

La importancia de los ensayos en la adecuada elección de las máquinas de ataque puntual como método de excavación (*)

Por P. RAMIREZ OYANGUREN

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

y L. CORNEJO

Departamento de Geotecnia de Agromán Empresa Constructora, S. A.

Entre los factores que mayor influencia tienen en el coste de una excavación se encuentran el rendimiento horario y el consumo de útiles de corte y piezas, para cuyo cálculo previo existen diversos procedimientos técnicos, cuyo empleo permite una adecuada selección de los equipos a utilizar.

1. INTRODUCCION

La elección de la maquinaria de excavación adecuada a un proyecto determinado, exige un estudio previo detallado. Para que esta elección resulta satisfactoria, es necesario disponer de estimaciones previas suficientemente fiables acerca de los factores que mayor influencia tienen en el costo de excavación.

Cuando esta excavación se realiza con máquina de ataque puntual estos factores son:

- El Rendimiento instantáneo (R_i), definido como el número de metros cúbicos de roca excavada por hora de trabajo efectivo de la máquina y expresado en m^3/h .
- El Consumo de útiles de corte y piezas sometidas a desgaste (picas, portápicas, cadenas, racletas, expresado en Uds/ m^3).

Estas estimaciones previas se realizan con la ayuda de técnicas de evaluación que deben ponerse a punto desarrollando ecuaciones de predicción de Rendimientos instantáneos y Desgastes, correlacionando unos ensayos con resultados reales obtenidos durante la excavación.

El uso habitual de estas técnicas de evaluación, reducirá los riesgos asociados a la selección del equipo de excavación y permitirá realizar una planificación, programación y estimación de costos adecuada.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1988.

2. RESISTENCIA AL ARRANQUE (Cuttability)

Esta propiedad representa la disposición de una roca o sustancia mineral a ser excavada (convertida en fragmentos mediante la utilización del método de corte (cutting) empleado por las máquinas de ataque puntual y se expresa por medio de índices que permiten establecer una escala cualitativa.

Los índices, deducidos de ensayos de laboratorio sobre muestras de roca intacta y de observaciones de macizos rocosos, permiten establecer correlaciones entre ellos y los datos reales de rendimientos instantáneos y desgastes obtenidos en el terreno durante la excavación, lo que ha hecho posible proponer unas ecuaciones de predicción.

El uso de estas ecuaciones durante la etapa de proyecto, permitirá disponer de datos estimados fiables para efectuar una evaluación adecuada de los métodos de excavación.

3. INDICES DE RESISTENCIA AL ARRANQUE

La correcta determinación del índice de resistencia al arranque de un macizo rocoso exige la obtención de datos relativos a:

- a) Las propiedades de la roca intacta.
- b) Las propiedades del macizo rocoso.

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas aconseja (1) la utilización de una serie de ensayos a realizar sobre muestras de roca intacta, siendo algunos de los más importantes los siguientes:

Propiedad de la roca o mineral	Ensayo propuesto
DUREZA	Dureza con el escleroscopio Shore** Con el martillo Schmidt (rebote)**
RESISTENCIA	Resistencia al cizallamiento sin confinamiento** Resistencia a compresión simple* Resistencia a tracción, ensayo brasileño*
PERFORABILIDAD	Perforabilidad Goodrich** Índice NCB con cono indentador** Dureza al impacto** Índice Voest-Alpine*
ABRASIVIDAD	Abrasividad CERCHAR** Número de desgaste Goodrich**
OTROS FACTORES IMPORTANTES	Contenido de cuarzo Coeficiente de textura Tamaño y forma del grano Velocidades de las ondas P y S mediante ultrasonidos en laboratorio. Relación de amplitud transmitida Relación modular E dinámico/E estático

(W.E. Bamford, 1986).

** Ensayo preferido.

* Ensayo tolerado.

La estructura geológica del macizo rocoso tiene una influencia importante en los rendimientos de arranque. La presencia de juntas, planos de estratificación, foliaciones y discontinuidades, favorece el arranque del macizo. De todas las características de las debilidades estructurales las que con mayor influencia tienen son el espaciamiento y la densidad de fracturación.

Un programa de investigación de la NCB del Reino Unido (2) ha expresado la estructura geológica mediante el parámetro $A = \text{microfracturas/m.} + (100 - \text{RQD})$, que varía entre 0 y 300.

Clasificados los macizos rocosos en intactos poco fracturados y muy fracturados, los valores correspondientes del parámetro A serán:

Macizos rocosos intactos $A < 10$.

