

Revisión crítica de los ensayos de abrasividad en las rocas y de la influencia de las características petrográficas

Critical review of abrasivity tests in rocks and the influence of the petrographic features

N. SÁNCHEZ-DELGADO¹, L. CALLEJA², A. RODRÍGUEZ-REY²,
A. SETIEN², Y V. G. DE ARGANDOÑA²

¹ *Fundación Centro Tecnológico do Granito de Galicia, C/Ribeira s/n, Torneiros, 36410 O Porriño, España*

² *Departamento de Geología. Universidad de Oviedo, C/Jesús Arias de Velasco s/n, 33012, Oviedo, España*
(e-mail: lcalleja@geol.uniovi.es, arrey@geol.uniovi.es, vgargand@geol.uniovi.es)

Resumen: La abrasividad de las rocas tiene gran influencia en algunas de sus aplicaciones, como en los sectores de la piedra natural y en el de ingeniería y obra civil. Para su cuantificación existen más de 15 métodos de ensayo. En este trabajo se hace una revisión de estos métodos clasificándolos en dos grandes grupos: en el caso de la piedra natural se considera el desgaste de los materiales rocosos en contacto con un útil de desgaste, mientras que, en obra civil, por el contrario, se presta atención al desgaste que la roca provoca en los útiles de corte o perforación. Por otra parte, se consideran también aquellos métodos en los que la abrasividad de las rocas se define en función de la variación del valor de alguna de sus propiedades.

Palabras clave: Abrasividad, métodos de ensayo, rocas, propiedades físicas, petrografía.

Abstract: The abrasiveness of the rocks has a great influence in some of their applications, such as in the natural stone and in the civil engineering sectors. There are more than 15 test methods for its quantification. This work summarizes these methods and their classification into two large groups: in the case of natural stones the wear of the rock materials when in contact with a wear tool is taken into account; on the other hand, in civil engineering attention is paid to the wear that the rock causes in the cutting or drilling tools. In addition, those methods, in which the abrasiveness of rocks is defined according to the variation of the value of some of its properties, are also considered.

Keywords: Abrasivity, testing methods, rocks, physical properties, petrography.

La abrasividad de las rocas es un parámetro con gran repercusión económica tanto en el ámbito de obra civil y minería, como en el sector de la piedra natural, dado que afecta directamente a la velocidad y calidad del trabajo, y al rendimiento de las herramientas de corte y perforación, influyendo en la vida útil de las mismas. En consecuencia, la determinación de la abrasividad de las rocas es imprescindible tanto para definir los métodos de corte y/o perforación, como para seleccionar los útiles y parámetros de corte más adecuados; en definitiva, para optimizar el procesado de la piedra y para calcular los costes de una obra o de un producto final cuando se trabaja con materiales rocosos. Para evaluar la abrasividad de las rocas existen más de 15 métodos de ensayo que se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Un grupo de ensayos, la mayoría, han sido desarrollados en el campo de la obra civil a partir de los problemas surgidos en la construcción de túneles; su finalidad, en general, es optimizar la perforabilidad, excavabilidad y/o cortabilidad de los materiales. La mayor parte de estos ensayos se basan en la medida del desgaste de piezas metálicas al interaccionar con la roca. Dentro de este grupo destaca el índice de abrasividad CERCHAR.
- Otro grupo de ensayos ha sido desarrollado en el campo de las rocas ornamentales para evaluar el desgaste de los pavimentos de piedra natural expuestos a tráfico peatonal (Fig. 1). En este caso, el objetivo del ensayo es medir el desgaste de la piedra y no del útil. Uno de los métodos más extendidos actualmente, especialmente en Europa, es la medida de la resistencia a la abrasión a través del método de «abrasión del disco ancho» (norma UNE-EN 14157).

La respuesta abrasiva de las rocas depende de tres tipos de variables: 1) las características del utensilio que provoca el desgaste, corte o mecanizado; 2) las condiciones de trabajo; y 3) las propiedades intrínsecas de la roca. En esta última variable pueden diferenciarse dos aspectos. a) Características petrográficas: mineralogía (abundancia), textura (distribución de los granos, forma, tamaño, orientación, etc.), espacios vacíos (porosidad y microfisuración, que contribuyen a reducir la unión textural modificando las características elásticas de la roca) y grado de alteración. b) Propiedades físicas: dureza, resistencia a compresión y a la tracción, etc.

De estas tres variables, las propiedades intrínsecas de la roca son las únicas que no se pueden modificar ante una necesidad real y concreta de acción abrasiva, bien sea de corte, excavación o perforación. Sin embargo, el equipo utilizado y los parámetros de uso pueden variarse para optimizar la acción, y, de hecho, existen numerosos estudios en esta línea. Mayoral Fernández (2014) realizó un extenso estudio de campo bajo condiciones controladas para optimizar la perforación de barrenos en terrenos homogéneos, estudiando entre otros, el desgaste para bocas de perforación en un túnel y una mina a cielo abierto; también Plinninger *et al.* (2002) ya habían intentado realizar una predicción del desgaste de las brocas de perforación en jumbos y carros de perforación.

Así pues, la influencia de los parámetros petrofísicos en la respuesta abrasiva de las rocas es uno de los pilares más importantes para comprender el comportamiento de la abrasión y, sin embargo, siguen siendo poco considerados a la hora de interpretar los procesos de corte, perforación, excavación y desgas-



Figura 1. Ejemplos de perforación, corte y desgaste por tráfico peatonal.

te. Existen, además, discrepancias entre los distintos autores sobre la importancia relativa del grado de influencia de las distintas características. Algunos estudios concluyen admitiendo que otros parámetros de la roca no estudiados deben influir en la abrasividad; incluso existen declaraciones de miembros de los comités internacionales de normalización de métodos de ensayo (CEN y ASTM) que invitan a la comunidad científica a investigar la relación que existe entre la abrasividad de las rocas y sus propiedades físicas para revisiones futuras de la norma.

En la práctica se parte de supuestos que complican la interpretación de la abrasividad de los materiales rocosos y hacen difícil la elección de los útiles de corte y/o las condiciones del proceso de corte. Por otra parte, en la bibliografía sobre el tema se encuentran bastantes referencias a la necesidad de considerar las propiedades de las rocas para estimar su abrasividad: por ejemplo, Plinninger *et al.* (2002) intentando establecer métodos de elección para brocas de perforación, encontraron insuficiente la utilización exclusiva de métodos de ensayo de la abrasión como el CERCHAR. Ersoy y Waller (1995) afirman que el conocimiento de las propiedades de las rocas es esencial para el diseño de las brocas y equipo de perforación y para seleccionar sus parámetros de trabajo más adecuados. A pesar de la afirmación de Plinninger (2010) sobre el índice de abrasividad de las rocas (RAI), de que «la abrasividad de la roca nunca puede ser un parámetro físico intrínseco como, por ejemplo, la resistencia de la roca», la respuesta de las rocas a la resistencia a la abrasión tiene que ser una consecuencia directa de sus características petrográficas y sus propiedades físicas.

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión exhaustiva y crítica de los métodos de ensayo existentes para determinar la resistencia a la abrasión de las rocas, así como de las relaciones entre las propiedades de las rocas y su petrografía con la abrasividad de las mismas.

Abrasión y abrasividad: definiciones

La Real Academia de la Lengua Española (RAE), sitúa el origen del término abrasión en el verbo latino *abradere* (raer), y la define como «acción y efecto de

raer o desgastar por fricción». Una definición geológica sería: la acción erosiva que tiene lugar cuando partículas de tamaño variable son arrastradas o lanzadas contra una superficie rocosa. Marini *et al.* (2011) definen la abrasión de las rocas como «el desgaste causado por la acción de elementos que, al entrar en contacto con la superficie, retiran una pequeña o gran cantidad de material de la superficie» y afirman que es un factor importante de envejecimiento de la piedra natural, incrementándose su acción con el tiempo. Golovanevskiy y Bearman (2008) explican que la abrasividad es una propiedad que refleja el efecto abrasivo de las rocas y minerales al contacto con otros materiales y, por lo tanto, de gran importancia en la vida útil de los materiales y eficiencia en el procesado de minerales y equipos de trabajo.

La dureza es una propiedad de las rocas muy relacionada con su abrasividad. Según la ISRM (1978), la dureza es un concepto del comportamiento del material, una propiedad fundamental de la roca, aunque el resultado de su medida depende del tipo de ensayo utilizado. La definición de dureza más común en geología, es la resistencia de un mineral a ser rayado por otro mineral o material, siendo la referencia estándar la escala de dureza de Mohs. La ISRM (1978) diferencia tres tipos de ensayos para la dureza (que también han sido utilizados en ocasiones para medir la respuesta abrasiva de la roca): a) ensayos de indentación: microdureza Knoop y Vickers, b) ensayos dinámicos o de rebote: dureza escleroscópica (*shore hardness*) o del martillo Schmidt y c) ensayos de rayado, utilizados para determinar la dureza mineral.

