

## MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES GEOMECÁNICAS EN LOS FRENTE DE EXCAVACIÓN MECANIZADA DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS

Susana Torno

Javier Toraño

Mario Menéndez

Malcolm Gent

Judith Velasco

*Grupo de Investigación de Ingeniería Minera y Obra Civil, Universidad de Oviedo*

### Abstract

In excavations of underground works the continuous knowledge of geological and geomechanical properties of rock mass at the face is of major importance for optimization of design, planning and the work carried out by machinery and equipments.

Through intense measurement campaigns, in the present work, the mathematical relations obtained in tunnel excavation with a Tunnel Boring Machine (TBM) are shown. Based on these field measurement campaigns and using easily obtained parameters from the control and monitoring post, we have reached relations among specific cut energy, penetration index and the geomechanical RMR index (Rock Mass Rating).

In the underground excavation case by roadheaders, and through intense measurement campaigns, mathematical relations among geomechanical properties of the rock mass in front of the excavation face such as RQD, fracture spacing, RMR index (Rock Mass Rating) and compressive strength of the rock mass, were obtained.

In the same way, mathematical relations between the specific cut energy (MJ/m<sup>3</sup>) and the cutting rate CR (m<sup>3</sup>/h) for the three different movements of the ripping cutting head and for the total movement were obtained in the underground excavation case by roadheaders.

**Keywords:** *Prediction methods, Geomechanical properties, Underground works, TBM (Tunnel Boring Machine), Roadheaders*

### Resumen

En las excavaciones de las obras subterráneas, el conocimiento continuo de las propiedades geológicas y geomecánicas del macizo rocoso por delante del frente de excavación es de gran importancia para la optimización de los diseños, de la planificación y de los trabajos así como de la maquinaria y equipos empleados.

A partir de amplias e intensas campañas de medidas en obra, en el presente trabajo se exponen las relaciones matemáticas obtenidas en la excavación de un túnel con una máquina tuneladora TBM (Tunnel Boring Machine).

En base a campañas de medidas en obra, empleando parámetros de operación de la máquina de fácil acceso a través del puesto de mando y control, hemos llegado a relaciones

entre la energía específica de corte, del índice de penetración y del índice geomecánico RMR (Rock Mass Rating) del macizo rocoso.

Análogamente y en el caso de la excavación subterránea mediante máquinas de ataque puntual mediante amplias campañas de medidas, se han obtenido relaciones diversas entre las propiedades geomecánicas del macizo rocoso por delante del frente de excavación tales como el RQD, el espaciamiento entre fracturas, el RMR y la resistencia a compresión del macizo rocoso.

Asimismo se han obtenido las relaciones matemáticas, para los tres distintos movimientos del brazo de corte (penetración, elevación y arqueado ó desplazamiento horizontal), que nos relacionan la energía específica de corte con el rendimiento de excavación. La combinación de las tres gráficas nos permitirá la obtención de la curva global que nos relaciona los parámetros indicados.

Ello tiene importancia tanto en las fases de diseño de la obra, elección del equipo de excavación apropiado, como en las etapas de desarrollo del proyecto como en su planificación, control y seguimiento.

**Palabras clave:** *modelos de predicción, propiedades Geomecánicas, trabajos subterráneos, TBM (Tunnel Boring Machine), Minadores*

## 1. Introducción

En la excavación de túneles ó galerías mineras mediante máquinas de ataque a plena sección del tipo TBMs ó mediante máquinas de ataque puntual, es difícil de valorar de valorar ó predecir las condiciones geomecánicas del terreno por delante de la máquina dada la imposibilidad de la observación de mismo y el elevado número de variables que intervienen en el proceso de excavación.

Se han desarrollado métodos de predicción de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de los parámetros de operación de la máquina y de los perfiles geológicos-geotécnicos del túnel.

Con el auge de las máquinas de ataque puntual y las de ataque a plena sección, se han llevado a cabo varias investigaciones con el fin de desarrollar modelos para la predicción del funcionamiento de la excavación mecánica [a]. Básicamente los modelos desarrollados pueden agruparse en los siguientes campos:

-Modelos matemáticos: basados en las fuerzas de corte actuando sobre cortadores individuales y reales, bajo condiciones de campo simuladas interactuando con la roca.

-Modelos empíricos: basados en análisis retrospectivos sobre los datos archivados de las avances en campo de las máquinas sobre ciertos tipos de roca, en combinación con algunas de las propiedades de las rocas de los macizos rocosos a excavar.

