>. *Rock Mass Excavability (RME) Index*. ITA World Tunnelling Congreso. Seoul. Korea. 2006.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M. *TBM Excavability: Prediction and Machina rock interaction*. RETC. Toronto. Canadá 2007.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M. *Predicting TBM excavability*. Tunnels & Tunneling Internacional. Sep 2007.
- GRANDORI, R. *TBM performances and Rock Mass Excavability (RME) Classification System*. Jornada sobre "Experiencias recientes con tuneladoras". CEDEX, Madrid, 2006. □