



Estudio de la abrasividad de las rocas y su incidencia en la perforación y consumo de brocas y cortadores. Caso colombiano

Study of the abrasiveness of rocks and its impact on drilling and consumption of bits and cutters. Colombian case

Álvaro Correa Arroyave ^a; Jorge Eric Rueda Fonseca ^b

^a Ingeniero de Minas y Metalurgia, Doctor-Ingeniero en Mecánica de Rocas, Université de Grenoble I, Francia, Profesor Universidad Santo Tomás, Maestría en Infraestructura Vial, Bogotá, Colombia,

^b Geólogo, Especialista en Técnicas de Voladura a cielo abierto y subterráneo, Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá, Colombia

Correspondencia: alvarocorrea@usantotomas.edu.co; Jorge.eric.rueda.fonseca@gmail.com

Recibido: Abril, 2022. Aceptado: Junio, 2022. Publicado: Julio, 2022

Resumen

La abrasividad es una de las propiedades más importantes que influyen en el costo de procesos tales como la perforación, el arranque y la cominución. Esta característica depende en gran medida de la composición mineralógica, la textura, la estructura y la porosidad de las rocas, características que demandan, para su determinación, de un cuidadoso examen petrográfico, así como de la determinación de las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y a la tracción indirecta de las rocas. Otros ensayos más detallados demandan de la determinación del DRI, el CAI, el AVS, el CLI y el BWI, entre otros. En nuestro medio no es muy común que se adelanten estos estudios y cuando se realizan, solo aparecen aquellos que necesitan a lo sumo del estudio petrográfico acompañado de la determinación de las propiedades de resistencia del material intacto; no obstante, hoy día disponemos de laboratorios en donde se puede realizar la determinación del CAI y cuando hemos debido hacer estudios más detallados como la Dureza Tarkoy, por ejemplo, nos hemos visto en la necesidad de enviar las muestras al exterior. Con el fin de difundir esos métodos de ensayo, nos dimos a la tarea de depurar, organizar y realizar un tratamiento de datos a los resultados de un estudio que realizamos en el año 2004 al material explotado en una cantera localizada en el macizo rocoso del norte de Caldas, conformado por gneiss y esquistos wollastoníticos muy abrasivos y resistentes cuya explotación demandó un alto costo en perforación y voladura. El estudio llevado a cabo en 14 muestras del gneiss sometidas a pruebas para la determinación de las abrasividades AMC, VH, EQC, RAI, CAI, FSchim, LAC, HT, DRI, AVS, CLI y BWI así lo confirman, pues efectivamente el material resultó ser de una abrasividad entre alta y extremadamente alta, generando un consumo de brocas, manifestado en el BWI, muy alto, y un DRI y un CLI entre bajo y muy bajo.

Palabras clave: Abrasividad; Contenido Equivalente de Cuarzo; Índice Cerchar; Índice Schimazek; resistencia a la compresión; resistencia a la tracción.

Abstract

Abrasivity is one of the most important properties that influence the cost of processes such as drilling, blasting and comminution. This characteristic depends largely on the mineralogical composition, texture, structure and porosity of the rocks, characteristics that demand, for its determination, a careful petrographic examination, as well as the determination of the mechanical properties of compressive strength and indirect tensile strength of the rocks. But other more appropriate tests require the determination of the DRI, the CAI, the AVS and the CLI, among others. In our environment it is not very common to carry out these studies and when they are carried out, only those that require at most the petrographic study accompanied by the determination of the resistance properties of the intact material appear; however, today we have laboratories where the determination of the CAI can be carried out and when we have had to carry out more detailed studies such as the Tarkoy Hardness, for example, we have had to send the samples abroad. To disseminate these test methods, we undertook the task of refining, organizing and processing the results of a study we conducted in 2004 on the material exploited in a quarry located in the rock massif of northern Caldas, consisting of a Gneiss and a very abrasive and resistant Wollastonite Shale whose exploitation demanded a high cost in drilling and blasting. The study carried out on 14 Gneiss samples tested for AMC, VH, EQC, RAI, CAI, FSchim, LAC, HT, DRI, AVS, CLI and BWI abrasivities confirms this. Indeed, the material was found to have a high to extremely high abrasiveness, as well as a very high BWI, and a low to very low DRI and CLI.

