

# Definición preliminar de las secciones tipo de sostenimiento en los túneles proyectados por métodos convencionales

En este artículo se presenta una nueva metodología para la definición preliminar de las Secciones Tipo de sostenimiento, en los túneles proyectados con métodos convencionales; que se basa en la evaluación del grado de estabilidad de la excavación sin sostenimiento y que, además de definir los elementos de sostenimiento, permite establecer unas orientaciones sobre la excavación del túnel y sobre los elementos de revestimiento a proyectar.

## Evaluación del comportamiento elástico de una excavación subterránea

Para evaluar el comportamiento elástico de una excavación subterránea son de utilidad las ecuaciones formuladas por Kirsch en 1898; que fueron planteadas de acuerdo al esquema que se muestra en la Fig. 1.

Los parámetros que definen el problema de Kirsch son los siguientes:

- $\sigma_r$  = componente de la presión que actúa en dirección del centro de la excavación (*Tensión radial*).
- $\sigma_\theta$  = componente de la presión que actúa en dirección perpendicular a la del centro de la excavación (*Tensión tangencial o circunferencial*).
- $\tau_{r\theta}$  = tensión de corte que actúa sobre la superficie infinitesimal.
- $\sigma_{H0}$  = tensión horizontal que actúa sobre el terreno donde éste no está afectado por la excavación (*Presión de campo horizontal*).
- $\sigma_{V0}$  = tensión vertical que actúa sobre el terreno donde éste no está afectado por la excavación (*Presión de campo vertical*).

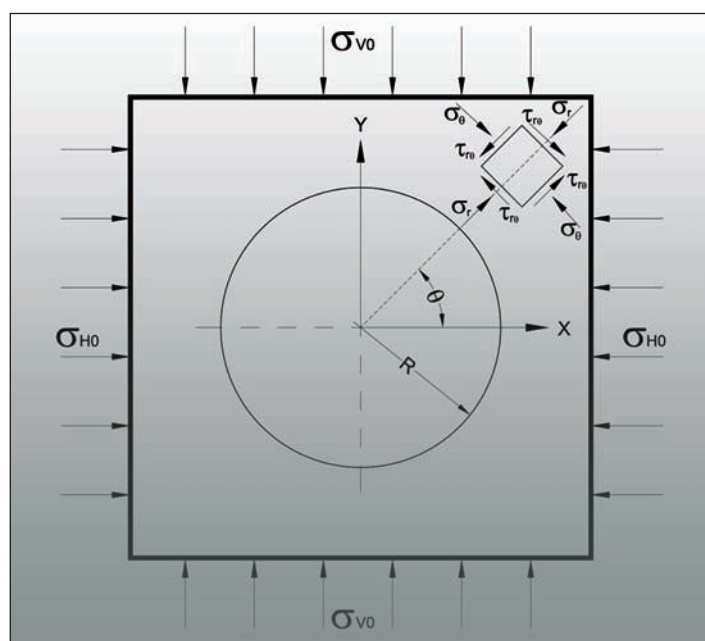


Figura 1] .- Planteamiento del problema de Kirsch.

Palabras clave: AVANCE, CÁLCULO TENSO-DEFORMACIONAL, EXCAVACIÓN, ICE, SECCIÓN TIPO, SOSTENIMIENTO, TÚNEL.

Benjamín CELADA TAMAMES. GEOCONTROL, S.A.  
 Mario FERNÁNDEZ PÉREZ. GEOCONTROL, S.A.  
 Alejandro RODRÍGUEZ(\*\*). CDIAM, S.L.  
 Isidoro TARDÁGUILA VICENTE. GEOCONTROL, S.A.

Llamando:

$k = \sigma_{H0}/\sigma_{V0}$  (coeficiente de reparto de tensiones), y  $\sigma_{V0} = \sigma_0$ ; la solución de Kirsch esta definida por las ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_0 \frac{1+k}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \sigma_0 \frac{1-k}{2} \left(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \sigma_0 \frac{1+k}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \sigma_0 \frac{1-k}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= \sigma_0 \frac{1-k}{2} \left(1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right) \text{sen } 2\theta \end{aligned} \right\}$$

En el perímetro de la excavación,  $r = R$ , se tiene:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= \sigma_0 [(1+k) + 2(1-k)\cos 2\theta] \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned}$$

El máximo de la tensión tangencial en el perímetro de la excavación, que se obtiene haciendo  $\cos 2\theta = 1$ , vale:

$$\sigma_{\theta MAX} = (3-K) \sigma_0$$

Para valores de  $K < 3$ , resulta que en el perímetro del túnel esta sometido a una compresión simple cuyo valor es  $\sigma_{\theta MAX}$ . Para que el terreno se mantenga dentro del dominio elástico, suponiendo que la plastificación coincida con la resistencia de pico, será necesario que  $\sigma_{CM} \geq (3-k) \cdot \gamma \cdot H$ ; o lo que es lo mismo:

$$\frac{\sigma_{CM}}{(3-K) \cdot \gamma \cdot H} > 1$$

Multiplicando ambos términos por 100 y llamando Índice de Comportamiento Elástico (ICE) a:

$$ICE = \frac{100\sigma_{CM}}{(3-K) \cdot \gamma \cdot H}$$

resulta que, la excavación tendrá un comportamiento elástico si  $ICE > 100$ .