Abrasión y dureza son a menudo confundidas o utilizadas indistintamente en la literatura referida a la «trabajabilidad» de las rocas (ASTM C241M, 2009; Golovanevskiy y Bearman, 2008, etc.). Así, en el sector de las rocas ornamentales, el término que se utiliza si una roca se corta mejor o peor es «dureza» de la roca, cuando en realidad se refieren a la «abrasividad» de la roca, puesto que se refieren a su resistencia al cortarla con flejes, hilo o disco diamantado. La abrasividad expresa una característica del comportamiento de la roca en lugar de una propiedad física fundamental como es la dureza. Indiscutiblemente, la abrasión depende de la dureza de la roca, pero no únicamente de esta. Plinninger *et al.* (2002) afirman que el fenómeno producido en el desgaste por abra-

sión es función de la diferencia de dureza entre los cuerpos que interactúan, en este caso, la roca y una herramienta de corte metálica.

Abrasión: métodos de medida

Dado el numeroso grupo de métodos de ensayo para evaluar la abrasividad, a continuación se hace una revisión de los más importantes y algunas correlaciones entre ellos y/o clasificaciones. Conviene destacar que actualmente los métodos más relevantes relacionados con la perforación y el corte de rocas, tanto por su grado de utilización a nivel mundial como por su aplicación son: a) el ensayo CERCHAR y el Índice de Schimazek, utilizados en ingeniería, y b) el método del disco de abrasión ancho para el caso de la piedra natural.

Ensayos de abrasión ISRM

Según la International Society for Rock Mechanics (ISRM), los ensayos para medir la abrasión de las rocas evalúan la resistencia de las rocas al desgaste y pueden medir también el desgaste de los componentes metálicos de equipos como, por ejemplo, las cuchillas de corte de las tuneladoras. ISRM (1978) recoge varios ensayos que clasifica en tres tipologías explicadas a continuación.

Desgaste por abrasión con ensayos de impacto: existen tres tipos que se explican a continuación.

Ensayo de abrasión Los Ángeles, utilizado en materiales granulares; actualmente es un ensayo habitual para áridos. Para su determinación (norma NLT-149) se introduce una cantidad de árido de granulometría determinada en un cilindro de acero junto con una serie de bolas de acero como abrasivo; se hace girar durante un número prefijado de vueltas, y se determina la diferencia de peso entre el inicial y el final de la muestra retenida en un tamiz de malla UNE 1.6.

Ensayo de «chorro de arena». La superficie de la muestra de ensayo se ataca con un chorro de arena de sílice u óxido de aluminio bajo unas condiciones específicas. El peso perdido o la profundidad de la abrasión es la medida de la resistencia a la abrasión

de la roca. Este método tiene su principal aplicación en materiales de construcción.

Ensayo *Burbank*. Diseñado para determinar la abrasividad relativa de una muestra de roca en las partes metálicas de los equipos de trituración usados en minería; el ensayo consiste en hacer girar una paleta metálica a 632 rpm dentro de un contenedor de rocas que gira a su vez a 74 rpm. Esto produce una alta velocidad de impacto y un desgaste rápido de la paleta de ensayo.

Desgaste por abrasión con ensayos de presión: existen tres tipos que se explican a continuación.

Ensayo Dorry, ASTM C-241-51 y ensayo Dorry modificado (British Standard BS-812). Utilizado para materiales granulares, actualmente en desuso en Europa, aunque sigue siendo un ensayo utilizado en algunos países, principalmente en Sudamérica.

Ensayo de desgaste del útil (*bit wear test*), utilizado para valorar la perforabilidad de una roca.

Índice de Abrasividad Cerchar, ya citado previamente.

Desgaste de abrasión por rozamiento: en estos ensayos, el desgaste se produce sin impacto, ni presión o acción de terceros elementos de alta dureza; un ejemplo es el ensayo Deval usado en materiales granulares.

Clasificación de Golovanevskiy y Bearman (2008) de los ensayos de abrasión

Golovanevskiy y Bearman (2008), dividen en tres categorías los métodos existentes para estimar la abrasividad de rocas y minerales:

Métodos indirectos: en estos métodos la abrasividad se evalúa a través de fórmulas que combinan dureza, resistencia a la compresión y otras propiedades fundamentales de las rocas.

Atkinson *et al.* (1986) y Atkinson y Cassapi (1984), evaluaron la abrasividad de la roca a partir de pro-

piedades mecánicas normalizadas como el martillo Schmidt, dureza shore (*escleroscópica*) y Cerchar. Los resultados se complementan con valores de propiedades fundamentales de las rocas, como las resistencias a la compresión y a la tracción indirecta, dureza de la roca y tenacidad (que es una medida de la cohesión de los materiales, relacionada con su resistencia a romperse).

Otro ejemplo de método indirecto es la medida de la abrasividad de las rocas a través del valor dureza, entendido este como la resistencia al rayado de la roca, mediante ensayos de dureza, como el de Vickers, de cada mineral (Young y Millmann, 1964; Sánchez Delgado, 2003).

No obstante, estos métodos, según Nilsen *et al.* (2006), no tienen en cuenta otras propiedades importantes de las rocas como tamaño, distribución, forma y orientación de los granos, porosidad y microfisuración.

Métodos directos: la abrasividad se evalúa desde métodos de ensayo normalizados, en los que se produce contacto a través de un movimiento relativo entre la roca y una herramienta de desgaste, siempre bajo unas condiciones de ensayo controladas.

Valantin y Guillon (1971) y West (1989) desarrollaron un dispositivo para estimar la abrasividad de la roca a través de la medida de una huella dejada en la herramienta de desgaste después del rayado con una roca, bajo una carga, tiempo y distancia predefinidos.

Por otro lado, Büchi *et al.* (1995) desarrollaron un aparato de ensayo que determina la abrasividad de la roca para casos de desgaste con baja abrasión/impacto medio, midiendo la abrasividad de la roca a partir del desgaste de una paleta de acero estándar que gira en un eje con una muestra de material rocoso de granulometría determinada. Otros ejemplos de métodos directos que se describirán con detalle más adelante son: a) la medida de la resistencia a la abrasión mediante el Disco de Abrasión Ancho, b) el método Böhme y c) el método Amsler, ensayos normalizados para la piedra natural en Europa que se tratarán más adelante.

Enfoques holísticos: estos métodos evalúan la abrasividad a través de una combinación de propiedades fundamentales de las rocas y varios parámetros de procesos y condiciones ambientales.

Un ejemplo es el estudio completo que Bearman *et al.* (1991) realizaron en una trituradora de cono, incluyendo el consumo de energía, la distribución del tamaño de grano final, el desgaste de la parte cóncava, etc., teniendo en cuenta una serie de factores tales como las propiedades mecánicas de la roca, los cambios de los regímenes de desgaste, los efectos de la temperatura y la humedad, obteniendo como resultado un enfoque matemático que permite controlar la atenuación del desgaste.

Golovanevskiy y Bearman (2008) tras realizar esta revisión, opinan que los métodos indirectos tienen la ventaja de ser relativamente sencillos, y proporcionan resultados de manera más o menos simple, pero no tienen en cuenta las variables de los procesos para modos específicos de desgaste; por ello normalmente se usan combinados con métodos directos.

Por otro lado, los enfoques holísticos para la medida de la abrasividad de las rocas son específicos para determinados equipos o procesos y, por lo tanto, con valores limitados para otras aplicaciones. Los métodos directos utilizan unas condiciones estándar para determinar la abrasividad de las rocas en un modo específico de desgaste, ya sea con abrasión de impacto, o a presión baja o alta.

Ensayos normalizados para piedra natural en Europa para medir la resistencia a la abrasión.

La norma de ensayo UNE-EN 14157 para la «Determinación de la resistencia a la abrasión» de la piedra natural utilizada para pavimentos, propone tres métodos de ensayo (métodos directos según la clasificación de Golovanevskiy y Bearman, 2008), para los que se precisan equipos de desgaste diferentes, destacando el primero de ellos como método de referencia.

Método del disco de abrasión ancho (capón) (en adelante, DAA): consiste en colocar una muestra de

100x50x20 mm contra una rueda giratoria; el abrasivo cae entre la rueda y la superficie de la muestra y produce una huella a modo de ranura en su superficie, siendo la longitud de dicha huella la medida de la abrasividad.

Método de abrasión Böhme (en adelante, AB): se coloca una probeta cúbica de $71 \pm 1,5$ mm en una pista de ensayo anular de hierro fundido con una dureza determinada del equipo de desgaste (Fig. 2); sobre ella se extienden 20 g de un abrasivo estándar (corindón artificial) y se hace girar un disco de 750 mm de diámetro (plano y dispuesto horizontalmente), sometiendo a la probeta a una carga de 294 ± 3 N (mediante un brazo con un peso y un contrapeso). El ensayo se repite durante 16 ciclos, cada uno de 22 vueltas con una velocidad de 30 rpm para cada una de las probetas de ensayo. El desgaste por abrasión se calcula como la pérdida del volumen de la probeta:

$$\Delta V = \Delta m / \rho_b \quad (1),$$

siendo ΔV la pérdida de volumen después de 16 ciclos (mm^3), Δm la pérdida de masa tras 16 ciclos (g) y ρ_b la densidad aparente de la probeta (g/mm^3).