En base a nuestras experiencias como responsables de obra y posteriormente como investigadores en la ejecución de túneles aportamos para los casos de excavaciones mediante tuneladoras TBM y máquinas de ataque puntual ó rozadoras las relaciones que pueden esclarecer y ayudar al establecimiento de los métodos y sistemas de predicción comentados.

## 2. Relaciones entre los parámetros de excavación y las propiedades geomecánicas en las maquinas de ataque a plena sección

La penetración neta  $P$  (1) es la relación entre el avance medio  $V$  y la velocidad de rotación  $\omega$

$$P(\text{mm/rpm}) = \frac{V(\text{mm/min})}{\omega(\text{rpm})} \quad (1)$$

Hemos comprobado que dicho parámetro es muy sensible a la disposición estructural planar del macizo rocoso.

El índice de penetración  $I_p$  (2) representa el empuje que hay que transmitir a un cortador  $S_c$  para penetrar un mm por vuelta  $P$  y suele ser empleado para la la detección indirecta de las variaciones en la calidad del macizo rocoso

$$I_p(\text{kN/mm}) = \frac{S_c(\text{kN})}{P(\text{mm})} \quad (2)$$

En su cálculo algunas TBMs no proporcionan automáticamente el empuje por cortador por lo que debe de ser estimado a partir del empuje total aplicado a la cabeza de corte y los correspondientes rozamientos.

La Specific Energy SE (3) (Teale, 1965) ó energía empleada en la excavación de un volumen unitario de roca es un parámetro muy útil indicativo de la eficiencia de dicha excavación. Puede ser considerada como la suma de la energía de empuje  $e_t$  (4) y la energía de rotación  $e_r$  (5).

$$SE = \frac{F}{A} + \left(\frac{2\pi}{A}\right)\left(\frac{NT}{V}\right) \text{ kJ/m}^3 \quad (3)$$

$$e_t = \frac{F}{A} \text{ kJ/m}^3 \quad (4)$$

$$e_r = \left(\frac{2\pi}{A}\right)\left(\frac{NT}{V}\right) \text{ kJ/m}^3 \quad (5)$$

donde  $F$  es el empuje de contacto en kN,  $A$  la sección excavada en  $\text{m}^2$ ,  $N$  la velocidad de rotación de la cabeza de corte (rpm) y  $T$  el par de rotación de la cabeza de corte en kN-m.

Teniendo en cuenta que en el caso de tuneladoras, la cabeza de corte trabaja como el tricono de un sondeo a rotación y en ambos casos el arranque se efectúa por indentación se puede, salvo casos particulares, relacionar las energías específicas de empuje y de rotación con la calidad geotécnica del macizo excavado y en concreto con el índice de rotación.

Dicha relación se muestra en la Figura 1 para un túnel ejecutado en España en la Sierra de Guadarrama con una longitud de 8917 m, un diámetro de 9450 mm. Está excavado sobre rocas plutónicas (granitoides) y metamórficas (gneisses, esquistos y rocas de silicatos calcicos), con un levantamiento de la estructura geológica más reciente en Orogenia Alpina del Terciario. En dicho gráfico el primer tramo hasta el PK 580 tenemos pórfidos y posteriormente pegmatitas.

La máquina TBM tiene una potencia de corte de 3500 kW, un par inicial de 14216 kNm, 53 discos simples, 4 discos dobles y un diámetro de discos de 17".

Es importante destacar que en el cálculo del Índice de penetración es necesario conocer el empuje de la máquina que produce el contacto de los cortadores contra la roca que al no lo proporcionar en muchas ocasiones las tuneladoras, no es posible determinar dicha variable de forma directa. Análogamente ocurre con el caso de la Energía específica de empuje.

El único parámetro que puede detectar las variaciones en la calidad geotécnica del macizo rocoso y que no necesita el empuje de contacto es la Energía específica de rotación.

Como se ve en la Figura 2, la energía específica de rotación registra las mismas variaciones en la calidad geotécnica del macizo rocoso que el índice de penetración.

En las máquinas TBM no está permitido el acceso del personal al frente, excepto en el caso de averías y mantenimiento. Cuando hemos podido acceder hemos procedido a elaborar las correspondientes fichas de control donde se recogía como información: el esquema del frente con sus litologías y estructuras, la resistencia a compresión de la roca, caracterización de macizo rocoso mediante el índice RMR, levantamiento de las discontinuidades y fotografías digitales del frente.