Macizos rocosos poco fracturados

$200 > A > 10$.

Macizos rocosos muy fracturados $A > 200$.

En el término microfracturas se incluyen tanto las fracturas abiertas como las cerradas, afectadas estas últimas de un factor reductor. El recuento de las microfracturas se hace sobre testigo de sondeo, limpiándolo previamente con un disolvente antes de aplicarle un colorante penetrante con un spray.

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (1) propone el uso de dos parámetros para considerar la influencia de la estructura del macizo rocoso:

a) Parámetro G_R

Este parámetro viene definido por la suma de los parámetros 3 y 4 de la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski, correspondientes al valor asignado al espaciamiento de las discontinuidades y a la condición de las mismas respectivamente.

b) Parámetro G_0

Este parámetro viene definido por los cuatro primeros parámetros de la clasificación que definen el índice Q de calidad de la roca, siendo $G_R = (\text{RQD}/J_N)(J_R/J_A)$ (2).

También es importante la velocidad sísmica de las ondas P medida en el terreno.

Entre los ensayos de laboratorio desarrollados específicamente para determinar la resistencia al arranque merecen destacarse los siguientes:

• El ensayo de Goodrich.

Se puede obtener un índice de resistencia al arranque a partir de los datos proporcionados por los ensayos de perforabilidad y de desgaste Goodrich.

Golder Moss Asociados sugirieron en 1973 (3) que una relación entre ambos parámetros superior a 10 es un valor adecuado para un arranque económico con máquinas de ataque puntual ligeras y medianas, es decir: $I_A = IP_0/ID_0 > 10$ (3).

I_A = Índice de resistencia al arranque.

IP_0 = Índice de perforabilidad Goodrich.

ID_0 = Índice de desgaste Goodrich.

No se dispone de datos publicados del valor del índice cuando se utilizan modernas máquinas muy pesadas, pero puede estimarse que la utilización económica de estas máquinas se extiende hasta un valor del índice de 8.

En la figura n.º 1 se indican gráficamente estos límites.

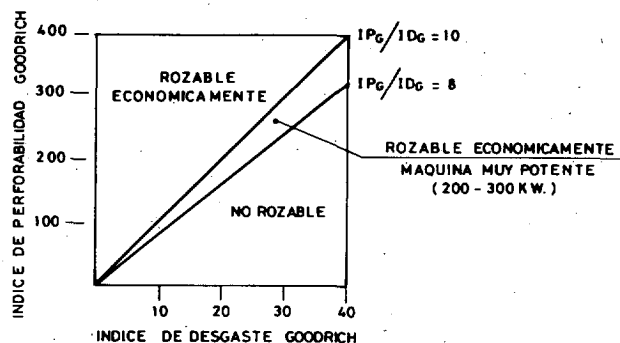


Figura 1.—Criterio de resistencia al arranque utilizando los ensayos Goodrich. (Según P. J. Gurgess, Hosking, P. Mirkow) (3)

• El ensayo Cerchar.

La resistencia al arranque de una roca puede determinarse a partir de los ensayos de laboratorio desarrollados por CERCHAR (Valentín 1975). (4).

En estos ensayos se miden sobre una muestra intacta de roca dos características, su abrasividad y su dureza. El índice de resistencia al arranque se determina mediante el producto de ambos parámetros.

Los ensayos CERCHAR han sido adoptados también en el Reino Unido para predecir la resistencia al arranque de los estratos del carbonífero.

Hughes demostró en 1986 que el límite superior del índice de resistencia al arranque para que la excavación resultase económica con máquinas ligeras era de 18, cumpliéndose: $I_A = IC_D \times IC_A < 18$.

No hay referencias escritas del límite económico del índice cuando se utilizan máquinas pesadas o muy pesadas, sin embargo, pueden estimarse valores entre 25 y 30, cumpliéndose la expresión $I_A = IC_D \times IC_A < 25 - 30$ (5).

El ensayo CERCHAR de dureza es un método indirecto de determinación de dicha característica mediante una prueba de perforabilidad.

La DUREZA CERCHAR se define como la pendiente de la tangente en el origen de la curva de penetración de la barrena en función del tiempo y representa la velocidad inicial de perforación. Esta dureza se expresa por el tiempo en segundos referido a la tangente y correspondiente a la profundización de 1 cm. (Figura n.º 2).