Método de ensayo de abrasión Amsler (en adelante AA): las probetas, con una base de 60 x 60 mm, se colocan sobre un disco horizontal de manera que están sometidas a una carga de 335 N, mientras giran sobre un eje vertical (disco Amsler) durante un recorrido de 200 m, mientras se deja caer un abrasivo estándar (arena de sílice de 0,2-0,6 mm) con goteo de agua. El desgaste por abrasión es la diferencia entre el espesor medio de cada probeta antes y después del ensayo, medido en milímetros.

Análisis comparativo de los métodos de ensayo según norma UNE: los tres tipos de ensayos reconocidos en la norma de ensayo EN 14157 para determinar la resistencia a la abrasión, se consideran «abrasión de tres cuerpos» o también denominada «abrasión de alto estrés», lo que implica que las partículas abrasivas se fracturan y rompen durante el proceso de desgaste (Hawk *et al.*, 1999, en Karaca *et al.*, 2012). De los tres métodos, el método del DAA es el más

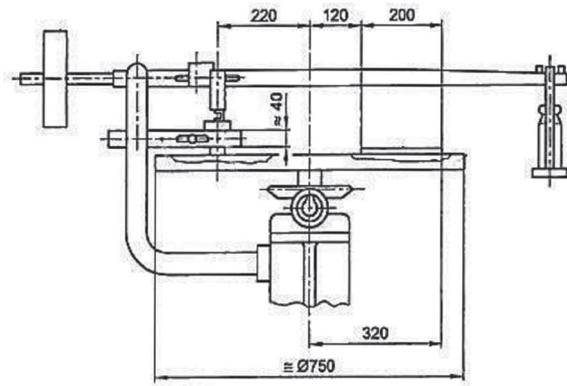


Figura 2. Esquema del equipo de abrasión Böhme. UNE-EN 14157.

reciente, fácil y práctico. El método Böhme era el más extendido, pero se tarda mucho más tiempo en la realización y evaluación de los resultados.

Karaca *et al.* (2012) además de estudiar las correlaciones entre los métodos normativos de abrasión según la norma EN 14157 (DAA y AB) y sus correlaciones con otras propiedades físico-mecánicas de las rocas (porosidad, compresión uniaxial y tracción), realizaron una evaluación de los métodos; encontraron que el método de referencia podría tener algunas desventajas frente al método AB, ya que no permite simular la posible dirección multidireccional del tráfico peatonal de un pavimento, dado que solo se hace una huella en la superficie de uso de la piedra; indican que no parece adecuado para rocas graníticas, con minerales de grano grueso, como los feldspatos potásicos y plagioclasas.

Marradi *et al.* 2008 correlacionaron los resultados del DAA con otros test normativos (ASTM y CNR) encontrando que es adecuado para clasificar la abrasividad de la piedra, ya que afirman que una de las consideraciones clave en la evaluación de la idoneidad de una piedra natural como pavimento (interior y exterior) es su resistencia a la abrasión.

La propia norma de ensayo DAA, cuya última revisión es del año 2004, en el Anexo A «informativo» expone una serie de correlaciones entre los distintos métodos con el método de referencia, aunque advirtiendo que están realizados con pocos datos y que deben ajustarse a medida que se disponga de más datos. De hecho, actualmente existen nuevos estu-

dios que han aportado nuevas correlaciones, que se comparan a continuación:

- Correlación lineal entre el método del Disco de Abrasión Ancho (DAA) y Abrasión Amsler (AA):

$$DAA = 15 + 5 (AA) \text{ (para el caso de rocas ígneas) (2).}$$

- Correlación lineal entre el método del Disco de Abrasión Ancho (DAA) y Abrasión Böhme (AB):

$$DAA = 15,3 + 1,7116 (AB) \quad (3),$$

siendo $R^2 = 0,84$; DDA [mm]; AB [mm^3] (norma UNE-EN 14157, 2004).

$$DDA = 9,15 + 0,45 (AB) \quad (4),$$

siendo $R^2 = 0,85$; DDA [mm]; AB [cm^3] (Çobanoğlu *et al.* 2010).

$$DDA = 14,8 + 2,9 \times 10^{-4} (AB) \quad (5),$$

siendo $R^2 \approx 0,85$; DDA [mm]; AB [mm^3] (Karaca *et al.*, 2012).

Como se puede observar, en el caso de las correlaciones obtenidas entre el método del disco de abrasión ancho y el método Böhme, existen grandes diferencias en las ecuaciones resultantes, aunque todas ellas con una fuerte correlación. La ecuación (3) se desconoce con qué materiales se realizaron los ensayos, y la propia norma advierte que se ha realizado con pocos datos. Çobanoğlu *et al.* (2010) recogen en su artículo que los autores de la norma han reconocido un error en la ecuación (3). La ecuación (4) está realizada solo tomando como referencia 21 rocas carbonatadas, por lo que se descarta su utilización para rocas graníticas. Y la ecuación (5) obtenida por Karaca *et al.* (2012), cuyos autores proponen que se corrija la ecuación de la norma de ensayo EN 14157, parece la más adecuada actualmente para su utilización; la ecuación procede del ensayo de 25 rocas de cinco tipologías diferentes, siendo cinco de ellas granitos.

Ensayos normalizados según la ASTM

La American Society for Testing and Materials

(ASTM) ha publicado varias normas que han dado lugar a varios tipos de ensayos para evaluar la abrasividad de las rocas; a continuación se describen con detalle estos ensayos.

Resistencia a la abrasión de la piedra natural sometida a tráfico peatonal (ASTM C241M, 2009): esta norma se aplica a la piedra natural que se utiliza en pavimentos y que es susceptible de desgaste por abrasión del tráfico peatonal. El equipo (Fig. 3) consiste en una base de 250 mm sobre los que se colocan 3 portamuestras con pesos superpuestos de 2 kg y que se hacen girar alrededor de ejes verticales a 45 rpm con un aporte de abrasivo (alúmina) durante 225 vueltas. Se ensayan 3 probetas de base cuadrada (200 mm de lado) y 50 mm de espesor. Se pesan las probetas antes y después del ensayo. Finalmente se calcula la densidad aparente de la muestra. La resistencia a la abrasión (H_a) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H_a = 10 G (2000 + W_s) / 2000 W_a \quad (6),$$

donde G es la densidad aparente, W_s es el peso inicial más peso final dividido por dos y W_a es la pérdida de peso durante la operación de desgaste.

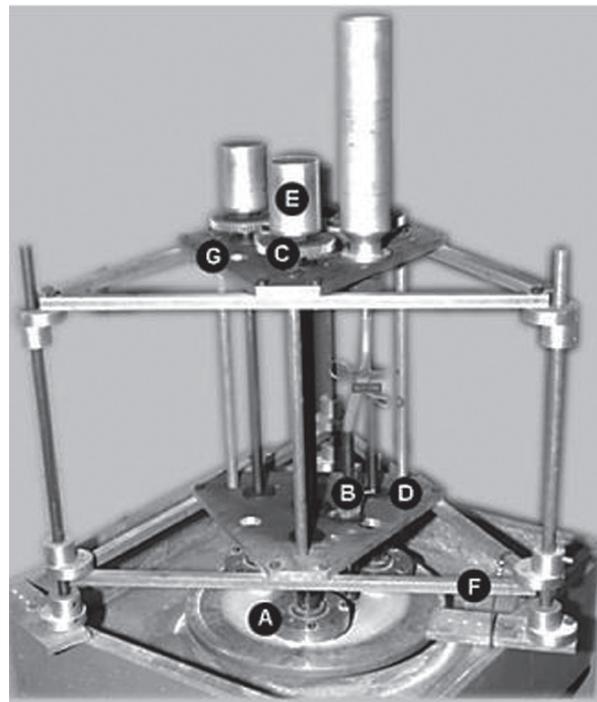


Figura 3. Equipo de ensayo según la norma ASTM C241.

Resistencia a la abrasión de la piedra natural sometida a tráfico peatonal (ASTM C1353, 2009): se usa una plataforma rotatoria, equipo de desgaste de doble cabezal. Se desgasta una probeta de base cuadrada de 100 mm de lado y espesor de 6,5 a 13 mm bajo unas condiciones controladas de presión y acción abrasiva. La probeta está montada en una plataforma de plato giratorio en un eje vertical con dos ruedas de abrasión, una de ellas frota la muestra hacia fuera, y la otra hacia el centro. Las marcas de abrasión resultantes forman un patrón de arcos cruzados sobre un área de 30 cm² aproximadamente. La resistencia a la abrasión es la pérdida de volumen, calculando un índice de resistencia a la abrasión (I_w) según la ecuación:

$$I_w = \frac{36.75}{w_o - w_f} \times \rho \times \frac{n}{1000} \quad (7),$$

siendo w_o el peso inicial de la probeta (g), w_f el peso de la probeta tras 1000 vueltas (g), ρ la densidad aparente (g/cm³) y n el número de revoluciones realizadas durante la prueba.