Para un peso específico medio de  $\gamma = 0,027 \text{ MN/m}^3$ , la expresión del ICE resulta ser:

$$ICE = \frac{3704 \cdot \sigma_{CM}}{(3 - K) \cdot H}$$

Por otro lado; la correlación de *Kalamaras-Bieniawski* (1995) establece que:

$$\sigma_{CM} = \sigma_{ci} \cdot e^{\frac{RMR-100}{24}}$$

Sustituyendo en la expresión del **ICE** el valor de  $\sigma_{CM}$  resulta:

$$ICE = \frac{3704 \cdot \sigma_{ci} \cdot e^{\frac{RMR_c-100}{24}}}{(3 - K_0) \cdot H}$$

Cuando se aplica el **ICE** a rocas blandas, que se caracterizan por tener > 10 MPa, hay que tener presente que en este tipo de rocas las propiedades de la matriz y de las juntas son similares; razón por la cual el efecto escala es menos intenso que en las rocas normales.

Por ello; en este caso es recomendable sustituir, en la expresión del

**ICE** el factor:  $e^{\frac{RMC_c-100}{24}}$  por 0,33.

También hay que tener presente que el **ICE** no tiene sentido físico para valores de  $K_0$  muy elevados; razón por la cual hay que limitar el rango de aplicación del **ICE** a los casos en que  $K_0 < 2$ .

Esta expresión se ha deducido para el caso de un túnel circular e incluye apreciables simplificaciones sobre el comportamiento real del terreno. Por ello, para salvar el efecto de estas simplificaciones, se puede afectar al **ICE** de un parámetro, **F**, que esté relacionado con el tipo de excavación adoptada, mecánica o mediante explosivos, y con la forma real del túnel.

Para definir los valores de **F** se han modelizado los cuatro casos siguientes de excavaciones subterráneas:

- Túnel circular de 6 m de diámetro.
- Túnel circular de 10 m de diámetro.
- Túnel convencional de 14 m de diámetro.
- Cavernas de 25 m de ancho y 60 m de altura.

En cada uno de estos cuatro casos se han hecho 192 simulaciones con el programa *FLAC 3D* considerando las combinaciones pertinentes de los siguientes valores de las variables que definen el **ICE**:

- $H = 100; 200 \text{ y } 400 \text{ m.}$
- $\sigma_d = 30; 50; 70 \text{ y } 100 \text{ MPa.}$
- $RMR_c = 20; 30; 50 \text{ y } 70.$
- $K_0 = 0,6; 0,8; 1 \text{ y } 1,5.$

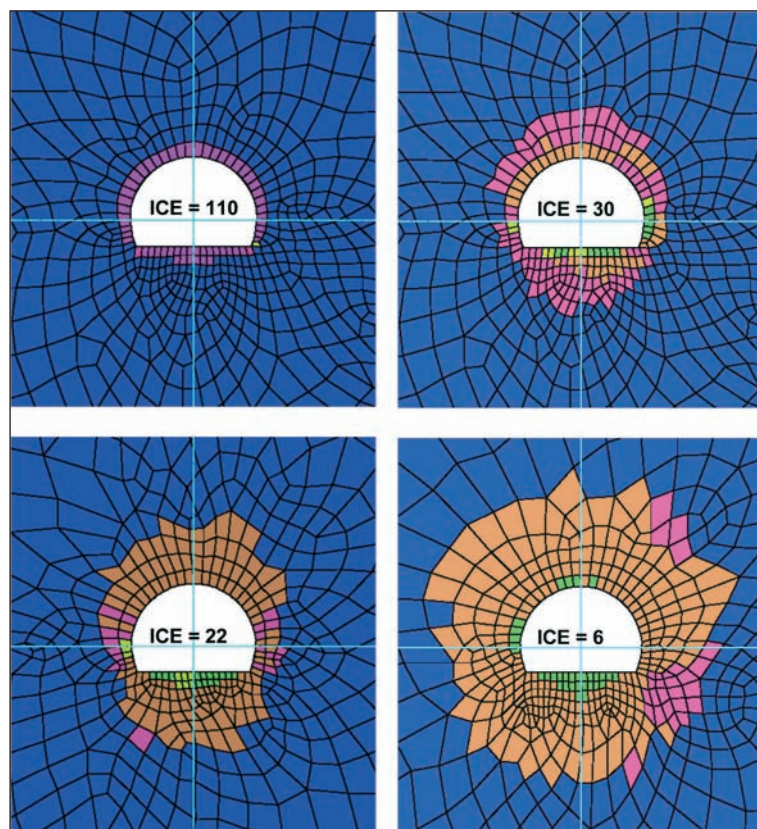
Para cada uno de los 768 problemas resueltos con el programa *FLAC 3D* se ha calculado el valor del **ICE** y se ha comparado con el espesor de los terrenos plastificados alrededor de la excavación.