Keywords: Abrasiveness; Quartz Equivalent Content; Cerchar Index; Schimazek Index; compressive strength and tensile strength.

1. Introducción

Una investigación que pretenda conocer directamente la abrasividad de las rocas y su propensión al desgaste de las herramientas que entran en contacto con ellas, debe llevarse a cabo mediante la realización de técnicas internacionalmente recomendadas que en su fundamento se soportan en un detenido análisis petrográfico el cual permite conocer en detalle la composición de la roca y otros parámetros de interés a nivel microscópico, [2] complementado con un riguroso estudio del comportamiento físico-mecánico de la roca intacta, que permitan conocer tanto el consumo de brocas en las perforadoras [3], como el consumo de los cortadores en las TBM [4].

Al respecto, conviene realizar, en la medida de lo posible, la determinación de los siguientes parámetros:

1. Contenido de Minerales Abrasivos, AMC
2. Dureza Vickers, VH
3. Contenido Equivalente de Cuarzo, EQC%
4. Índice de Abrasividad de la Roca, RAI
5. Índice de Abrasividad Cerchar, CAI
6. Índice de Abrasividad Schimazek, FSch
7. Coeficiente de Abrasividad del LCPC, LAC
8. Dureza Total, HT
9. Índice de la Tasa de Perforación, DRI
10. Valor de Abrasividad del Acero, AVS
11. Índice de Vida del Cortador, CLI
12. Índice de Desgaste de Brocas, BWI

A fin de determinar algunos de estos índices, debe conocerse igualmente la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la tracción brasilera del espécimen de ensayo.

En lo sucesivo desarrollaremos el estudio de la abrasividad realizado sobre 14 muestras de roca del macizo rocoso del norte de Caldas en el que se encuentra el Proyecto Hidroeléctrico Miel I, para lo cual, después de describir muy sucintamente la metodología de ensayo, pasamos a ilustrar sus resultados.

2. Descripción petrográfica de las rocas

2.1 Método recomendado por la ISRM para la descripción petrográfica de las rocas

La descripción petrográfica de las rocas para propósitos ingenieriles, mediante el análisis microscópico, incluye la determinación de todos los parámetros que no pueden obtenerse a partir de un examen macroscópico, tales como la composición mineralógica, el tamaño de grano y la textura, los cuales tienen incidencia sobre el comportamiento mecánico de la roca y de la masa rocosa. Una técnica común de examen microscópico emplea materiales transparentes, lo que implica el uso de secciones delgadas y luz refractada. [5]

Para asegurar la correcta clasificación de la roca, el primer paso es determinar su composición mineralógica y su textura y

microestructura (en el caso de rocas fuertemente anisotrópicas), la determinación del grado de alteración, el tamaño de grano, la microfisuración y la porosidad. La identificación de los minerales en una sección delgada puede llevarse a cabo solamente por un petrógrafo entrenado.

Existen técnicas y métodos bien establecidos para la identificación de los minerales, de tal manera que permiten clasificar la roca como ígnea, sedimentaria o metamórfica. Para propósitos de Mecánica de rocas práctica, deben utilizarse los nombres de las rocas internacionalmente reconocidos.

Durante el análisis de un espécimen, debe tenerse especial cuidado de examinar los defectos mecánicos, las microfisuras y las capas de material aparentemente menos resistente que puedan tener una influencia singular sobre el comportamiento ingenieril o la resistencia de la roca.

Como el comportamiento mecánico de algunas rocas depende en gran medida del tamaño de grano de los minerales que la conforman, es prudente realizar una cuidadosa medición de la distribución del tamaño de estos componentes. El diámetro nominal se obtiene al calcular el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen y densidad de la partícula.

Siempre que sea posible, el informe petrográfico debe complementarse con un reporte sobre parámetros mecánicos tales como la resistencia a la compresión simple, la resistencia a la tracción o el índice de carga puntual. La importancia de un buen estudio petrográfico en la determinación de la abrasividad de las rocas se evidencia en. [3]

2.2 Análisis de resultados. Ejemplo

El ensayo petrográfico es de suma importancia no sólo para la correcta clasificación de la roca sino también para determinar sus características de dificultad frente al avance de los equipos de perforación y su excavabilidad y explicar sus resistencias.