Determinación en laboratorio de la abrasividad de la roca usando el método CERCHAR (ASTM D7625-10), admitido por la ISRM en 2015: el índice de abrasividad CERCHAR (CAI) es utilizado principalmente para evaluar la abrasividad de las rocas en excavaciones mecánicas. Consiste en medir el desgaste de una punta de acero con una dureza Rockwell determinada y forma cónica, tras hacerla pasar lentamente con un ángulo de 90° y un peso de 7 kg sobre una superficie de 10 mm de la roca. El índice de abrasividad CERCHAR (CAI), es el diámetro del plano del desgaste de

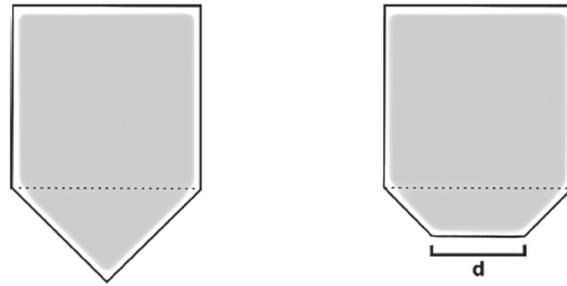


Figura 4. Esquema de la punta de acero antes y después del ensayo CERCHAR.

la punta producida por el rozamiento, expresado en décimas de milímetros, y está comprendido entre 0 y 6; en la figura 4 puede verse el desgaste producido por el ensayo. En la tabla 1 se muestra una clasificación de la abrasividad de las rocas en función de este índice.

El ensayo original se desarrolló en Francia en 1986 (norma NF P94-430-1). Después, algunos autores realizaron modificaciones o propuestas de estas, destacando West (1989), Al-Ameen y Waller (1993), y Ghasemi (2010).

El CAI se usa para predecir tipos de discos de corte en tuneladoras y rozadoras. No obstante, dada la simplicidad del ensayo, es utilizado para conocer la abrasividad de rocas de todo tipo (Käsling y Thuro, 2010), por eso el tipo de superficies ensayadas puede variar; el CAI resultante de medir superficies planas de roca (aserradas o apomazadas) es algo menor que el derivado del ensayo sobre superficies rugosas (como los planos de rotura naturales de las rocas, superficie de ensayo recomendada por la norma francesa).

	CAI	LAC	Ejemplos
No abrasiva	0,0-0,3	0-50	Material orgánico
No muy abrasiva	0,3-0,5	50-100	Lutita, marga
Ligeramente abrasiva	0,5-1,0	100-250	Pizarra, caliza
Abrasividad media	1,0-2,0	250-500	Esquistos, areniscas
Muy abrasiva	2,0-4,0	500-1250	Basalto, cuarzoarenita
Extremadamente abra.	4,0-6,0	1250-2000	Anfibolita, cuarcita

Tabla 1. Clasificación de la abrasividad de las rocas según índices de abrasividad CAI (dm) y LAC (g/t) (Käsling y Thuro, 2010).

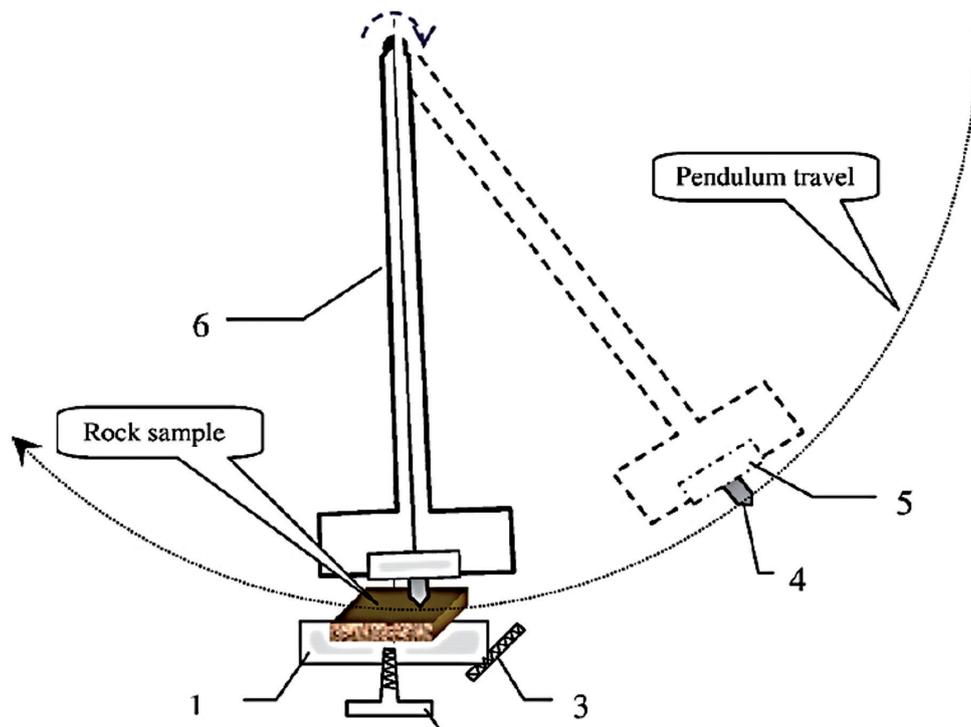


Figura 5. Esquema del ensayo propuesto por Golovanevskiy y Bearman (2008).

Otros métodos de determinación de la resistencia a la abrasión

Índice de abrasión por rasgado (índice de rasgado Gouging, Gi): Golovanevskiy y Bearman (2008), advirtieron que, en general, el desgaste producido en gran parte de los equipos utilizados normalmente en el procesamiento de rocas y minerales utilizados en minería como por ejemplo mandíbulas, trituradoras de impacto, discos de tuneladoras, herramientas de corte, etc. está sujeto a condiciones que no se reproducen con las técnicas disponibles, porque la magnitud de la presión, la velocidad y el ángulo de ataque son muy diferentes. Por ello, han desarrollado un equipo para medir la abrasión de las rocas bajo condiciones de presión y energía de impacto muy altas y que puede ser usado para predecir y valorar la vida útil de los componentes y eficiencia en el procesamiento de minerales y otros equipos. El equipo de medida consiste en un péndulo en cuyo extremo del brazo se coloca una punta cónica de acero de una dureza determinada. Abajo se fija firmemente la muestra a ensayar con la superficie plana. Las características del péndulo son tales, que se consigue una energía de impacto de 300 J a una velocidad de impacto de 5,2 m/s (Fig. 5). El

recorrido de la punta sobre la muestra de ensayo es de 78 mm.

El índice de abrasión «gouging» (G_i) se calcula de forma similar a la abrasividad de las rocas según el ensayo Cerchar (West, 1989), midiendo el desgaste del diámetro de la punta de ataque a la probeta, en milímetros y multiplicado por un factor de 10.

Ensayo de abrasión LCPC: este ensayo se encuentra descrito en la norma francesa P18-579 y se utiliza cada vez más en Europa. Se realiza con un abrasímetro (Fig. 6) que consta de un motor de 750 W que sujeta una cuchilla de acero de una dureza determinada (Rockwell B 60-75) que rota a 4500 rpm durante 5 minutos en un vaso cilíndrico; en él se colocan 500 g de muestra triturada (tamaño de grano: 4 - 6.3 mm), determinándose el índice de abrasividad mediante el cociente entre la pérdida de peso de la cuchilla de acero y el peso de la muestra.

Medida de la abrasividad (F_v) según la norma ON 44 1121 (Eslovaquia): según la descripción de Labas *et*

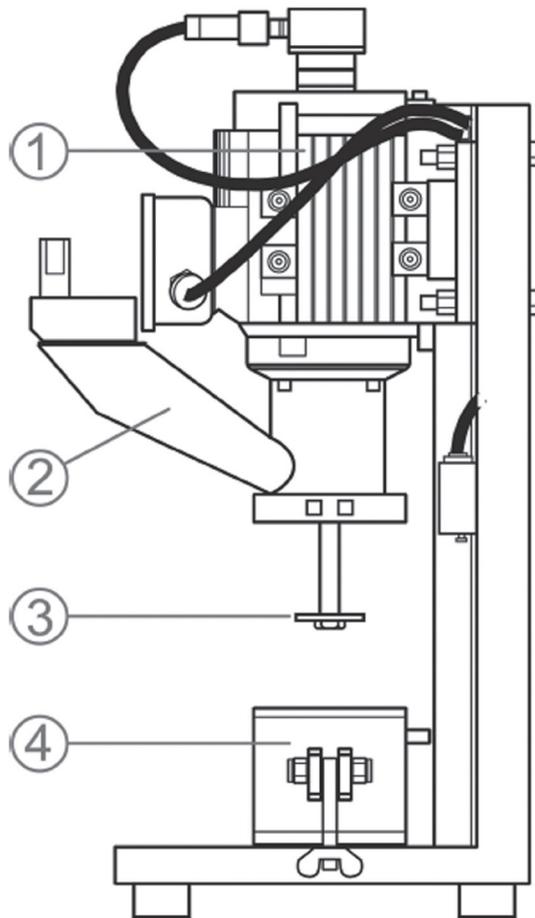


Figura 6. Esquema del abrasímetro según la norma P18-579-1990 (en Käsling y Thuro, 2010).