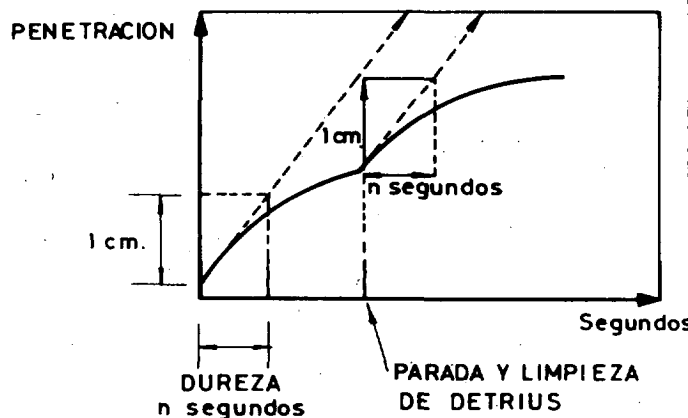


Figura 2.— Determinación de la dureza Cerchar.

La comparación para diferentes rocas de las durezas obtenidas con este ensayo y la resistencia a compresión simple medida sobre probeta cilíndrica de roca de 25 mm. de diámetro y 50 mm. de altura, ha puesto en evidencia una correlación entre ambas cuya ley estadística de ajuste es de forma logarítmica (Figura n.º 3).

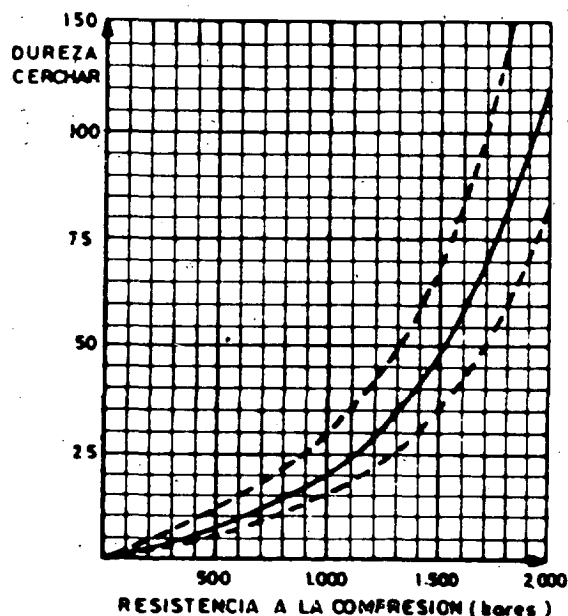


Figura 3.— Correlación entre dureza Cerchar y ensayo resistencia a compresión simple. (Según R. Cordel y otros) (4).

De un modo simplificado se utiliza la expresión $RCS = 4,5 D_c$ (6) para expresar esta correlación, donde RCS es la resistencia a compresión simple y D_c la dureza CERCHAR. El índice de dureza oscila normalmente entre 0 y 150, llegándose al valor 200 para las rocas más duras. Las durezas de algunas rocas son:

TABLA 1

DUREZA DE ALGUNAS ROCAS

ROCA	DUREZA CERCHAR
Carbón	0-4
Esquistos y areniscas blandas	4-10
Rocas muy duras	200

(Según R. Cordel y otros) (4)

La abrasividad CERCHAR se mide por el desgaste, expresado en décimas de milímetro, producido en la punta cónica de un punzón de acero al desplazarlo horizontalmente sobre la muestra de roca 1 cm. La medición del desgaste se efectúa mediante una lupa o un microscopio.

Para conseguir una buena determinación de la abrasividad, es necesario efectuar tres ensayos para cada muestra de roca. La escala de abrasividad varía generalmente entre 1 y 10, con un valor extremo de 15 para las rocas más abrasivas. La abrasividad de algunas rocas se recoge en la siguiente TABLA N.º 2: ABRASIVIDAD DE ALGUNAS ROCAS.

ROCA	ABRASIVIDAD CERCHAR
Carbón	0,1
Pizarra	1,5
Arenisca	5
Rocas muy abrasivas	10
Rocas extremadamente abrasivas	15

(Según Ian Mc. Feat-Smith) (6).

4. ECUACIONES DE PREDICCION

El objetivo final es obtener, a partir de unos índices definidos, ecuaciones de predicción que proporcionen datos fiables sobre rendimientos instantáneos (m^3/h), avances instantáneos (m/h) y desgastes de útiles de corte (Uds/m^3). Con estos datos será posible evaluar adecuadamente los costos de excavación para diferentes máquinas, reduciendo al mínimo el riesgo de una elección desacertada.