Muestra No. 12

Tipo de análisis: Petrográfico de secciones delgadas

Proyecto: Proyecto Hidroeléctrico Miel I

Material: Muestra de núcleos

Descripción macroscópica. Roca metamórfica de color blanco y gris crema en bandas delgadas alternas y algunas pocas medianas, grano fino, alta compactación. Las bandas presentan ligero replegamiento.

Descripción microscópica. Textura gnéisica. Es conveniente que todos los ensayos petrográficos indiquen el tamaño de los minerales constituyentes, así como su grado de microfisuración, ya que éstos son fundamentales para determinar el Índice de Abrasividad Schimazek y otras propiedades asociadas con el nivel de esfuerzos in-situ.

Observaciones. La roca presenta bandas delgadas y medianas alternadas de minerales félsicos y máficos predominando los primeros. Una sola banda amplia y definida de cuarzo policristalino se observa en la placa, con cristales de tamaño

medio. Las otras bandas félsicas son de wollastonita, escapolita, cuarzo y plagioclasa maclada. Las bandas y láminas máficas presentan enriquecimiento en diópsido y pirita y entremezclados, algunos cristales de wollastonita y escapolita. Muy finos cristales de titanita se alinean perfectamente paralelos al bandeamiento general. Algunos cristales de pirita muestran aureolas de reacción por efecto metamórfico. Algunos cristales de diópsido presentan una incipiente alteración. La calcita se presenta en cristales aislados. La banda de cuarzo presente es posterior, es decir, inyectado paralelo al bandeamiento ya que el resto del cuarzo se muestra entremezclado con otros minerales félsicos y en granos más finos.

Composición mineralógica. La Tabla 1 ilustra los resultados de la descripción petrográfica de una de las muestras de estudio.

Tabla 1. Descripción petrográfica de la muestra ensayada número 12

Mineral	Dureza Mohs	%	Tamaño de grano (mm)
Wollastonita	5,0	33	0,01 – 0,30
Cuarzo	7,0	28	0,13 – 2,55
Diópsido	6,5	19	0,20 – 1,33
Escapolita	5,0 – 6,0	8	0,05 – 0,14
Plagioclasa	6,0	8	0,01 – 0,14
Pirita	6,5	2	0,01 – 0,09
Calcita	3,0	1	0,04 – 0,07
Titanita	5,0 – 5,5	1	0,07 – 0,20

Clasificación: Gneis de wollastonita con cuarzo, diópsido, escapolita y plagioclasa.

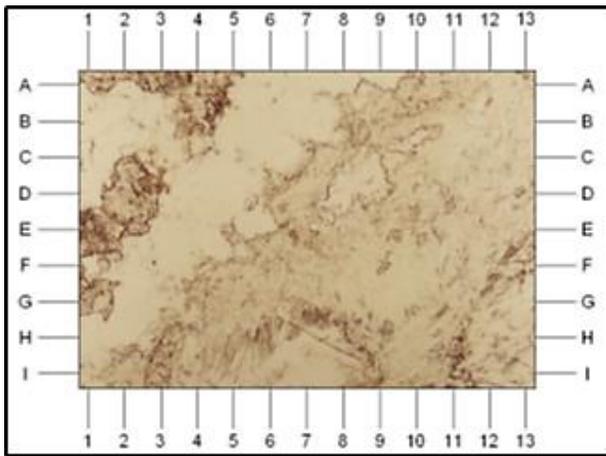


Figura 1. Análisis de sección delgada por nicóles paralelos. Aumento 4x

En la Figura 1, se aprecian los contrastes en los relieves de los constituyentes y la orientación de las bandas félsicas a base de cuarzo (A5 - A9) y wollastonita (A10 - A13). Los cristales de diópsido muestran su alto relieve (A3, E1, G1). Los cristales de escapolita muestran relieves bajos a medios (I7, H12).