Figura 7. Aspecto de una granodiorita tras el ensayo ON 441121 (en Labas *et al.*, 2012).

al. (2012), este ensayo se basa en la determinación de la pérdida de peso de una punta normalizada metálica durante un movimiento circular sobre una superficie tratada de una muestra de ensayo bajo condiciones constantes (Fig. 7). El ensayo se realiza con un equipo que hace girar la probeta de ensayo (sección amolada de un testigo de roca de unos 59 mm de diámetro) 32 vueltas a una velocidad de 100 rpm mientras se presiona con una fuerza de 100 N una punta metálica fija de dureza y dimensiones determinadas (3 mm de diámetro, 222 mm de longitud y 210 HB). Las rocas se clasifican en tres grupos (Exner, 1988; en Labas *et al.*, 2012):

Fv < 1 Poco abrasivas; 1 < Fv < 3,5 Abrasividad media; Fv > 3,5 Muy abrasivas

Indentación de cono NCB: en este método, desarrollado por la «National Coal Board» en 1977 para determinar la dureza de las rocas objeto de excavación, se mide la resistencia a la indentación de una punta normalizada de carburo de tungsteno (profundidad de penetración del cono dentro de la roca por aplicación de una carga conocida). Existe una correlación de este ensayo con la resistencia a la compresión de la roca.

Medida de la abrasividad en función de índices calculados a partir de características petrográficas y/o propiedades físicas

Índice de Schimazek: el índice de abrasividad Schimazek tiene en cuenta, además de propiedades físicas, alguna característica petrográfica de la roca, en concreto el porcentaje y tamaño de grano del cuarzo. Desarrollado por Schimazek y Kantz (1970, 1976), posiblemente sea uno de los índices más utilizados; este índice (F) se calcula como:

$$F = (Q \cdot d_{50} \cdot S_T) / 100 \quad (8),$$

siendo F el índice de abrasividad (kp/cm), Q el contenido en cuarzo equivalente de minerales abrasivos (%), d_{50} el diámetro medio del cuarzo (cm) y S_T la resistencia a tracción indirecta (kp/cm²).

El porcentaje modal y tamaño del cuarzo y del resto de minerales se determinan al microscopio sobre

Clasificación abrasión	RAI
No abrasiva	<10
Ligeramente abrasiva	10-30
Abrasiva	30-60
Muy abrasiva	60-120
Extremadamente abrasiva	>120

Tabla 2. Clasificación de la abrasividad de las rocas según el índice RAI (Plinninger, 2010).

láminas delgadas. Inicialmente «Q» se refería solo al contenido en cuarzo, sin embargo, algunos autores utilizan también el contenido de minerales silicatados, como los feldespatos, con un coeficiente corrector en función de su dureza. Ewendt (1989) realizó una modificación de este índice, utilizando el contenido en cuarzo equivalente, el índice de carga puntual (I_{50}) y el tamaño de grano de cuarzo equivalente.

Índices de contenido mineral: en las determinaciones clásicas de la abrasividad, se tiene en cuenta el cuarzo como el mineral más importante en el desgaste, además de la dureza de otros minerales, priorizando la medida de los minerales considerados más duros de las rocas. Así en el trabajo IGME (1982) se admite que el porcentaje y tamaño del cuarzo proporcionan una medida conveniente de la abrasividad en una amplia gama de rocas, pero en otras es necesario añadir el grado de cementación para explicar las propiedades abrasivas de las rocas y predecir el desgaste de los instrumentos de corte. Los principales índices de contenido mineral son los siguientes. a) El «contenido de mineral abrasivo» (AMC), es la dureza media de la roca utilizando la escala de Mohs y teniendo en cuenta el porcentaje modal de cada mineral, normalmente determinado mediante microscopía óptica de polarización. b) El «contenido en cuarzo equivalente» (EQC) utiliza la escala de dureza de Rosiwal y se calcula microscópicamente, aunque en ocasiones en trabajos de ingeniería también se estima macroscópicamente (Ghasemi, 2010). c) La medida de la «dureza Vickers» para la roca, calculada utilizando el ensayo de dureza de indentación Vickers, muy utilizada en Escandinavia. d) El índice de abrasividad de la roca (RAI). Introducido por Plinninger en 2002, representa una modificación del contenido en cuarzo equivalente. Este índice tiene en cuenta el conte-

nido de mineral abrasivo y la resistencia de la roca, siendo el resultado de multiplicar la resistencia a la compresión de la roca por el EQC, según la siguiente ecuación:

$$RAI = \sum_{i=1}^n A_i \cdot S_i \cdot UCS \quad (9),$$

donde RAI es el índice de abrasividad de la roca, UCS es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca (MPa), A_i es el porcentaje modal de cada mineral i (%) y S_i es la dureza Rosiwal de cada mineral (referida al cuarzo=100).

Plinninger (2010) propone una clasificación con este índice (tabla 2), en la que los granitos se clasificarían como «abrasivos». También realiza una correlación con el índice Cerchar ($R^2= 0,48$) y otra con la vida útil de las brocas en perforaciones, y recomienda su uso especialmente en rocas duras.

Relación entre la abrasividad y las propiedades físicas y características petrográficas de las rocas

Es conocido que los minerales silíceos son más abrasivos que otros minerales, y en concreto el porcentaje de cuarzo y el contenido en otros minerales silicatados (tal como indica en alguno de los métodos descritos en el apartado anterior), es y ha sido un índice muy utilizado para comprobar la abrasividad de las rocas; en general, al aumentar el contenido en cuarzo aumenta el desgaste de las brocas de perforación (Ersoy y Waller, 1995), el desgaste del disco (Asche, 1999) o disminuye la velocidad de corte (Sánchez Delgado *et al.*, 2005). West (1989) propone el contenido en cuarzo como la principal influencia en el Índice de Abrasividad Cerchar (CAI).

Atkinson *et al.* (1986) indican que los factores que afectan a la abrasividad de las rocas son la composición mineral, dureza de los constituyentes minerales, forma y tamaño de grano, tipo de matriz y propiedades físicas de la roca como la resistencia, la dureza y la rugosidad.

No obstante, casi todos los autores están de acuerdo en que el mero porcentaje en cuarzo no es suficiente para explicar satisfactoriamente ni el desgaste de la hoja de corte durante el aserrado (Jennings and Wright, 1989), ni el desgaste de las brocas de perforación (Ersoy y Waller, 1995); de hecho, estos últimos indican cómo, por ejemplo, las dioritas, que no tienen cuarzo, desgastan rápidamente las brocas de perforación.

El tamaño de grano es otro de los parámetros texturales más estudiado; se ha comprobado que, al aumentar, aumenta también la abrasividad (Birle y Ratterman, 1986; Howarth y Rowlands, 1987; Ersoy y Waller, 1995; Clausen *et al.*, 1996; Åkesson *et al.*, 2001; etc.), aunque algunos autores únicamente tienen en cuenta la influencia del tamaño de grano del cuarzo (Asche, 1999; Wei *et al.*, 2003). Asche (1999) afirma que el efecto del aumento del tamaño de grano del cuarzo es la causa de un mayor desgaste del ligante del disco de corte y, por ello, una mayor abrasividad.

Yilmaz *et al.* (2011) en un estudio con nueve tipos de granitos, encuentran una muy buena correlación entre el tamaño de grano del cuarzo y del feldespato potásico con el SWR (tasa de rendimiento del desgaste del disco durante el corte), pero no con el tamaño de grano de la plagioclasa, cuando ambos feldespatos (potásicos y plagioclasas) tienen una dureza Mohs muy similar; la falta de correlación de la plagioclasa la interpretan como debida a diferentes características texturales de ambos minerales: la mayor facilidad de mecanización de las plagioclasas sería debida a la abundancia de macas polisintéticas, lo que produce mayores planos de debilidad, mientras que en el caso de los feldespatos potásicos, la presencia de textura peritítica los hace relativamente más difíciles de mecanizar.

La forma de los granos también es un factor influyente, de manera que a mayor angulosidad y/o elongación de los cristales, menor velocidad de perforación

y mayor desgaste de las herramientas (Ersoy y Waller, 1995).

Perfetti *et al.* (1993) reconocen la influencia de las microfisuras, de manera que contribuyen a debilitar la estructura y facilitar las operaciones de corte y perforación. Tanto los poros como las microfisuras contribuyen a reducir la unión textural de la roca, modificando sus características elásticas y, por tanto, modificando los campos de esfuerzos creados durante las operaciones de mecanizado de las rocas. La zona de trituración y las fisuras laterales producidas durante el corte o perforación interactuarán con las fisuras o espacios vacíos de la roca, facilitando el arranque de las partículas.

Schormair *et al.* (2006) estudiaron la influencia de la anisotropía en la perforación de rocas duras, encontrando un patrón diferente de propagación de las fisuras que se forman en la cabeza de la perforación de las rocas isótropas, donde no resultan visibles las fisuras macroscópicas, y las microfisuras que se forman paralelas a la superficie; en este caso, todos los minerales podían ser divididos por fisuras que no seguían la exfoliación mineral y apenas se formaron fisuras a lo largo de los bordes de grano. Sin embargo, en el caso de rocas anisótropas, se forman fisuras, visibles a simple vista, que siguen la dirección de la foliación cuando la broca de perforación ataca perpendicular o paralelamente a dicha foliación; cuando es oblicua, estas fisuras se forman en la dirección del avance de la broca. En general, la mayoría de las microfisuras aprovechan la foliación de la roca, y raramente atraviesan cristales de cuarzo o feldespatos.