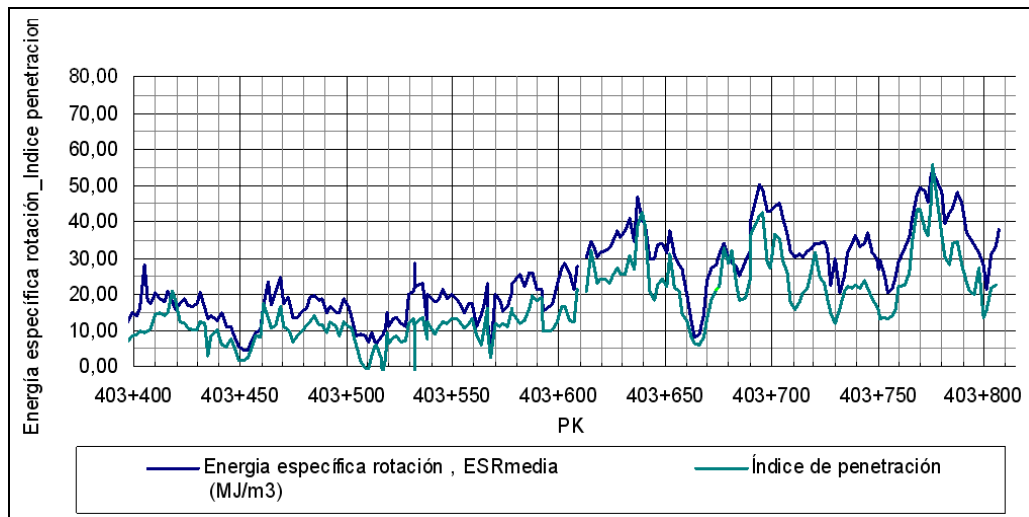


Figura 1. Relación entre las energías específicas de empuje y de rotación

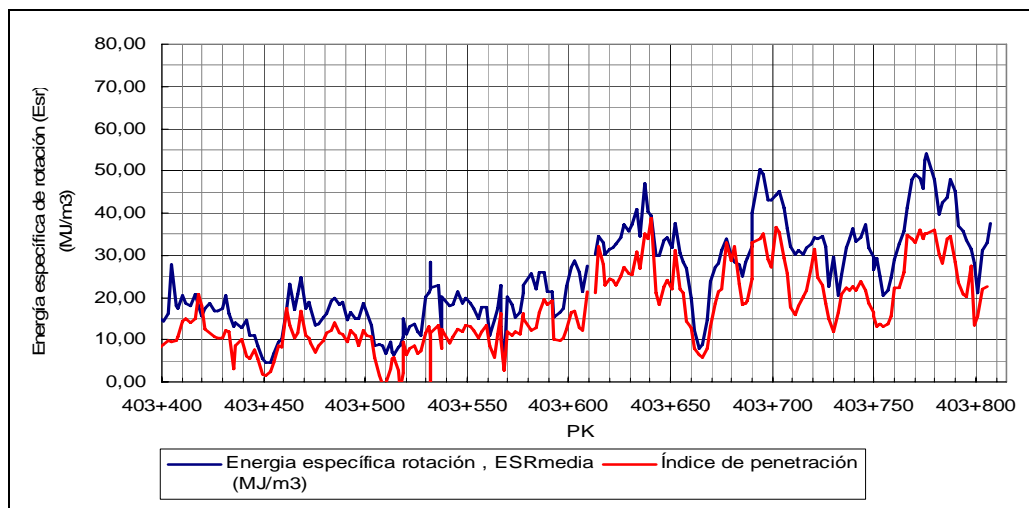


Figura 2. Relación entre la energía específica de rotación y el índice de penetración

Asimismo se tomaban los parámetros de funcionamiento de la tuneladora tales como la velocidad de avance, el volumen ó peso de escombro, el par de rotación y el empuje total aplicado.

En condiciones normales, donde el macizo rocoso es heterogéneo y además presenta juntas, el tamaño de los fragmentos del escombro dependerá no solo de la separación entre los discos de corte y de la disposición y características de las discontinuidades. La presencia

de lajas en el escombro es inversamente proporcional al número de familia de discontinuidades, al espaciamiento entre las juntas y a sus características mecánicas.

Mediante el análisis de los parámetros de los valores de Energía específica, Índice de facturación y topología de escombro puede definirse indirectamente una correlación que ayudan a interpretar la calidad geotécnica del macizo rocoso por delante del frente de excavación. En nuestro caso los valores índices se sitúan dentro de los obtenidos para los Túneles de Guadarrama, recogidos por (Roldán, 2008; Tardáguila y Suárez, 2007).