En la **Fig. 2** se muestran los elementos plastificados alrededor de un túnel convencional, de 14 m de ancho, para cuatro valores característicos del **ICE**.

A partir de los resultados de los 768 cálculos realizados se han determinado los valores del factor **F** que se indican a continuación:

- Túneles circulares de 6 m de diámetro  $F = 1,3$
- Túneles circulares de 10 m de diámetro  $F = 1,0$
- Túneles convencionales de 14 m de diámetro  $F = 0,75$
- Cavernas de 25 m de ancho y 60 m de altura  $F = 0,55$

Así mismo, en base a los resultados de la simulación realizada, se han establecido los criterios que se presentan en el **Cuadro I** para estimar el comportamiento tenso-deformacional de una excavación subterránea en función del **ICE**.



[Figura 2].- *Plastificación en un túnel convencional, de 14 m de ancho y sin sostenimiento, para algunos valores del ICE.*

ICE	Comportamiento tenso-deformacional
> 130	Totalmente elástico
90-130	En el límite elasto-plástico
50-90	Plastificación moderada
30-50	Plastificación intensa
10-30	Plastificación muy intensa
< 10	Plastificación extrema

[CUADRO I].- *Comportamiento tenso-deformacional en función del ICE.*

## Determinación de los Pases de Avance en métodos convencionales

A lo largo de 2009 *Geocontrol*, con financiación parcial del *Instituto Madrileño de Desarrollo (IMADE)* mediante el expediente PIE/675/2009, realizó una investigación para **establecer unos criterios objetivos basados en el Índice Rock Mass Excavability (RME) y en otros parámetros geomecánicos para poder definir el Pase de Avance en la construcción de tuneles por métodos convencionales.**

El índice **RME** fue desarrollado por *Geocontrol*, con la colaboración del *Prof. Bieniawski*, en base a las experiencias habidas durante la construcción de los túneles de *Guadarrama, Abdalajís y San Pedro*, y fue presentado en el congreso de la *Internacional Tunnel Association* que se celebró en *Seul* en 2006. *Bieniawski et al.* (2006).

El índice **RME** tiene una estructura similar al **RMR** y se calcula evaluando los cinco parámetros siguientes:

1. Resistencia a compresión de la roca intacta, que tiene un peso de 0 a 25 puntos.
2. *Drilling Rate Index (DRI)*, puntuándolo entre 0 y 15 puntos.

3. Efecto de las discontinuidades del frente sobre la excavación. Este es un parámetro complejo; que se valora de 0 a 30 puntos, en función del grado de homogeneidad del frente (0 a 10 puntos), del número de juntas por metro que existen en el frente (0 a 15 puntos) y de la orientación de la familia de juntas más importante respecto del frente (0 a 5 puntos).
4. Tiempo de autoestabilidad de la excavación, que tiene un peso entre 0 y 25 puntos.
5. Afluencia de agua en el frente de excavación, puntuándola entre 0 y 5 puntos.

En una publicación reciente, *Bieniawski–Celada–Tardáguila* (2009), se dan criterios actualizados para calcular correctamente el **RME** de un terreno.

El proceso de construcción de túneles por métodos convencionales; es decir en aquellos casos en que la construcción del túnel no se realiza mediante una tuneladora, se basa en la repetición del denominado ciclo de trabajo. Este ciclo comprende la realización de las actividades de **excavación**, **carga** del volumen de terreno excavado y **sostenimiento** del perímetro de la excavación realizada.

La longitud de túnel excavada en cada ciclo de trabajo se denomina **Pase de Avance**, que define la duración del ciclo de trabajo, esta comprendido entre 6,0 y 0,5 m y condiciona notablemente los rendimientos obtenidos en la construcción del túnel.

En el caso de túneles excavados en terrenos con comportamiento elástico, algunos factores operacionales tienen una importancia decisiva sobre la elección del pase de avance; pues hay que tener presente que el proceso de la construcción de túneles está organizado en dos o tres relevos por cada día de trabajo.

En estas condiciones, hay que decidir si los mejores resultados se obtienen con ciclos de trabajo cuya longitud de pase permite que se complete el ciclo dentro del relevo o, por el contrario, si es preferible adoptar una longitud de pase mayor que haga necesario concluir el ciclo en varios relevos.

En estos casos la elección de la longitud de pase está condicionada por los tiempos muertos de traslado al frente, por la capacidad de los medios de carga de las rocas excavadas y por la dificultad que el terreno ofrece para ser perforado.

En los túneles con longitud inferior a 2,5 km, que son los que mayoritariamente se construyen con métodos convencionales, los tiempos muertos de traslado al frente son similares; pues los operarios se transportan en vehículos. Por otro lado los medios de carga de los terrenos excavados también suelen ser similares, cuando las excavaciones tienen una anchura comprendida entre 10 y 15 m; como ha sucedido en los túneles controlados en esta investigación.