En otro de los trabajos analizados, Åkesson *et al.* (2003) estudiaron sobre una muestra de 12 granitos la relación entre la abrasividad medida con el desgaste de los Ángeles (LA) y un índice de foliación (FIX) que definieron como:

$$\text{FIX} = \sum (P_{\perp}) - \sum (P_{\parallel}) \quad (10),$$

donde $\sum (P_{\perp})$ y $\sum (P_{\parallel})$ son la suma del número de bordes de grano paralelos y perpendiculares medidos a partir de líneas transversales a imágenes tomadas con SEM. Un valor de $\text{FIX} = 1$ correspondería a una roca isótropa, aumentando para mayores valores de anisotropía; en el trabajo se concluye que el conte-

nido en mica en sí mismo no tiene una influencia directa sobre la resistencia a la fragmentación, pero si las micas definen un plano de foliación, pueden interactuar causando la propagación de fracturas, es decir, resultando un efecto negativo sobre la resistencia a la fragmentación; estos resultados coinciden con un estudio posterior de Schormair *et al.* (2006) donde obtienen que la existencia de planos de foliación facilita la apertura de microfisuras por ellos.

Varios autores han calculado un coeficiente textural, relacionándolo con la perforabilidad, cortabilidad o directamente con índices de medida de la abrasividad de las rocas (Howarth y Rowlands, 1987; Atai *et al.*, 2012; Mikaeil *et al.*, 2013; Ozturk y Nasuf, 2013), mostrando correlaciones entre el coeficiente textural y propiedades mecánicas, perforabilidad y excavabilidad. Ozturk y Nasuf (2013) calcularon el coeficiente textural descrito por Howarth y Rowlands (1987), que considera el tamaño, perímetro, longitud, anchura y orientación de los granos, encontrando una relación directa con la resistencia a la compresión de la roca, de manera que al aumentar el coeficiente textural aumenta también la resistencia de la roca ($r^2=0,79$). La mayoría de los trabajos citados, utilizan el coeficiente textural para realizar una clasificación de la cortabilidad de las rocas basándose en matemática difusa, junto con otros parámetros como resistencia a la compresión, índice de Schimazek, contenido equivalente de cuarzo y módulo de Young.

Karaca *et al.* (2012) obtienen una buena correlación entre la abrasividad de la roca medida por el disco de abrasión ancho y el método Böhme y la porosidad abierta cuando esta es superior al 1%; dicha relación no se cumple para las rocas de menor porosidad, en el sentido de que parece que la resistencia a la abrasión decrece con el aumento de la porosidad, por lo que consideran que además, en las rocas de muy baja porosidad tiene que haber otros factores que influyen en la resistencia a la abrasión. También Alber (2008), en un estudio sobre la influencia de la presión en el índice de abrasividad Cerchar (CAI) y su efecto en el desgaste de las herramientas de corte seleccionadas, encontró una dependencia muy alta entre el CAI y la porosidad ($R^2=0,92$), de manera que el CAI es alto cuando la porosidad de la roca es baja y viceversa.

Por lo que se refiere a la relación de la abrasividad con la dureza de la roca (entendida como integración de la dureza de sus componentes minerales), la ISRM (1978) afirma que dureza y abrasividad de las rocas dependen del tipo y cantidad de sus constituyentes minerales y el grado de unión entre ellos. Aunque es muy frecuente encontrar en la bibliografía el cálculo de la dureza de la roca a partir de la dureza Mohs y el porcentaje modal de sus minerales constituyentes (dureza teórica), Sánchez Delgado (2003) encuentra que la dureza de la roca calculada a partir de la dureza Vickers de cada mineral y su porcentaje modal es mucho más importante que la dureza teórica; en ese trabajo se estudia la relación entre la velocidad de corte del granito Rosa Porriño y la dureza de la roca así calculada, obteniendo un coeficiente de determinación de ($R^2=0,71$), de manera que un ligero incremento de la dureza de la roca implica una significativa disminución de la velocidad de corte.

Xie y Tamaki (2007) encontraron una correlación inversa entre los parámetros de microdureza y la eficiencia del mecanizado abrasivo, medido con experimentos de corte, perforación y excavación con diez clases de granito. Plinninger *et al.* (2002) establecen una clasificación de abrasividad para los materiales de perforación en función de la dureza Mohs, de manera que los minerales con dureza Mohs menor de 5,5, resultan no abrasivos para el material de perforación, los minerales con dureza Mohs entre 5,5 y 9, provocan desgaste abrasivo en la matriz de acero de la boca de perforación, pero no significativamente en los botones de metal duro y los minerales con dureza Mohs superior a 9, producen un desgaste abrasivo muy elevado tanto sobre la matriz como sobre el metal duro, pudiendo provocar el colapso de la broca. Osburn (1969) ya había establecido un concepto aplicado a perforación del ratio «dureza roca/dureza metal» y fijó que los elementos de perforación debían mantener una diferencia de un 20% como mínimo para obtener un rendimiento aceptable y una durabilidad máxima. Esta relación entre el desgaste abrasivo y el ratio de durezas se estudió en diversas experiencias de laboratorio: Deketh (1995) y Verhoef (1997) determinaron que con valores bajos del ratio «dureza roca/dureza metal» el desgaste por abrasión se mantiene bajo, casi constante para valores entre 0,4 y 0,7, sufre un aumento espectacular entre 0,7 y 1,1 y por encima de estos valores se

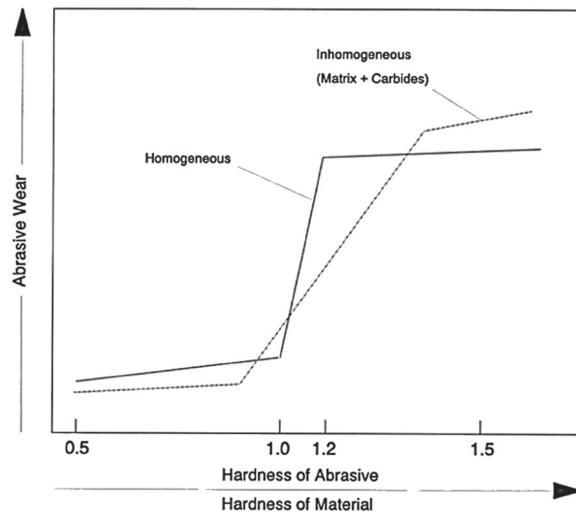


Figura 8. Relación entre dureza del material y desgaste por abrasión (Deketh, 1995; en Gashemi, 2010).

tiene en un nivel de abrasividad tan elevado que el desgaste del elemento de corte lo hace inservible en poco tiempo (Fig. 8). Deketh (1995, en Gashemi, 2010) concluye que cuando la relación de la abrasividad de dos materiales que interactúan excede del 20% de su dureza Vickers, el desgaste abrasivo se incrementa drásticamente. Labas *et al.* (2012) afirman que la resistencia a la indentación Vickers muestra una buena correlación con la velocidad de corte.

Karaca *et al.* (2012) estudiaron las correlaciones entre los métodos normativos de abrasión según la norma EN 14157 (DAA y AB) y sus correlaciones con otras propiedades físico-mecánicas de las rocas (porosidad, compresión uniaxial y tracción), afirmando que la resistencia a la compresión uniaxial es un buen indicador de la resistencia a la abrasión (Fig. 9), pudiendo realizarse una estimación preliminar de la abrasión según la ecuación:

$$\text{DAA} = -0,059 R_c + 24,478 \quad (11),$$

donde DAA es la resistencia a la abrasión según el método del disco de abrasión ancho y R_c la resistencia a la compresión uniaxial, mientras que la relación con la resistencia a la tracción era mucho menor.

Podra y Andersson (1999, en Karaca *et al.*, 2012) advierten que la resistencia a la abrasión decrece cuando disminuye la resistencia a la compresión, siendo

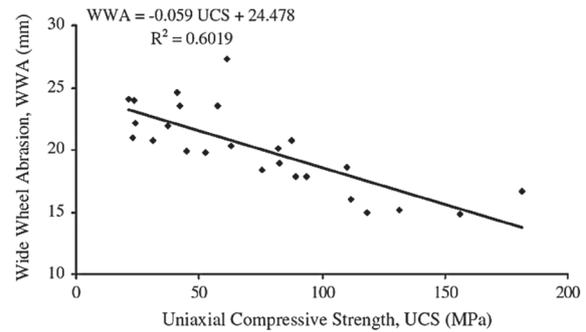


Figura 9. Relación entre la resistencia a compresión y resistencia a la abrasión según el método del disco de abrasión ancho (DAA) (Karaca *et al.* 2012).

consistente con la «ley de desgaste de Archard», en la que el volumen de desgaste perdido es inversamente proporcional a la dureza del material desgastado:

$$V = k.S.F_N.H^{-1} \quad (12),$$

donde V es el volumen perdido por desgaste, K es el coeficiente de desgaste, S es la distancia de deslizamiento, F_N es la carga normal y H es la dureza de material desgastado.