Las correlaciones obtenidas, además de su verificación y contraste con datos del terreno atravesado, deben aplicarse apropiadamente, pues existen situaciones en las que pueden inducir error, como en los casos de los terrenos poco fracturados por inestabilidad del frente, los macizos muy fracturados por litologías con menor resistencia y los terrenos poco fracturados, con desgaste anormal de cortadores

Los parámetros de perforación tanto individuales (par de torsión, empuje, velocidad de avance y penetración entre otros) como los obtenidos a través de expresiones más complejas (energía específica de excavación e índice de penetración entre otros) pueden ofrecer indicaciones posibles de las posibles variaciones del macizo rocoso atravesado.

Aplicando una metodología basada en la obtención de la energía específica de excavación por avance, la caracterización del macizo rocoso mediante el RMR, la correlación de los dos parámetros anteriormente indicados y la aplicación de las correlaciones obtenidas a nuevos frentes de excavación con más de 14200 datos obtenidos, se muestra en la Figura 3 la variación de las energías específicas de rotación. En la Figura 4 se exponen las relaciones obtenidas entre la energía específica de corte y el índice de penetración y en la Figura 5 las relaciones entre la energía específica de corte y el índice geomecánico RMR.

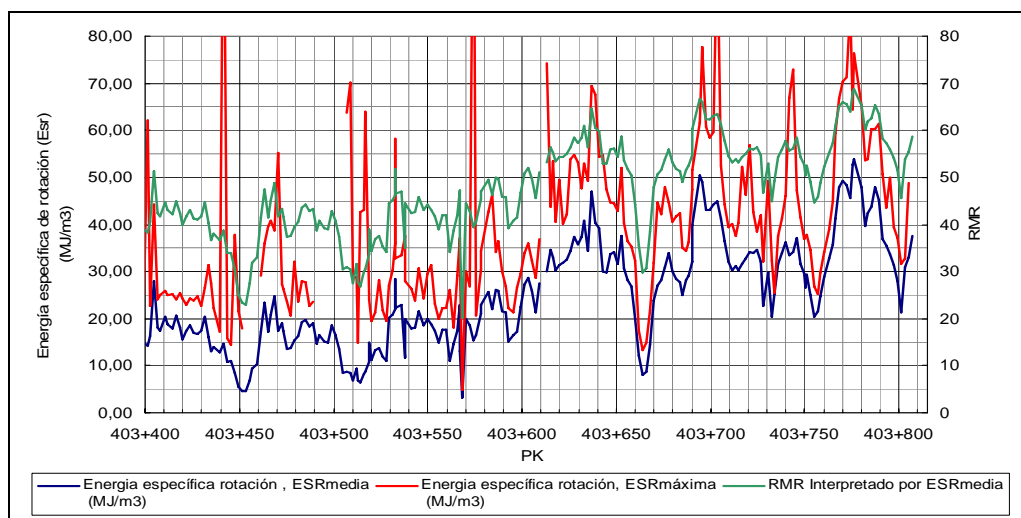


Figura 3. Variación de las energías específicas de rotación

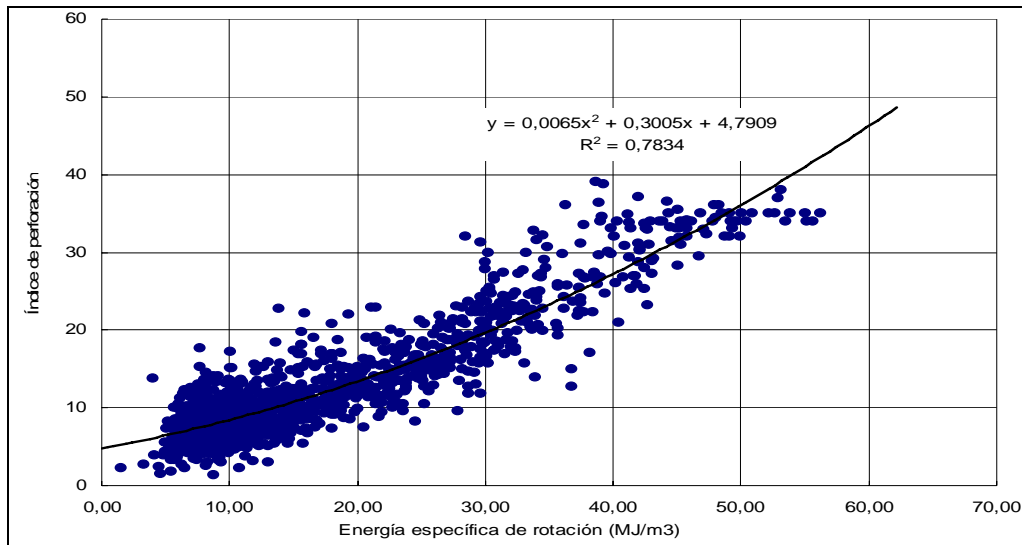


Figura 4. Relación entre la energía específica de corte y el índice de penetración