De acuerdo con lo anterior; resulta que, *en el caso de los túneles de carretera modernos y en los de líneas de alta velocidad construidos por métodos convencionales, puede suponerse que la longitud del pase de avance está regida por la excavabilidad del terreno, si la excavación se comporta elásticamente*; ya que en este caso el tramo del túnel no sostenido será autoestable sea cual sea su longitud. En este caso el **RME** será de utilidad para definir el **Pase de Avance**.

Cuando la excavación no se comporte elásticamente y entre en plastificación, la longitud del pase deberá definirse en función del grado de autoestabilidad del terreno; en este caso para estimar la longitud del pase de avance resultará de utilidad emplear el **RMR**, ya que este índice fue creado para evaluar el comportamiento tenso-deformacional del terreno. *Bieniawski* (1989).

## Campaña de toma de datos

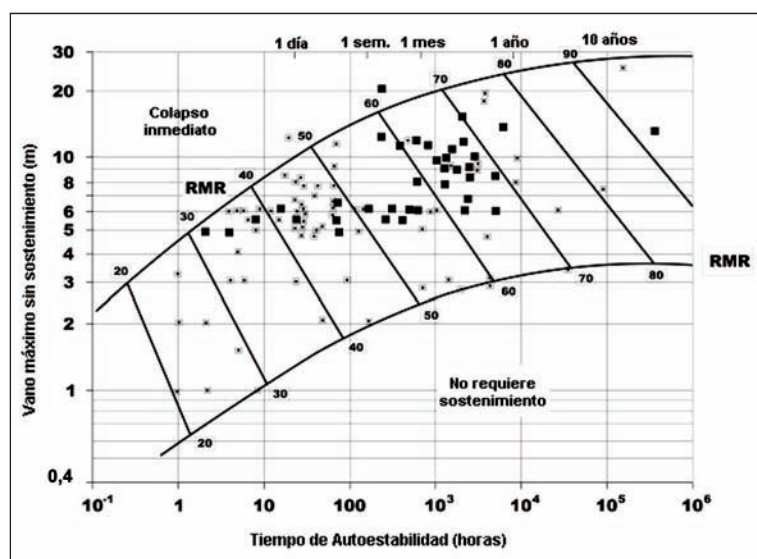
Para llevar a cabo esta investigación se planteó una amplia campaña de toma de datos en túneles en construcción; en los que, para cada

pase, se obtuvo el **RME**, el **RMR** del terreno y otros datos relacionados con el proceso constructivo.

Antes de iniciar la campaña de toma de datos se discutió la viabilidad de utilizar el **RME** para caracterizar la excavabilidad del terreno en los túneles construidos con métodos convencionales; pues el **RME** fue puesto a punto utilizando datos de túneles construidos con tuneladora.

De los cinco parámetros del terreno, que deben ser evaluados para calcular el **RME**, solo el tiempo de autoestabilidad y el efecto de las discontinuidades en el frente presentan diferencias; según que el túnel se excave con una tuneladora o con métodos convencionales.

El tiempo de autoestabilidad se calcula mediante el ábaco que se muestra en la **Fig. 3**, en función del diámetro de la excavación y del valor del **RMR**, corregido según la orientación del valor de las discontinuidades respecto al eje del túnel; que se denomina **RMR<sub>c</sub>**.



■ [Figura 3].- Ábaco para el cálculo del tiempo de autoestabilidad.

En el caso de que el túnel se construya con una tuneladora, el valor del **RMR<sub>c</sub>** debe ser aumentado para tener en cuenta el efecto favorable de la excavación mecánica, utilizando para ello la corrección de *Alber* (1996).

Evidentemente, en el caso de los túneles construidos con métodos convencionales y excavación con explosivos el tiempo de autoestabilidad debe calcularse directamente con el valor del **RMR<sub>c</sub>**.

Por lo que se refiere a la valoración de la influencia del grado de homogeneidad del frente, hay que resaltar que tiene una incidencia menor en los métodos convencionales que en el caso de las tuneladoras. Por ello, en esta investigación, se ha simplificado la valoración del grado de homogeneidad, considerando solo los tres casos siguientes:

1. Frente homogéneo, se valora con 10 puntos.
2. El 30% de la superficie del frente está ocupada por una roca que presenta una resistencia a compresión simple que supera en más del 200% a la resistencia del resto. Este frente se considera de homogeneidad media y se valora con cinco puntos.
3. El frente se considera heterogéneo si el 50% de su superficie está ocupado por una roca que tiene una resistencia superior en más de un 200% a la del resto. Este frente se valora con 0 puntos.

Salvo estas dos modificaciones, el **RME** se considera plenamente aplicable a los túneles construidos tanto con tuneladoras como con métodos convencionales.