Yarali y Soyer (2013) estudiaron las relaciones entre el índice tasa de perforación (DRI, obtenido a partir del ensayo de fragmentación y el índice Sievers'J), y algunas propiedades mecánicas de 32 rocas; obtuvieron una alta correlación con la resistencia a la compresión ($R^2=0,71$), el índice de resistencia de carga puntual ($R^2=0,71$) y la dureza medida con el martillo Schmidt ($R^2=0,78$), mientras que la relación más baja la encontraron con la resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño), con un coeficiente de determinación de $R^2=0,55$ (corroborando los resultados de Karaca *et al.*, 2012).

Yilmaz *et al.* (2011) en un estudio con 9 tipos de granito, encuentran una buena correlación entre la tasa de rendimiento del desgaste en el corte con disco y el tamaño de grano del cuarzo ($R^2=0,80$) y de los feldespatos potásicos ($R^2=0,77$), mientras que no encontraron correlaciones significativas con el tamaño de grano de las plagioclasas, resistencias a la compresión y tracción, dureza escleroscópica, velocidad de ondas P, porosidad abierta y absorción de agua.

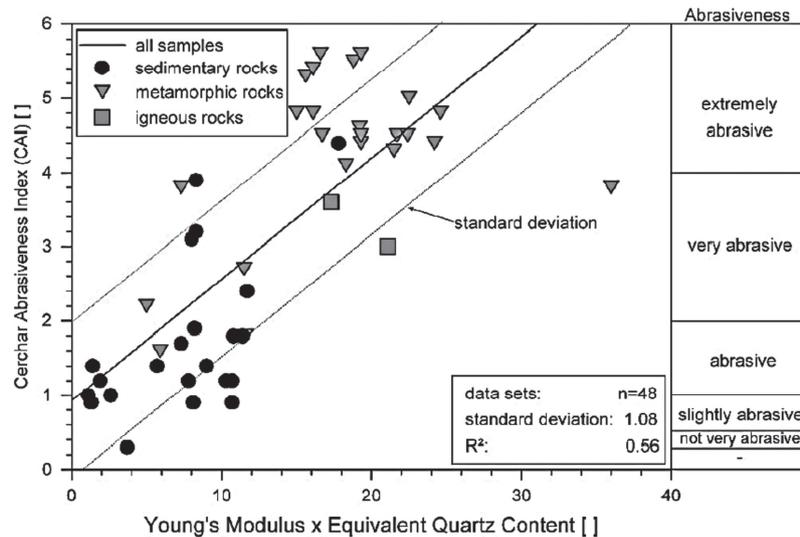


Figura 10. Correlación entre el Índice de abrasividad Cerchar (CAI) y el producto del módulo de Young y el «contenido equivalente de cuarzo» (Plinninger *et al.* 2003).

Yavuz *et al.* (2008) estudiaron la relación entre la abrasividad Böhme y propiedades físico-mecánicas de rocas carbonatadas, obteniendo correlaciones altas entre la resistencia a la abrasión y las resistencias a la tracción y a la compresión uniaxial, dureza del rebote del martillo Schmidt y densidad aparente.

De las propiedades dinámicas de las rocas, únicamente se han encontrado estudios que relacionan el módulo de Young con la abrasividad de las rocas (Howarth y Rowlands, 1986; Ersoy y Waller, 1995; Thuro y Spaun, 1996; Kahraman, 1999; Kahraman *et al.*, 2000; Plinninger *et al.*, 2003 y Hoseinie *et al.*, 2009). En concreto, Plinninger *et al.* (2003) en un trabajo con 109 rocas diferentes, afirman que el «contenido equivalente de cuarzo» por sí solo no es adecuado para interpretar los valores de abrasividad CERCHAR y concluyen que de todos los parámetros de la roca estudiados (resistencias a compresión y tracción, densidad, tamaño de grano, etc.) el más significativo era el resultado del producto del módulo de Young y el «contenido de cuarzo equivalente», proponiendo a partir de esta relación una clasificación de la abrasividad de las rocas (Fig. 10).

Ataei *et al.* (2012) y Mikaeil *et al.* (2013), a partir del estudio de 7 rocas carbonatadas, proponen una clasificación de las mismas en función de su cortabilidad utilizando matemática difusa; las propiedades determinadas fueron la resistencia a la compresión,

un índice Schimazek modificado, la dureza Mohs y el módulo de Young, encontrando un mayor grado de significación con los dos primeros; como medida de la cortabilidad utilizaron el consumo de energía durante el corte; la correlación entre sus valores de clasificación y la tasa de producción por hora durante el corte tiene un coeficiente de determinación de 0,93.

Ozturk y Nasuf (2013) proponen, a partir del estudio de 34 rocas de distintas tipologías, un modelo basado en matemática difusa para predecir la resistencia del material a partir del coeficiente textural (τ_c) y de otras propiedades mecánicas y físicas, así como la perforabilidad y excavabilidad.

Resumiendo, se constata que existen numerosas clasificaciones y métodos de medida, así como múltiples correlaciones que establecen, aunque solo de forma parcial, la relación entre la abrasividad y las propiedades físicas y características petrográficas de las rocas.

Conclusiones

A pesar de la evidente importancia de la abrasividad de las rocas en diversos campos aplicados de la geología, se está lejos de la adopción de una norma universalmente aceptada para su determinación. Existe

una diferencia fundamental de criterio entre los diversos métodos aquí expuestos; por una parte, los que de manera general miden la abrasividad en función del desgaste del útil; de entre ellos, el más utilizado actualmente es el ensayo Cerchar, inicialmente definido para su utilización sobre rocas carbonatas y que actualmente se utiliza de manera generalizada para cualquier tipo de rocas; por otro lado están los métodos en los que la abrasividad se determina a partir del desgaste producido en las rocas por un elemento abrasivo, de los cuales el más usado es el que recomienda la norma UNE-EN 14157, en el que se determina la abrasividad de la roca a partir de la medida de la huella producida; por último existe otro grupo de métodos en el que se considera la medida de alguna propiedad física de las rocas y algunas de sus características petrográficas; en este caso el método más frecuente es la determinación del índice de Schimazek que considera la resistencia a la tracción, el porcentaje y tamaño de grano del cuarzo (o bien del «cuarzo equivalente» en el que se añaden, de manera ponderada, el resto de minerales silicatados de la roca). Como se ha comentado anteriormente, no existe un criterio universal sobre qué características petrográficas o propiedades físicas son más o menos influyentes en la abrasividad de las rocas, incluso es relativamente frecuente que donde unos autores encuentran unas correlaciones altas, otros no encuentran una correlación satisfactoria.

Se pone de relieve que es imprescindible la realización de estudios petrográficos y ensayos específicos cuando se realizan trabajos en materiales rocosos en los que están implicados procesos de perforación y/o excavación.

Por otra parte, se espera que esta revisión de los métodos de evaluación de la abrasividad de las rocas sirva para simplificar la elección del método más adecuado a cada caso, indicando las limitaciones y/o ventajas de cada uno, y en función de la posibilidad de acceso a los equipos necesarios,

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y competitividad por su subvención al proyecto MINECO-13-CGL12-33588

y a la Consejería de Empleo, Industria y Turismo del Gobierno del Principado de Asturias y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER por su subvención al proyecto FC-15-GRUPIN14-044.

Bibliografía

ÅKESSON, U., GÖRANSSON M., LINDQVIST, J. E. y STIGH, J. (2001): Relationship between texture and mechanical properties of granite, central Sweden, by use of image-analysing techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60: 277-284.

ÅKESSON, U., STIGH, J., LINDQVIST, J. E. y GÖRANSSON, M. (2003): The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. *Engineering Geology*, 68: 275-288.

AL-AMEEN S. I. y M. D. WALLER (1993): The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. *Engineering Geology*, 36: 293-301.

ALBER, M. (2008): Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23: 351-359.

ASCHE, J. (1999): Deep grinding, a new dimension in cutting granite. *Industrial Diamond Review*, 2: 110-22.

ASTM C-241-51 (1976): *Test Method for Abrasion Resistance of Stone Subject to Floor Traffic*. ASTM International.

ASTM C1353 (2009): *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Dimension Stone Subjected to Foot Traffic Using a Rotary Platform Abraser*. ASTM International.

ASTM D7625-10 (2009): *Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method*. Book of standards 04.09.