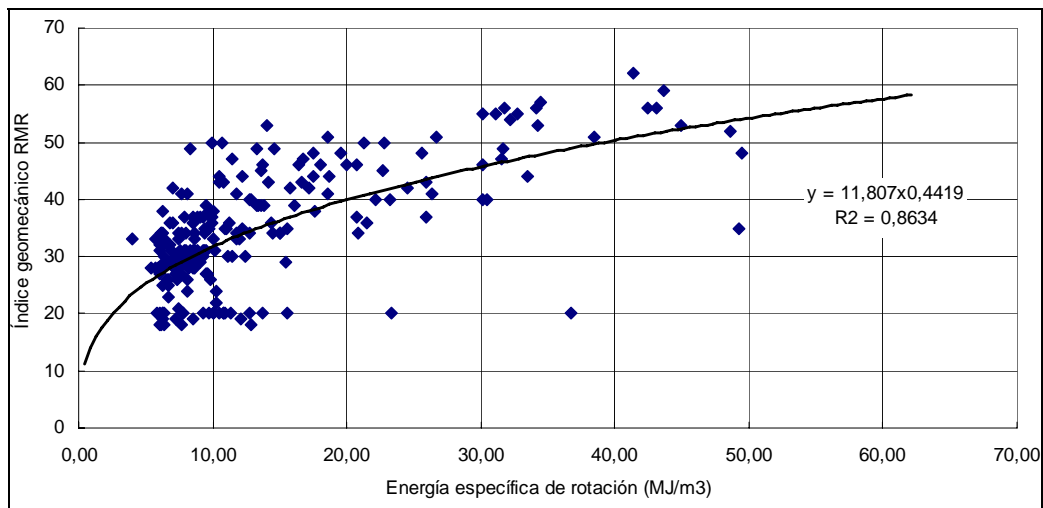


Figura 5. Relación entre la energía específica de corte y el índice geomecánico RMR

### 3. Relaciones entre los parámetros de excavación y las propiedades geomecánicas en las máquinas de ataque puntual

Los resultados que a continuación se exponen han sido consecuencia del desarrollo de un proyecto de investigación financiado por la Unión Europea. En la Figura 6 se muestra una máquina de ataque puntual de 250 kW de potencia, con una cabeza de corte de tipo axial, Figura 7, excavando en una galería minera con rocas tipo pizarras de 50 a 60 MPa y areniscas de 110 MPa de resistencia a compresión y una elevada abrasividad con un 60 % en volumen de cuarzo, (Toraño, 1992; Toraño, 1992; Toraño, 1997).