Nº TÚNEL	TÚNEL	UBICACIÓN	USO	LONGITUD (m)	SECCIÓN EXCAVADA (m <sup>2</sup> )	Nº DE PASES INSPECCIONADOS
1	CASTRO	PONTEVEDRA	ALTA VELOCIDAD	380	110	6
2	REBOREDO			650	110	8
3	ARDILLEIRO			570	110	11
4	CURRO			750	110	8
5	PRADO			260	98	9
6	BASCUAS			320	98	2
7	PORTIÑO			478	110	6
8	CALDELÁS			510	110	5
9	A PENA			815	110	48
10	VILAR DO XESTAL			1215	110	9
11	BENDOIRO			400	110	8
12	ANZO			545	110	19
13	ARCHIDONA	MÁLAGA	CARRETERA	1110	140	33
14	CANDELARIA	CANARIA		500	94	5
15	MOGÁN			600	94	36
NÚMERO TOTAL DE PASES INSPECCIONADOS						213

## Análisis de la información obtenida

Los datos obtenidos en la encuesta de los 213 pases analizados han sido objeto de un análisis estadístico profundo para encontrar las correlaciones más representativas entre el *Pase de Avance (P)* y los índices *RME*; *RMR* y el *ICE*.

La inclusión del *ICE* como parámetro de correlación se debe a que, tal como se ha indicado en el apartado de la determinación de los *Pases de Avance*, cuando el terreno se comporta elásticamente el pase de avance puede escogerse por razones operacionales; mientras que si el terreno plastifica el pase de avance esta condicionado por la estabilidad de la excavación.

Después de importantes tentativas para encontrar una buena correlación entre el *Pase de Avance (P)* y los índices *RME*; *RMR* e *ICE* la mejor correlación hallada esta definida por la hipersuperficie que tiene por ecuación:

$$\left(\frac{RME}{86}\right)^2 + \left(\frac{RMR - 50}{44}\right)^2 + \left(\frac{P - 3,3}{4}\right)^2 + \left(\frac{\text{LogICE} - 2}{4}\right)^2 = 1$$

El coeficiente de correlación obtenido es  $r^2 = 0,896$ ; que es muy bueno.

Una vez establecida la hipersuperficie de correlación el paso siguiente consistió en identificar las regiones de esta hipersuperficie que tienen sentido físico para definir el *Pase de Avance* y para ello lo primero que se hizo fué establecer dos regiones, tomando en la primera:  $ICE > 100$ , y en la segunda  $ICE < 100$ ; ya que la primera corresponde a los terrenos plastificados y la segunda a los que tienen un comportamiento elástico.

Una vez hecha esta diferenciación se han obtenido las correlaciones que se indican a continuación.

### • En terrenos plastificados ( $ICE < 100$ )

$$P(m) = 3 - 3 \cdot \sqrt{1 - \frac{RMR}{50}}$$

## ■ [CUADRO II].- Datos de los túneles en los que se ha obtenido información .

A lo largo de la segunda mitad de 2009 se llevó a cabo una amplia campaña de toma de datos en once túneles, que formaban parte de líneas ferroviarias de alta velocidad, y otros dos de autopista; en el **Cuadro II** se indican las principales características de estos túneles, cuya construcción, en todos los casos, estaba siendo controlada por técnicos de *Geocontrol*.

En total se ha obtenido información sobre 213 pases de avance; de los cuales 129, que suponen el 60 % del total, se han excavado con explosivos y el restante 40 % mediante medios mecánicos.

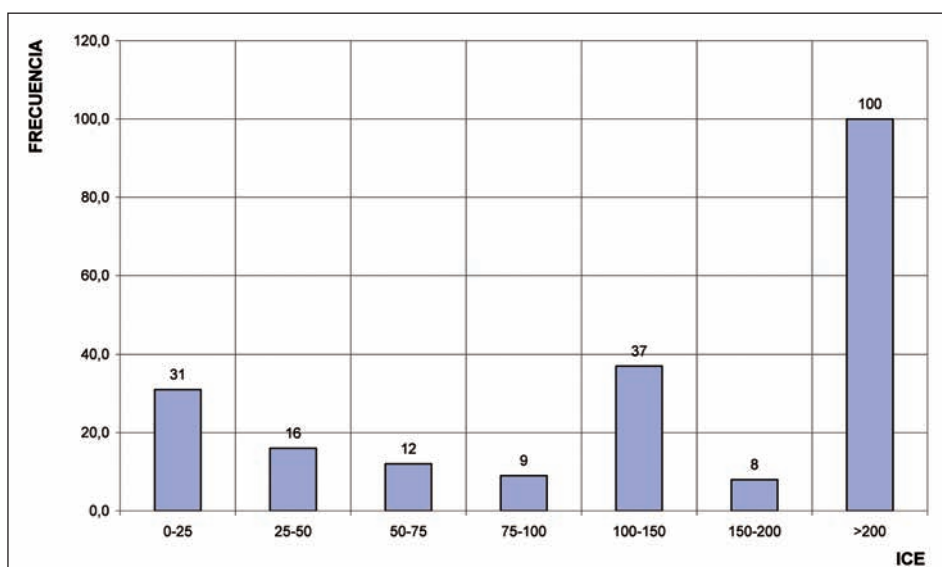
Ya se ha indicado que de los tramos de túneles estudiados se dispone de una amplia información; tanto por lo que se refiere al proceso constructivo empleado, como a las características del terreno.