En la Figura 2, igual a la anterior, pero con nicóles cruzados, resaltan los colores de interferencia azul, rojo y amarillo de los cristales de diópsido, y rojo y amarillo en los de escapolita. Los cuarzos y las wollastonitas muestran colores blancos y grises,

pero contrastan en sus hábitos (cristales anhedrales de cuarzo y prismáticos finos de wollastonita).

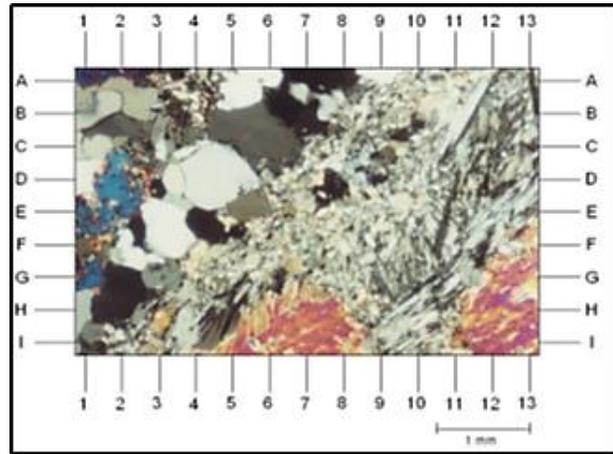


Figura 2. Análisis de sección delgada por nicóles cruzados. Aumento 4x

Estudio mineralógico

El estudio realizado a las secciones delgadas de cada muestra, consistente en la identificación de sus componentes mineralógicos, sus cantidades, en porcentajes, bajo el microscopio polarizador (se monta un dispositivo de conteo de puntos en el microscopio y se determinan los porcentajes de minerales) y el tamaño de granos, permitió identificar petrográficamente los tipos de roca, Tabla 2. Sus constituyentes mineralógicos se ilustran en la Tabla 3.

Tabla 2. Clasificación petrográfica de las muestras ensayadas

Muestra	CLASIFICACIÓN
1	Gneis esquistoso de cuarzo, diópsido y wollastonita
2	Gneis esquistoso de cuarzo, diópsido y wollastonita
3	Gneis esquistoso de cuarzo, diópsido y wollastonita
4	Esquisto cuarcítico de diópsido y wollastonita
5	Gneis cuarcítico de diópsido y wollastonita
6	Gneis cuarcítico de diópsido y wollastonita
7	Gneis cuarcítico de diópsido y wollastonita
8	Gneis cuarcítico de diópsido y plagioclasa
9	Gneis cuarcítico de diópsido, escapolita y wollastonita
10	Gneis esquistoso de cuarzo, diópsido, escapolita y wollastonita
11	Esquisto gnéisítico de cuarzo, diópsido, escapolita y wollastonita
12	Gneis cuarcítico de diópsido, escapolita, plagioclasa y wollastonita
13	Gneis esquistoso de cuarzo, diópsido, escapolita, plagioclasa y wollastonita
14	Esquisto de wollastonita

Tabla 3. Composición mineralógica de las muestras ensayadas, [6]

Muestra No.	MINERALES FORMADORES DE LAS ROCAS													
	Cuarzo	Fenocristo	Pirita	Plagioclasa	Maguedita	Feldspato	Escapolita	Diópsido	Titanita	Wollastonita	Calcita*	Moscovita*	Oxides*	Opiras*
G ₁	2,65	3,3 - 3,5	5,02	2,6 - 2,8	5,18	2,57	2,6 - 2,7	3,2	3,4 - 3,55	2,71	2,76 - 2,88			
H Mohs	7,0	6,0 - 7,0	6,0 - 6,5	6,0	6,0	6,0	5,0 - 6,0	5,0 - 6,0	5,0 - 5,5	5,0 - 5,5	3,0	2,0 - 2,5		
1	52,7	6	2,3				3,3	8		26,3	0,7		0,7	
2	47	10,3	2,3			4,7	4,3	18	1	11,3	Tr	1		
3	47,3	10,3	4,3	5,3				17,0	Tr	8	Tr		7,7	
4	27,3	2	3,3				4,3	8,0	6,0	44,3	1		3,7	
5	52		2,3	1			4,7	28,3		8,3	1,7		1,7	
6	56,3	4,3	1,7	4	1		5,3	15,0	1	10	1,3			
7	31,7	5	2,3				3,3	13,7	1	43				
8	36,7	18	Tr	15				16,3	1,3	12,0	0,7			
9	28,3	5	5,0					9,3	8,3	Tr	43			1
10	52,7	7	4,3	6			11	7,7		10,3	Tr		1	
11	42,3		5		1			10,7	12,0	0,7	28,3	Tr		
12	28		2	8				8	19	1	33	1		
13	45,7	10	1	13,3				7,7	13,3	1	8	Tr		
14	5,3	5,0	Tr					7		Tr	82,7	Tr		