ASTM C241M (2009): *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Stone Subjected to Foot Traffic*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ATAEI, M., MIKAEIL, R., HOSEINIE, S. H. y HOSSEINI, S. M. (2012): Fuzzy analytical hierarchy process approach for ranking the sawability of carbonate rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 50: 83-93.
- ATKINSON, T. y CASSAPI, V. B. (1984): The prediction and Reduction of Abrasive Wear in Mine Excavation Machinery. Int. Nat. Conf. on Tribology in Mineral Extraction. War on Wear. Institute of Mechanical Engineering.
- ATKINSON, T., CASSAPI, V. B. y SINGH R. N. (1986): Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 4(2): 151-163.
- BEARMAN, R. A., BARLEY, R. W. y HITCHOCK, A. (1991): Prediction of power consumption and product size in cone crushing. *Minerals engineering*, 4(12): 1243-1256.
- BIRLE, J. D. y RATTERMAN, E. (1986): *Resumen sobre la capacidad de corte de la roca dura basado en pruebas de laboratorio*. General Electric (Publicación traducida de Dimensional Stone Magazine).
- BÜCHI, E., MATHIER, J. F. y WYSS, Ch. (1995): Rock abrasivity—a significant cost factor for mechanical tunnelling in loose and hard rock. *Tunnel*, 5 (95): 38-44.
- BRITISH STANDARDS, BS 812: Part 2: (1974): Method for sampling and testing of mineral aggregates, sand and fillers. *British Standards Institution*.
- CLAUSEN, R., WANG, C. Y. y MEDING, M. (1996): Characteristics of acoustic emission during single diamond scratching of granite. *Industrial Diamond Review*, 3: 96-99.
- ÇOBANOĞLU, I., ÇELİK, S. B. y ALKAYA, D. (2010): Correlation between “wide wheel abrasion (capon)” and “Bohme abrasion” test results for some carbonate rocks. *Scientific Research and Essays*, 5(22): 3398-3404.
- DEKETH, H. J. R. (1995): Wear of rock cutting tools, laboratory experiments on the abrasivity of rock. *Delft University of Technology*.
- ERSOY, A. y WALLER, M. D. (1995): Wear characteristics of PDC pin and hybrid core bits in rock drilling. *Wear*, 188: 150-165.
- EWENDT, G. (1989): Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, 33.
- EXNER, K. (1988): Ražení dulních děl II. Kontinuální technologie ražení a hloubení. VŠB Ostrava, Fakulta hornickogeologická, 99.
- GHADEMI, A. (2010): *Study of Cerchar Abrasivity Index and potential modifications for more consistent measurement of rock abrasion*. PhD Thesis, Pennsylvania State University, 77 p.
- GOLOVANEVSKIY, V. A. y BEARMAN, R. A. (2008): Gouging abrasion test for rock abrasiveness testing. *International Journal of Mineral Processing*, 85: 111-120.
- HAWK, J. A., WILSON, R. D., TYLCZAK, J. H., y DOĞAN, Ö. N. (1999): Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, 225: 1031-1042.
- Hoseinie, S. H., Ataei, M., y Osanloo, M. (2009): A new classification system for evaluating rock penetrability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8): 1329-1340.
- HOWARTH, D. F. y ROWLANDS J. C. (1986): Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*, 9: 169-179.
- HOWARTH, D. F. y ROWLANDS, J. C. (1987): Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 20: 57-85.
- IGME (ed.) (1982): Propiedades de las rocas del Carbonífero asturiano-leonés en relación con el arranque mediante picas. *Ministerio de Industria y Energía*, 292 p.
- ISRM (1978): Suggested Methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. *International*

Journal Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, 15: 89-97.

JENNINGS, M. y WRIGHT, D. (1989): Guidelines for sawing stone. *Industrial Diamond Review*. 89(2): 70-75.

KAHRAMAN, S. (1999): Rotatory and percussive drilling prediction using regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 36: 981-989.

KAHRAMAN, S., BALCI, C., YAZICI, S. y BILGIN, N. (2000): Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drilling using a new drillability index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37: 729-743.

KARACA, Z., GÜNES, N. y GOKTAN, R. M. (2012): Considerations on the European Standard EN14157 Test Methods: Abrasion resistance of natural stones used for flooring in Buildings. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 45: 103-111.

KÄSLING, H. y THURO, K. (2010): Determining rock abrasivity in the laboratory. *Engineering Geol.* Technische Universität München (Germany), 4 p.

LABAS, M., KREPELKA, F y IVANIČOVÁ, L. (2012): Assessment of abrasiveness for research of rock cutting. *Acta Montanistica Slovaca*, 17(1): 65-73.

MARINI, P, BELLOPEDE, R., PERINO, L. y DE REGIBUS, C. (2011): Optimization of an abrasion resistance test method on natural stones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70: 133-138.

MARRADI, A., SECCHIARI, L. y LEZZERINI, M. (2008): The qualification of materials or their application in road stone pavements. Proceedings of the second international congress on dimension stones, Carrara (Italy): 225-235.

MAYORAL FERNÁNDEZ, R. (2014): *Optimización técnico-económica de barrenos en terrenos homogéneos. Búsqueda de leyes de desgaste para bocas de perforación.* Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 336 p.

MIKAEIL, R., OZCELIK, Y., YOUSEFI, R., ATAEI M. y HOSSEINI S.M. (2013): Ranking the sawability

of ornamental Stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58: 118-126.

NILSEN, B., DAHL, F. E., HOLZHAUSER, J., y RALEIGH, P. (2006): Abrasivity of soils in TBM tunnelling. *Tunnels & Tunnelling International*.

NORMALISATION FRANÇAISE P18-579. (1990): *Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité.* AFNOR (Association française de normalisation), Paris (France).

NORMALISATION FRANÇAISE P94-430-1. (2000): *Détermination du pouvoir abrasif d'une roche—Partie, 1*, 94-430. AFNOR (Association française de normalisation), Paris (France).

ON 44 1121, Oborová norma (1982): Pevné horniny. Stanovení abrazivnosti. Federální min. paliv a energ. Praha, VVUÚ Ostrava-Radvanice.

OSBURN, H. J. (1969): Wear of rock-cutting tools. *Powder metallurgy*, 12(24): 471-502.

OZTURK C. A., Nasuf, E. (2013): Strength classification of rock material based on textural properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37: 45-54.

PERFETTI, F., MANNELLA, P. y GIANNINI, P. (1993): La técnica del aserrado de granito con granalla (II). *Roc Máquina*, p. 72-75.

PLINNINGER, R. (2010): Hardrock abrasivity investigation using the Rock Abrasivity Index (RAI). 11th IAEG Congress, Auckland (New Zealand), vol. 1: Geologically Active. Taylor & Francis Group, London (UK).

PLINNINGER, R., KÄSLING, H., THURO, K. y SPAUN G. (2003): Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40: 259-263.

PLINNINGER, R., SPAUN, G. y THURO, K. (2002): Predicting tool wear in drill and blast. *Tunnels and Tunnelling International Magazine*. 5 p.

- PODRA, P. y ANDERSSON, S. (1999): Simulating sliding wear with finite element method. *Tribol International*, 32: 71-78.
- SÁNCHEZ DELGADO, N. (2003): *Influencia de las características petrográficas en la cortabilidad de los granitos con útiles diamantados*. Seminario de investigación, Universidad de Oviedo, 47 p.
- SÁNCHEZ DELGADO, N., RODRÍGUEZ-REY, A., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., DÍEZ SARRIÁ, I., CALLEJA, L. y RUÍZ DE ARGANDOÑA V. G. (2005): The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42: 161-166.
- SCHIMAZEK, J. y KNATZ, H. (1970): Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. *Glückauf*, 106: 274-278.
- SCHIMAZEK, J. y KNATZ, H. (1976): Die beurteilung der bearbeitbarkeit von gesteinen durch schneid- und rollenbohrwerkzeuge. *Erzmetall*, 29(3): 113-119.
- SCHORMAIR, N. KROSCH, THURO. K. y PLINNINGER, R. (2006): The influence of anisotropy on hard rock drilling and cutting. *IAEG Paper n. 491*, Nottingham (UK), 11 p.
- THURO, K. y SPAUN, G. (1996): Drillability in hard rock drill and blast tunneling. *Felsbau*, 14(2): 1-11.
- UNE-EN 14157 (2005): Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la abrasión. AENOR.
- VALANTIN, A. y GUILLON, P. (1971): Determination de la nocivité des roches vis-à-vis des pics. Tests de dureté et d'abrasivité. *Reference AMO-PGu. ES-71-73-37/1*. Verneuil-en-Halette (CERCHAR, unpublished note).
- VERHOEF, P. N. W. (1997): *Wear of rock cutting tools: implications for the site investigation of rock dredging projects*. TU Delft, Delft University of Technology.
- WEI, X., WANG, C. Y. y ZHOU Z. H. (2003): Study on the fuzzy ranking of granite sawability. *Journal of Materials Processing Technology*, 139: 277-280.
- WEST, G. (1989): Rock abrasiveness testing for tunnelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(2): 151-160.
- XIE, J. y TAMAKI, J. (2007): Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 186: 253-258.
- YARALI O. y SOYER E. (2013): Assessment of relationships between drilling rate index and mechanical properties of rocks. *Tunneling and Underground Space Technology*, 33: 46-53.
- YAVUZ, H., UGUR, I. y DEMIRDAG, S. (2008): Abrasion resistance of carbonate rocks used in dimension stone industry and correlations between abrasion and rock properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45: 260-267.
- YILMAZ, N. G., GOKTAN, R. M. y KIBICI, Y. (2011): An investigation of the petrographic and physico-mechanical properties of true granites influencing diamond tool wear performance, and development of a new wear index. *Wear*, 271: 960-969.
- YOUNG, B. B., y MILLMAN, A. P. (1964): Microhardness and deformation characteristics of ore minerals. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 73: 437-466.