Sin embargo; no se disponía de ningún ensayo tipo *DRI*, que es indispensable para valorar con precisión el *RME*. Por ello se tomaron muestras de los diferentes terrenos presentes en los frentes analizados y con ellas se hicieron un total de 43 determinaciones del *DRI*.

En cada uno de los 213 pases inspeccionados se calculó el *ICE*, obteniéndose el histograma que se presenta en la **Fig. 4**.

En ella se puede apreciar que de los 213 pases estudiados, 149 presentan un comportamiento elástico; lo cual supone el 70 % del total. Este porcentaje está de acuerdo con el que habitualmente se considera normal cuando se analiza el comportamiento de los túneles e indica que la población muestral utilizada en esta investigación es representativa del comportamiento real de los túneles construidos en España.

Por otro lado los restantes 64 grupos de datos, que corresponden a los tramos de túneles con plastificación del terreno, se encuentran muy repartidos entre los rangos del *ICE* de 0/25; 25/50; 50/75 y 75/100; lo cual avala también la alta representatividad de la muestra con la que se ha trabajado.



■ [Figura 4].- Histograma de frecuencias del ICE para los 213 pases estudiados.

El coeficiente de correlación vale  $R^2 = 0,87$ , que es muy bueno. En este caso la longitud del Pase de Avance está comprendida entre 0 y 3 m; ya que la condición de que el terreno plastifique hace que no sean autoestables los tramos sin sostenimiento de longitud superior a 3 m.

En el caso de los tramos de túnel excavados en terrenos con comportamiento elástico,  $ICE > 100$ , ya se ha indicado que la longitud de Pase estaba condicionada por el  $RME$ . Sin embargo, al analizar la región con sentido físico para  $ICE > 100$  se encontró que las mejores correlaciones con el  $RME$  se obtenían cuando esta región se subdividía en otras dos; una con  $RMR > 50$  y otra con  $RMR < 50$ .

Las correlaciones encontradas en estos casos fueron las siguientes:

• **En terrenos con comportamiento elástico ( $ICE > 100$ ) con  $RMR > 50$**

$$P_{(m)} = 3 + 4,4 \cdot \sqrt{1 - \frac{RME}{90} - \left(\frac{RMR - 50}{55}\right)^2}$$

El coeficiente de correlación obtenido es  $r^2 = 0,77$ , que es razonablemente bueno. En este caso las longitudes del pase están comprendidas entre 3,5 y 5,5 m.

• **En terrenos con comportamiento elástico ( $ICE > 100$ ) con  $RMR < 50$**

$$P_{(m)} = 3 - 5 \cdot \sqrt{1 - \frac{RME}{90} - \left(\frac{RMR - 50}{55}\right)^2}$$

El coeficiente de correlación obtenido es  $r^2 = 0,79$ , que es razonablemente bueno.

En este caso la ecuación de correlación sólo tiene sentido para valores  $RME < 90$ , en los cuales la Longitud de Pase está comprendida entre 0,5 y 3 m. Si resulta que  $RME > 90$ , hay que tomar  $P = 3m$ .