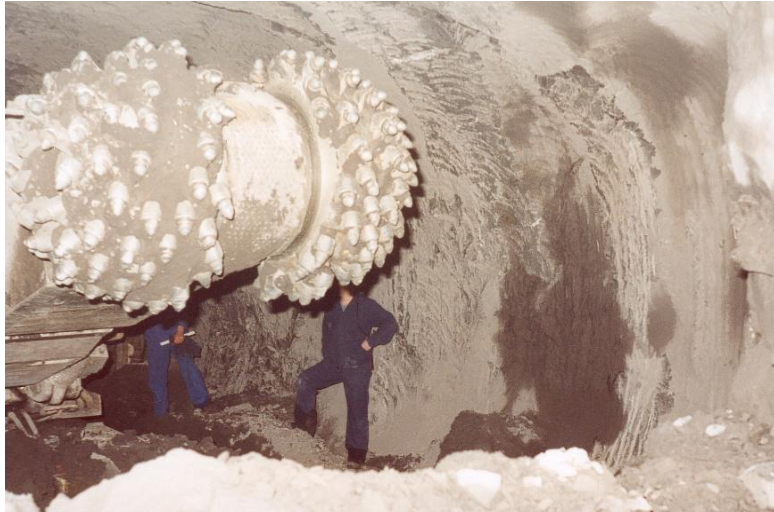


Figura 6. Máquina de ataque puntual con cabeza de corte de tipo axial

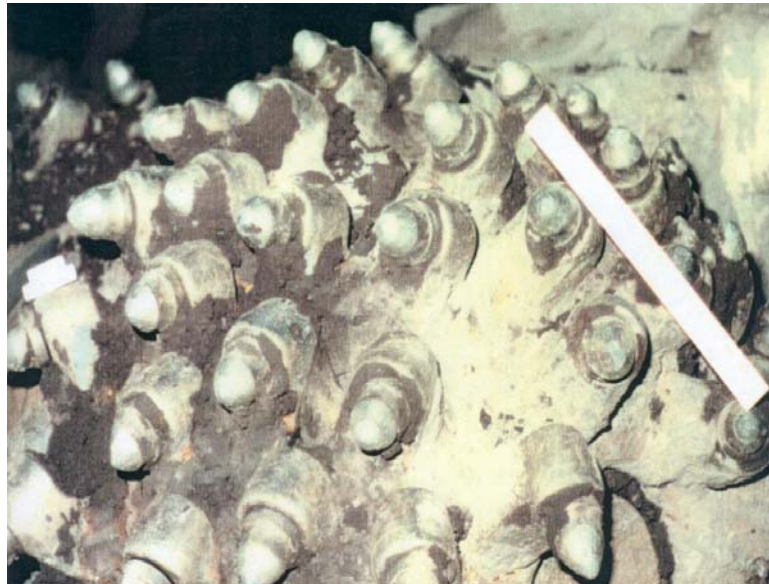


Figura 7. Cabeza de corte en pizarras y areniscas

Se efectuó una campaña de mediciones del denominado índice de fracturación en las galerías ensayadas, para lo cual se dividía la sección de excavación en retículas de 70 cm, midiendo el número de planos de debilidad que cortaban las líneas verticales y horizontales de las retículas trazadas. Se procedió asimismo a la extracción de testigos de roca determinando el índice RQD. Para las rocas indicadas, en la Figura 8 se muestra para el macizo rocoso por delante del frente de excavación de las relaciones encontradas entre el espaciado entre fracturas y el índice geomecánico RQD.

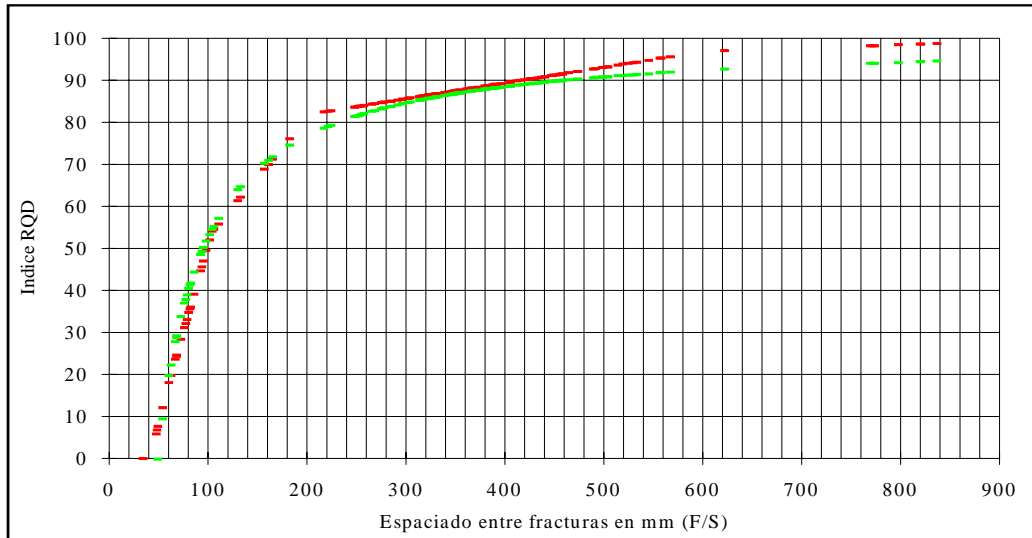


Figura 8. Relación entre el espaciado entre fracturas y el índice geomecánico RQD

En la Figura 9 se expone la relación del espaciado entre fracturas con el índice geomecánico RMR y en la Figura 10 las relaciones entre el espaciado entre fracturas, el RQD y la resistencia a compresión de la roca.