En la figura n.º 4 se propone un proceso a seguir para la obtención de las ecuaciones de predicción.

Una ecuación de predicción que sea de desarrollo simple y de bajo costo de obtención puede resultar de gran utilidad. Como se indica en la figura n.º 4, dicha ecuación debe contener algunos de los parámetros incluidos en los tres grupos resumidos en la tabla n.º 3.

TABLA 3

GRUPOS DE PARAMETROS A CONSIDERAR

GRUPO	PARAMETROS CONSIDERADOS
1	Parámetros relativos a la roca intacta.
2	Parámetros relativos al macizo rocoso.
3	Parámetros relativos a la máquina.

Una vez seleccionado el modelo apropiado de predicción, elegidos los parámetros y la formulación matemática del modelo, debe ser contrastado y/o calibrado con los datos de campo. Para ello, se utilizarán análisis estadísticos de regresión lineal y no lineal entre los resultados obtenidos en el campo y los índices, considerando los primeros como variables dependientes y los segundos, como variables independientes. El análisis retrospectivo de casos históricos y actuales proporciona un excelente banco de datos para establecer estas correlaciones. Actualmente están abiertos distintos caminos de investigación para la obtención de ecuaciones de predicción; algunos de éstos son:

LA IMPORTANCIA DE LOS ENSAYOS EN LA ADECUADA ELECCION DE LAS MAQUINAS

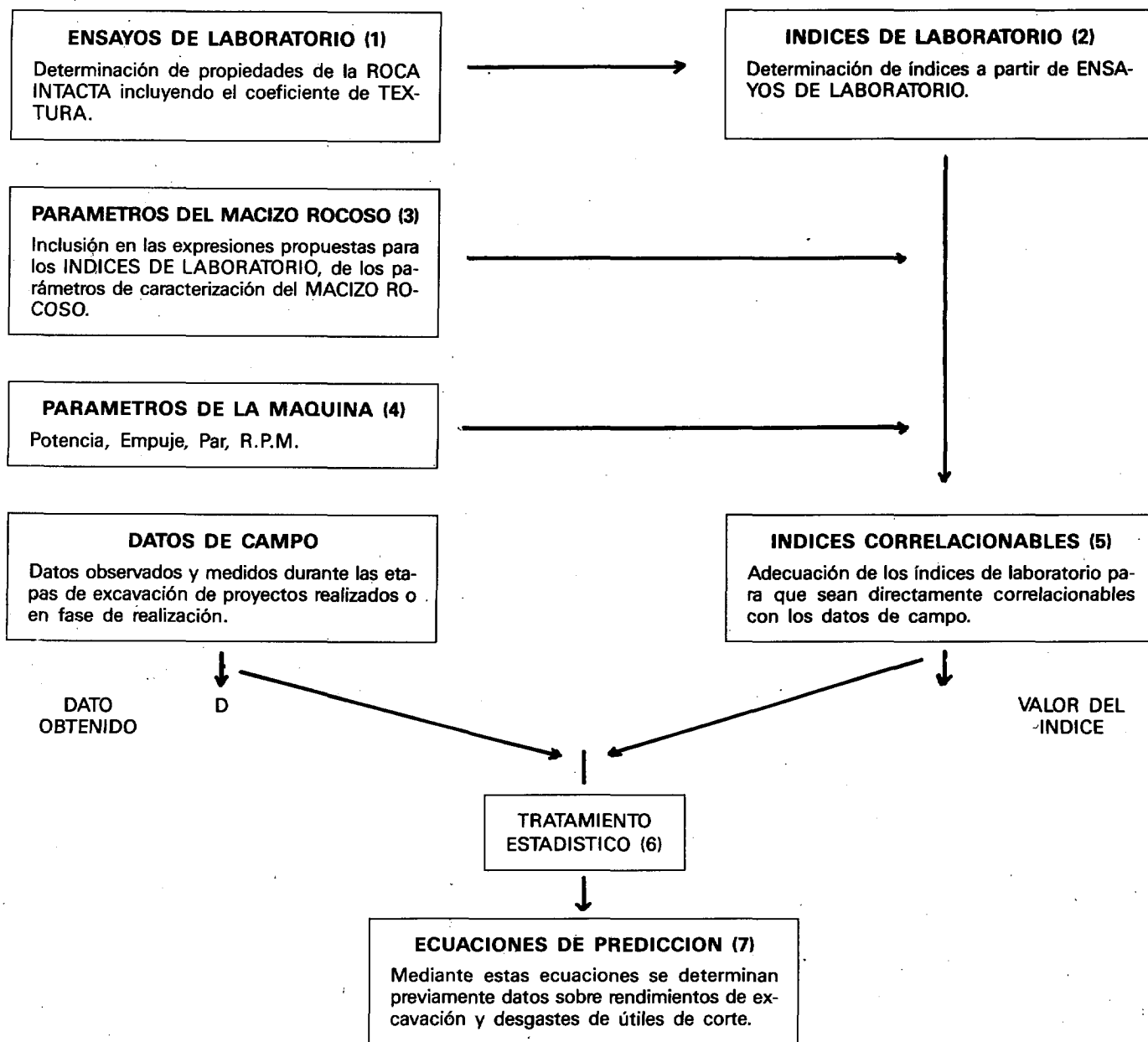


Figura 4.— Proceso a seguir para la determinación de las ecuaciones de predicción.

a) Equipo del Dr. Howarth (Departament of Mining and Metallurgical Engineering, Universidad de Queensland - Australia). Realiza ensayos de micro estructura y microtextura de la roca. Ha establecido correlaciones entre el coeficiente de textura, el índice de penetración a percusión en mm/min. y la resistencia a la compresión uniaxial (1986), poniendo de manifiesto que una roca con un alto coe-

ficiente de textura tiene una baja perforabilidad (baja penetración instantánea) y un alto valor de la resistencia a la compresión uniaxial, inversamente ocurre cuando el coeficiente de textura tiene un valor bajo.

b) Equipo del Dr. Bamford (Departament of Civil Engineering, Universidad de Melbourne - Australia).