Ensayos físico-mecánicos

Los núcleos de prueba extraídos de grandes bloques de roca, cortados y refrendados, se llevaron al laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad Nacional de Colombia para ser sometidos a diversas pruebas tanto físicas como mecánicas de conformidad con los métodos sugeridos por la ISRM (2013), [5]. Algunas de estas propiedades se ilustran en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades físico-mecánicas de las muestras ensayadas.

Muestra	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	392	14	6,2	52	9,6	79	2,73	52,7
2	144	12	5,9	48	8,5	85	2,67	47,0
3	300	25	5,9	45	12,3	96	2,74	47,3
4	192	11	5,7	40	7,0	47	2,69	27,3
5	191	19	6,7	45	10,6	92	2,75	52,0
6	246	11	5,5	40	10,6	93	2,73	56,3
7	196	15	5,6	38	8,3	67	2,70	31,7
8	274	14	6,3	50	11,8	117	2,74	36,7
9	132	14	6,1	48	15,5	135	2,77	28,3
10	149	23	6,1	44	10,4	84	2,72	52,7
11	214	20	5,8	50	7,4	105	2,75	42,3
12	144	16	5,1	47	16,3	53	3,04	28,0
13	267	20	5,5	45	8,6	66	2,83	45,7
14	300	12	6,1	51	11,5	128	2,72	5,3

Donde:

- I. Resistencia a la compresión σ_c , MPa
- II. Resistencia a la tracción σ_t , MPa
- III. Velocidad longitudinal V_L , km/s
- IV. Lectura al Martillo Schmidt HRS, MPa
- V. Índice de carga puntual $I_s(50)$, MPa
- VI. Módulo de deformación E , GPa
- VII. Peso unitario, γ_t , t/m³
- VIII. Contenido de Cuarzo, %

3. Evaluación de la abrasividad de la roca intacta

La abrasividad de la roca intacta se llevó a cabo mediante la determinación de los siguientes parámetros:

3.1 Contenido de Minerales Abrasivos, AMC, %

Los índices geotécnicos de desgaste más ampliamente utilizados son el Contenido de Minerales Abrasivos, AMC, (conocido como dureza media) que utiliza la dureza Mohs; el Contenido Equivalente de Cuarzo, EQC, que utiliza la dureza Rosiwal y la Dureza Vickers, VH, que se refiere a la dureza de indentación Vickers. Para la determinación del AMC, solo los minerales con dureza Mohs superior a 5 se aceptan como abrasivos; en tal caso, el total de minerales abrasivos se describe como Contenido de Minerales Abrasivos, AMC, y se obtiene mediante (1).

$$AMC = \sum MHN_i \times \left(\frac{\% \text{ mineral}_i}{100} \right) \quad (1)$$

Donde:

- AMC: Contenido de Minerales Abrasivos, %
- MH: Dureza Mohs
- N_i: Minerales en la muestra de roca con dureza igual o mayor a 5.
- % mineral_i: Porcentaje del mineral i, en la muestra de roca

Sin embargo, el uso de estos índices, que se basan únicamente en el contenido mineralógico, revela algunas debilidades ya que se descuidan otras características relevantes del desgaste de la roca, como el tamaño del grano, su forma y las propiedades mecánicas de las rocas tales como sus resistencias, es por ello por lo que se debió acudir a la determinación de la resistencia a la compresión y la tracción indirecta de las muestras ensayadas.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de Dureza AMC para las muestras ensayadas en este estudio.