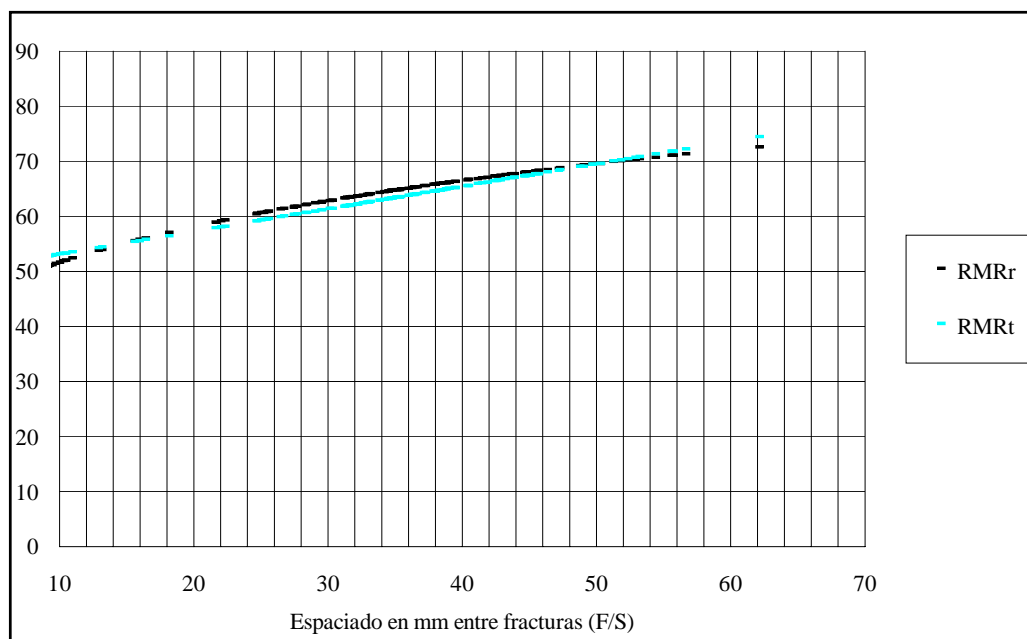


Figura 9. Relación del espaciado entre fracturas con el índice geomecánico RMR



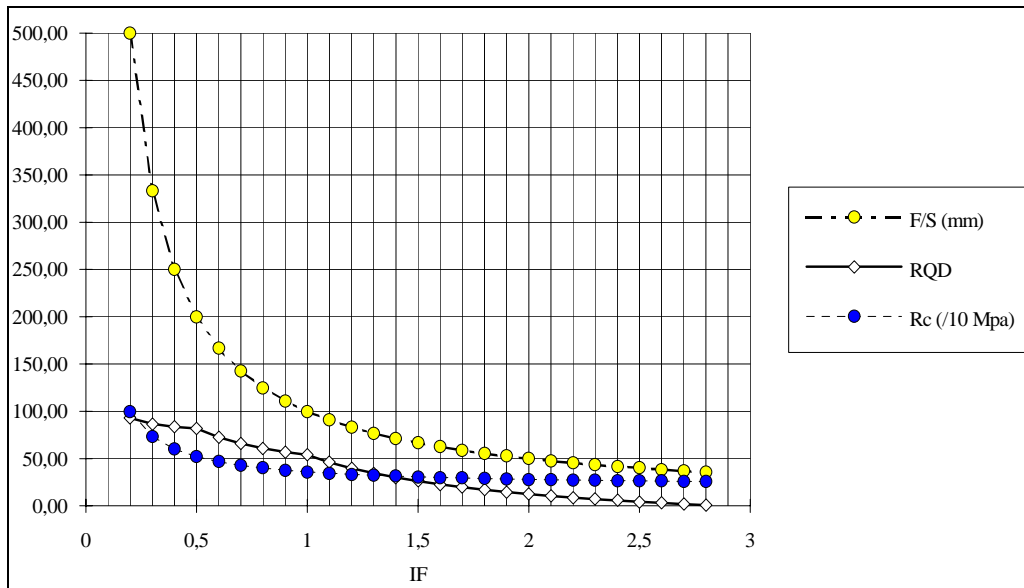


Figura 10. Relación entre el espaciamiento entre fracturas, el RQD y la resistencia a compresión de la roca

Junto con las mediciones continuas del rendimiento de excavación en  $m^3/h$  para cada movimiento elemental del ciclo de corte y para cada litotipo presente en el frente, se efectuaron asimismo las correspondientes medidas de la energía específica de corte mediante equipos de medida digitales y analógicos con grabación y procesamiento de los datos (Figura 11).