Ha desarrollado una batería de ensayos que pretenden imitar, a escala reducida el comportamiento de las herramientas de corte y de perforación y los mecanismos de rotura que se desarrollan en la roca con las máquinas existentes en el mercado (7). Representando los índices de perforabilidad o de resistencia al arranque en relación con la abrasividad o el índice de desgaste, consigue una buena representación gráfica de la interacción entre ambos grupos de factores.

- c) Equipo del Dr. Roxborough (School of Mines de la Universidad de NSW - Australia).

Su investigación se basa en el estudio de los mecanismos de penetración de discos o picas en ensayos en los que se utilizan herramientas de corte de la misma forma y de un tamaño mitad al real. Mediante estas investigaciones ha desarrollado formulaciones numéricas de los mecanismos de corte (7).

- d) Equipo de los Drs. Mc Feat-Smith y Fowell.

Su investigación sigue el método inglés, utilizando para la obtención de los índices de resistencia al arranque y desgaste las siguientes propiedades de la roca:

$$SE = 0,14 (CI)^2 + 3,3 (CS)^{1/3} + 0,000018 (SH)^3 + 0,0057 (CC)^3 - 4,38 \text{ MJ/m}^3. (8).$$

$$CW = 0,55 + 4,25 SH^3 \times 10^{-5} - 1,88 (SH)^2 \times 10^{-3} + 1,98 (CC)^3 10^{-3} + 1,2. (QC)^3 10^{-6} (9).$$

A partir del índice de energía específica (SE) han elaborado la siguiente escala de resistencia al arranque (Figura n.º 5).

ENERGIA ESPECIFICA OBTENIDA EN EL LABORATORIO MJ/m³			ARRANQUE m³/h
Máquinas pesadas.	Máquinas de peso medio.	32 —	MUY MALO
		25 —	MALO
		20 —	MODERADO A MALO
		17 —	MODERADO A BUENO
		8 —	ALTO

Figura 5

Tipo de Máquina	Predicción de Parámetros	Propiedades de la Roca
Ataque Puntual	Rozabilidad m³/h.	Energía específica (SE) y/o Cono indentador (CI) Coef. de plasticidad (K) Resistencia a compresión (CS) Dureza Shore (SH) Coef. de cementación (CC)
	Costo de cortadores	Desgaste de corte (CW) Dureza Shore (SH) Contenido de cuarzo (QC) Coef. de cementación (CC)

(según Mc Feat-Smith) (6).

Mediante estos parámetros obtenidos en el laboratorio, proponen los siguientes INDICES DE LABORATORIO:

$$SE = -0,65 + 0,41 (CI)^2 + 1,81 K^{1/3} + 2,6 \text{ MJ/m}^3 (7).$$

- e) Estudio de V.P. Aleman (1983).