### Definición preliminar de las secciones tipo

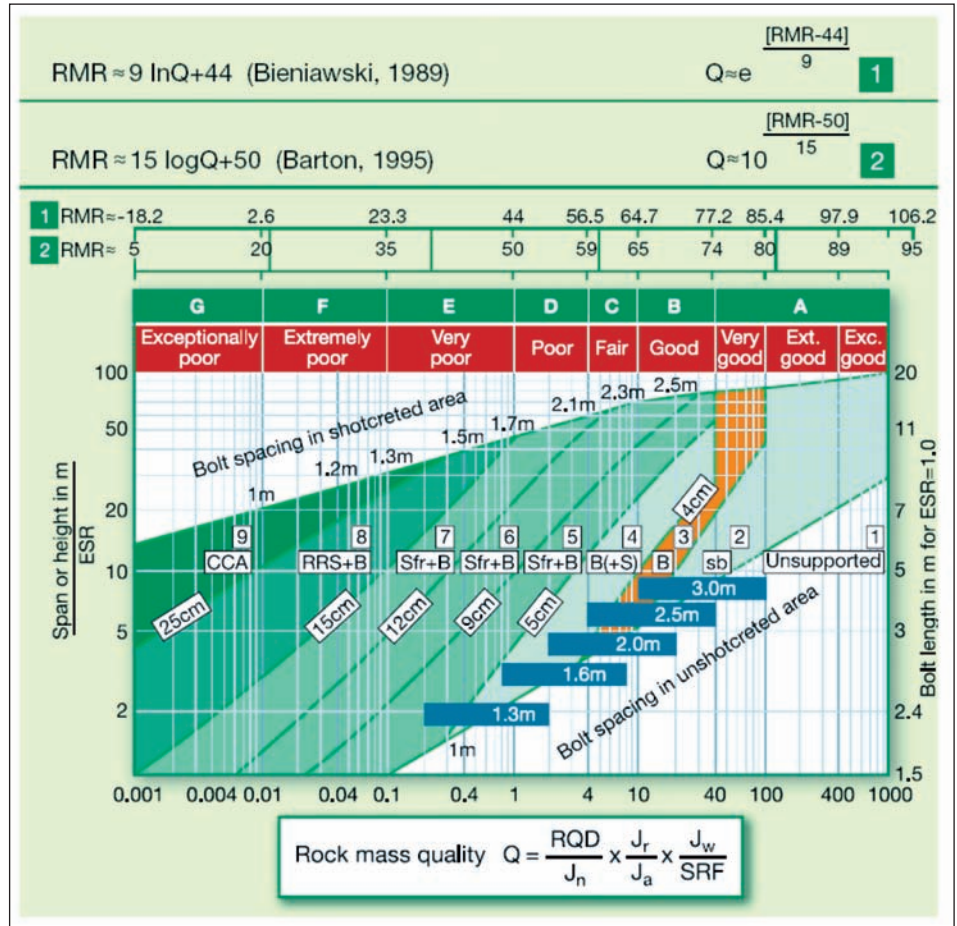
Grimstad y Barton (1993) publicaron un ábaco muy útil para estimar, de forma empírica, el sostenimiento que debe ser utilizado para estabilizar todo tipo de túneles.

Posteriormente; Barton y Bieniawski (2008) han actualizado este ábaco para que pueda ser utilizado empleando, indistintamente, el índice  $Q$  o el  $RMR$ ; tal como se muestra en la Fig. 5.

Una de las entradas al ábaco presentado en la figura 5 es el  $Q$  ó  $RMR$ , y la otra el cociente entre la mayor dimensión de la excavación no sostenida y el coeficiente Excavation Support Ratio ( $ESR$ ), que pondera las exigencias de la funcionalidad de la excavación y se calcula con los criterios presentados en el Cuadro III.

El ábaco presentado en la figura 5 es de gran utilidad; pues permite tener una aproximación empírica muy precisa sobre el tipo de sostenimiento a emplear en todo tipo de excavaciones subterráneas; desde las que son autoestables hasta aquellas que están en el límite de lo que se puede construir.

No obstante lo anterior, hay que tener presente que la precisión de las estimaciones obtenidas con el ábaco de la figura 5 esta supeditada al grado de error de la determinación del  $Q$  ó del  $RMR$ ; razón por la cual los resultados obtenidos solo deben considerarse como una aproximación empírica a la solución del sostenimiento de un túnel y, necesariamente, deben ser comprobados mediante cálculos estructurales.



[Figura 5].- Ábaco propuesto por Barton y Bieniawski para para determinar empíricamente el sostenimiento .

CLAVE	TIPO DE EXCAVACIÓN	ESR
1	Excavaciones mineras temporales	3-5
B	Pozos verticales de sección circular	2,5
C	Excavaciones mineras permanentes, túneles hidráulicos, túneles piloto, pozos planos, excavaciones iniciales de gran sección	1,6
D	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferroviarios de sección media	1,3
E	Cavernas hidroeléctricas, túneles de gran sección, excavaciones militares, emboquilles de túneles	1,0
F	Instalaciones nucleares, estaciones de ferrocarril e instalaciones industriales	0,8

■ [CUADRO III].- Estimación del Excavation Support Ratio (ESR).

Como alternativa a las recomendaciones de Barton y Grimstad; Geocontrol, en base a las experiencias que ha tenido en el control de la construcción de túneles en los últimos 25 años, ha elaborado las recomendaciones que se presentan en el Cuadro IV.

Estas recomendaciones afectan tanto a la excavación y sostenimiento del túnel como al revestimiento y a la magnitud de la convergencia que debe medirse en la obra para controlar el proceso de estabilización de la excavación.

Dado que el  $ICE$  se calcula con parámetros que tienen un apreciable margen de variación, las recomendaciones contenidas en el cuadro IV sólo pueden considerarse orientativas y deberán ser comprobadas, con cálculos tenso-deformacionales, cuando se pretenda incorporarlas a un proyecto constructivo.