Figura 11. Equipo de medida digital de energía específica de corte

Los resultados obtenidos para las relaciones entre la energía específica de corte y el rendimiento de excavación de la máquina se muestran en la Figura 12, para cada uno de los movimientos de excavación de la máquina y para el conjunto de los mismos en un ciclo estándar de avance.

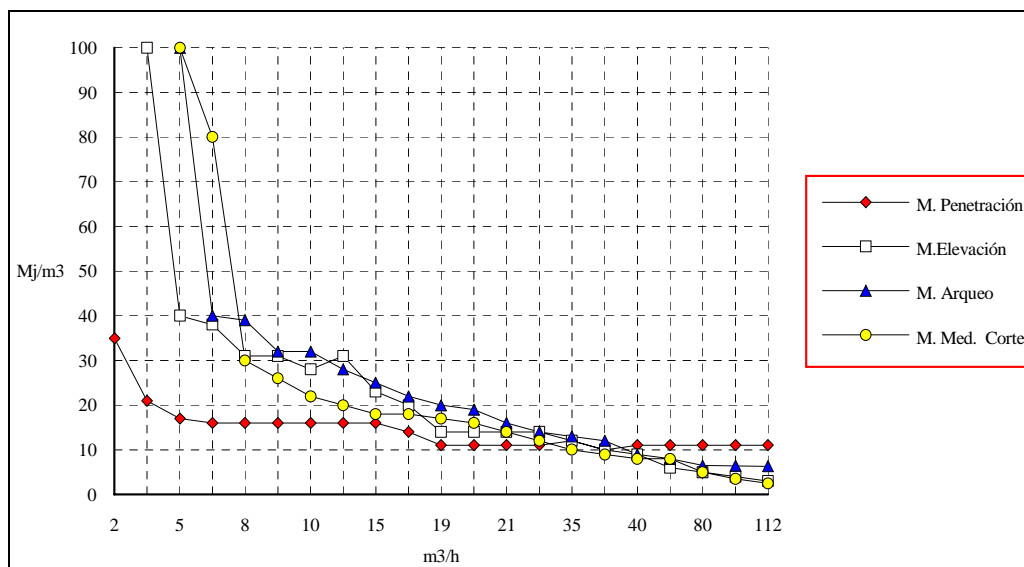


Figura 12. Relación entre la energía específica de corte y el rendimiento de excavación de la máquina

#### 4. Conclusiones

A partir de las relaciones obtenidas mediante medidas de campo en excavaciones subterráneas efectuadas con TBM en túneles y mediante máquinas de ataque puntual ó rozadoras se pueden obtener formulaciones y relaciones matemáticas que nos ayudan a predecir el comportamiento de los frentes de excavación antes de trabajar en los mismos.

En las excavaciones de las obras subterráneas median, el conocimiento continuo de las propiedades geológicas y geomecánicas del macizo rocoso por delante del frente de excavación es de gran importancia para la optimización de los diseños, de la planificación y de los trabajos así como de la maquinaria y equipos empleados.

#### Referencias

- Roldán J.M., “Evaluación de las condiciones geotécnicas detrás del frente de excavación del túnel empleando datos de perforación”. PFC. EUITM, 2008, Universidad de Oviedo.
- Tardáguila I. y Suárez J.L., “Metodología para el seguimiento y control del terreno en el interior de los túneles de Guadarrama. Volume 12. Ingeotúneles”, Entorno Gráfico, 2007.
- Teale R., “The concept of specific energy in rock drilling”. *International Journal of Rock Mechanics Science*, Vol. 2, 1965, pp.57-73.
- Toraño J., “Diseño, ensayo y desarrollo de una máquina de ataque puntual para la excavación de galerías de sección reducida en rocas competentes en Mina La Camocha”. *Report of Investigation, Researching Project sponsored by CECA and OCICARBÓN 1992*.
- Toraño J., Rozabilidad de rocas. Ph.D. (Thesis) 1992. Oviedo University.
- Toraño, J., “Ensayo en producción de un método para la explotación altamente mecanizada de capas subverticales de mediana potencia (2-3 m)”, *Report of Investigation, Researching Project sponsored by OCICARBÓN 1997*.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Susana Torno Lougedo. Dpto. Explotación y Prospección de Minas.  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo

C/ Independencia, 13 33004 OVIEDO  
Teléfono: +34 985104254  
FAX: +34 924 985104245  
E-mail: [tornosusana@uniovi.es](mailto:tornosusana@uniovi.es)