Este autor ha llevado a cabo numerosos experimentos en túneles y galerías durante cuatro años, consistentes en medir el rendimiento de corte de máquinas de ataque puntual y determinar las propiedades mecánicas de las rocas y macizos rocosos en que dichas máquinas trabajan. Las propiedades valoradas fueron las siguientes:

- Resistencia a compresión simple (CS).
- Resistencia a tracción (t).
- Dureza shore (SH).
- Abrasividad Cerchar (AB).
- Energía específica de perforación (SE).

- Índice de resistencia in situ (ISSI).
- R.Q.D.
- Microfracturas por metro (MF).
- Valor $A = MF + 100 \text{ RQD}$.

De las correlaciones entre cada una de las propiedades anteriores y el rendimiento dedujo que, aparte del índice de resistencia in situ, no existe una buena correlación entre cada uno de los relacionados parámetros aislados y el rendimiento de la máquina. Sin embargo, cuando ciertas propiedades medidas en el laboratorio se combinan con las características del macizo rocoso, la precisión de la predicción mejora sustancialmente. La correlación es buena si el macizo se clasifica por el valor de A.

Las fórmulas para obtener la calidad de los macizos rocosos propuestas por ALEMAN son las siguientes:

- Estado intacto ($A < 10$)

$$n = \frac{118}{CS} - 0,651$$

- Estado poco fracturado ($10 < A < 200$).

$$n = 0,7 \log AB + \frac{149,96}{CS} + 0,01 MF - 2,26$$

- Estado muy fracturado ($A > 200$).

$$n = 0,53 \text{ RQD} + 0,04 A - 7,08.$$

La resistencia a compresión simple CS se expresa en MPa en las fórmulas anteriores.

La presentación por revolución de la cabeza se puede expresar, según Aleman mediante la fórmula:

$$P = n T + 1,47 n^2 - 5 n + 0,35.$$

De lo que se acaba de exponer se deduce que, conocida la calidad «n» del macizo rocoso y la presión de la cabeza sobre el frente, se puede determinar la penetración.

Finalmente el rendimiento puro de corte puede calcularse a partir de la expresión:

$$R = P \times a \times r \times 0,6.$$

donde:

R = rendimiento puro de corte en m³/h.

P = penetración en cm/revolución.

a = área de la cabeza de corte en contacto con la roca para una penetración de 10 cm., en m².

r = velocidad de giro de la cabeza de corte en revoluciones/minuto.

BIBLIOGRAFIA

1. BAMFORD, W.E. (1986).: Cuttability and drillability of rock. Civil College Technical Report-julio.
2. ALEMAN, V. P. (1983).: Prediction of cutting rates for boom type radheaders Tunnels and Tunnelling, enero.
3. GURGESS, Peter J., HOSKING, Ian A. and MIRKOW, Peter (1987).: Geotechnical Investigations for urban road tunnels in Sydney. VI Australian Tunneling Conference V-1, marzo.
4. CORDEL, R., COMES, G., DUFFAUT, P. VALENTIN, A. (1974). La Géotechnique et le creusement mécanisé des tunnels Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics A.F.T.E.S. Groupe de Travail.
5. HOWARTH, D.F. (1987).: Mechanical Rock excavation-assessment of cuttability and borability; Rapid Excavation Tunneling Conference.
6. Mc FEAT-SMITH, Ian (1987).: Considerations for mechanised excavation of rock Tunnels rapid excavation and tunnelling conferencia.
7. BAMFORD, W.E. (1986).: Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance. Civil College Technical Report.
8. HOWARD, D.F. (1987).: Recent Developments in Assessing Rock cuttability and boreability. Rapid excavation and tunnelling conferencia.

Laureano Cornejo Alvarez



Ingeniero de Minas. Promoción de 1969 de la Escuela de Madrid. Desarrolla su actividad profesional en Agromán Empresa Constructora, S. A.; actualmente en el Departamento de Geotecnia y más específicamente en el campo de las obras subterráneas.

Es autor de diversas publicaciones sobre maquinaria y tecnología de túneles, así como de trabajos sobre uso de

explosivos en obras subterráneas.

Ha intervenido como ponente en Cursos Nacionales y Congresos Internacionales sobre métodos constructivos en obras subterráneas. En la actualidad es Secretario de la Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas (AETOS).