ICE	Comportamiento de la excavación	Posible mecanismo de la inestabilidad	Excavación de la Sección	Sostenimiento orientativo	Elementos especiales de sostenimiento	Pase de Avance	Convergencia medible en obra	Tipo de revestimiento
> 130	Totalmente elástico	Caída gravitacional de bloques de roca. En estados tensionales muy asimétricos y con grandes recubrimientos, posibles estallidos de roca.		Bulones $E_T = 2\text{ m}$ $L = 4,5\text{ m}$ $E_L = 2,5\text{ m}$ Hormigón proyectado: 5 cm	NO SON NECESARIOS.	EN FUNCIÓN	Inapreciable	Bóveda y paramentos de hormigón. Solera en terreno natural.
90-130	En el límite elasto-plástico	Caída gravitacional de bloques de roca		Bulones $E_T = 2\text{ m}$ $L = 4,5\text{ m}$ $E_L = 2\text{ m}$ Hormigón proyectado: 10 cm	NO SON NECESARIOS.	DEL RME	Milimétrica	Bóveda, paramentos y solera plana de hormigón.
50-90	Plastificación moderada	Colapsos puntuales de pocos $\text{m}^3$		Bulones $E_T = 1,5\text{ m}$ $L = 4,5\text{ m}$ $E_L = 1,5\text{ m}$ Hormigón proyectado: 15 cm	NO SON NECESARIOS.	EN FUNCIÓN	Centimétrica	Bóveda y paramentos de hormigón. Contrabóveda de hormigón con flecha 0,1 x Anchura de excavación.
30-50	Plastificación intensa	Colapsos puntuales de algunas decenas de $\text{m}^3$ . Hinchamiento del sostenimiento colocado en el Avance		Cerchas TH-29 a 1 m 20 cm HP	Patas de elefante para apoyar las cerchas del Avance	DEL RMR		Bóveda y paramentos de hormigón. Contrabóveda de hormigón con flecha del 0,2 x Anchura de excavación.
15-30	Plastificación muy intensa	Hincamiento del sostenimiento colocado en el Avance. Inestabilidad del frente		Cerchas HEB-180 a 1 m 30 cm HP	Patas de elefante. Paraguas pesado. Bulonaje del frente. Micropilotes de recalce		Decimétrica	Revestimiento casi circular de hormigón, armado en la contrabóveda.
< 10	Plastificación extrema	Muy difícil de estabilizar una excavación de más de 8 m de anchura	Tramos de extrema dificultad que requieren un proyecto muy cuidadoso.					

■ [CUADRO IV].- Recomendaciones constructivas, para túneles de unos 14 m de ancho, en función del ICE..

## Conclusiones

Basándose en las ecuaciones de Kirsch y apoyándose en 768 cálculos tensodeformacionales, realizados con el programa FLAC, se ha puesto a punto el Índice de Comportamiento Elástico (ICE) que resulta útil para conocer, a nivel anteproyecto, el comportamiento tenso-deformacional de un tramo del túnel.

Como resultado de un proyecto de investigación, financiado parcialmente por el Instituto Madrileño de Desarrollo (IMADE), se han analizado 213 Pases de Avance en 15 túneles en construcción. El resultado del análisis estadístico realizado ha permitido correlacionar la longitud del Pase de Avance con el RME y RMR, discriminando los tramos de túneles analizados según que se comporten elásticamente o entren en plastificación.

Finalmente, basándose en el ICE y en la experiencia de Geocontrol, en los últimos 25 años, se han elaborado unas recomendaciones constructivas; que se consideran útiles para la definición preliminar de las Secciones Tipo en los proyectos de construcción de túneles.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento al Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) y al Gobierno de Canarias por permitir la obtención de los datos que han sido la base de este trabajo.

## Bibliografía

- ALBER, M. *Classifying TBM contracts*. *Tunnels & Tunnelling Int.* Dec. 1996.
- BARTON, N.; BIENIAWSKI, Z.T. *RMR and Q-Setting Records Straight*. *Tunnels and Tunnelling Int.* February 2008.
- BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons Inc. 1989.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; GALERA, J.M.; ÁLVAREZ, M. *Rock Mass Excavability (RME) Indicador: New Way To Selecting the Optimum Tunnel Construction Method*. *Int. Congress. ITA. Seul (Korea) 2006*.
- BIENIAWSKI, Z.T.; CELADA, B.; TARDAGUILA, I. *Selección de tuneladoras para macizos rocosos con frentes estables*. *Ingeopres N° 181, Mayo 2009. Madrid*.
- GRIMSTAD, E.; BARTON, N. *Updating the Q-System for NMT*. *Proc. Int-Symp. on Sprayed Concrete. Oslo 1993*.
- KALAMARAS, G.S.; BIENIAWSKI, Z.T. *A rock mass strength concept*. *ISRM Int. Congress of Rock Mechanics, Tokyo. 1995*
- ZARE, S. *Drill and Blast Tunnelling Advance Rate*. Doctoral Theses at Norwegian University of Science and Trondheim 2006.



### GEOCONTROL, S.A.

Cristóbal Bordiú 19-21, 5º • 28003 Madrid

☎ : 915 531 763 • Fax: 915 549 396

E-mail: [geocontrol@geocontrol.es](mailto:geocontrol@geocontrol.es) • Web: [www.geocontrol.es](http://www.geocontrol.es)