Tabla 5. Durezas AMC, Vickers, Schimazek, EQC, RAI, CAI y LAC de las muestras ensayadas

Muestra	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1	52,7	98,5	813,32	77	392	302	6,0	142,3	0,036	3,9	1751
2	47,0	99,0	845,14	73	144	105	4,2	119,6	0,024	2,1	1204,5
3	47,3	92,0	826,27	71	300	213	5,4	245,8	0,062	10,8	1569
4	27,3	95,0	592,84	63	192	121	4,4	107,9	0,035	2,4	1265
5	52,0	96,5	877,91	75	191	143	4,7	186,5	0,03	4,2	1356,5
6	56,3	98,5	880,35	77	246	190	5,2	107,3	0,058	4,8	1508
7	31,7	100	679,77	68	196	133	4,6	150,9	0,046	4,7	1326
8	36,7	99	816,48	69	274	189	5,2	144,7	0,031	3,1	1508
9	28,3	99	631,48	64	132	84	3,9	142,6	0,038	3,5	1113,5
10	52,7	99	789,75	73	149	109	4,3	234,5	0,035	6,0	1235
11	42,3	100	745,52	70	214	150	4,8	202,5	0,05	7,1	1387
12	28,0	99,0	685,65	63	144	91	4,0	162,5	0,014	1,4	1144
13	45,7	100	839,07	70	267	187	5,1	204,0	0,044	6,3	1478
14	5,3	100	404,51	56	300	168	5,0	120,4	0,034	2,4	1447,5

Donde:

- I Cuarzo: %
- II AMC: Contenido de Minerales Abrasivos, %
- III VH: Dureza Vickers, kgf/mm²
- IV EQC: Contenido Equivalente de Cuarzo, %
- V σ_c : Resistencia a la Compresión Simple, MPa
- VI RAI: Índice de Abrasividad de la Roca, MPa
- VII CAI: Índice de Abrasividad Cerchar, mm/10
- VIII σ_t : Resistencia a la Tracción Brasileña, kgf/cm²
- IX Φ_{prom} : Diámetro Promedio de la Partícula de Cuarzo, cm
- X FSch: índice de Abrasividad Schimazek, kgf/cm
- XII LAC: Coeficiente de Abrasividad (LCPC), g/t

3.2 Dureza Vickers, VH

La Dureza Vickers de la roca se obtiene al multiplicar el Número de Dureza Vickers, VHN, kg/mm², de cada mineral, por la cantidad de mineral, y sumarlos, tal como lo ilustra (2).

$$VH = \sum VHN_i \times \left(\frac{\% \text{ mineral}_i}{100} \right) \quad (2)$$

Donde:

- VH: Dureza Vickers, kgf/mm²
- VHN_i: Dureza Vickers del mineral i

En la Tabla 5 se presentan los resultados de Dureza Vickers para las muestras ensayadas en este estudio.

3.3 Contenido Equivalente de Cuarzo, EQC %

El desgaste de una herramienta de perforación o corte está basado predominantemente en el contenido mineral que es más duro que el acero (Dureza Mohs 5,5), especialmente el cuarzo (Dureza Mohs 7,0). Para considerar todos los minerales de una muestra de roca, se ha de determinar el Contenido Equivalente de Cuarzo, EQC, en láminas delgadas, mediante un análisis modal, convirtiendo todo el contenido mineral a abrasividad de Cuarzo. Por esto, cada cantidad de mineral debe multiplicarse por su abrasividad Rosiwal relativa al cuarzo.

El contenido en cuarzo se determina por el método de la lámina delgada, obteniéndose mediante un estudio microscópico; así mismo se tiene la composición mineral de la muestra.

Para el cálculo del cuarzo equivalente se multiplica el tanto por uno de cada mineral de la muestra por el factor de Rosiwal que mide, en escala absoluta, la dureza de los minerales y se expresa como la resistencia a la abrasión medida en pruebas de laboratorio tomando como base el corindón con un factor de 1000; el cuarzo tiene un factor de 100. Se obtiene de esta manera el cuarzo equivalente de cada mineral; se suman todos y se obtiene así el Contenido Equivalente de Cuarzo, (3).

$$EQC = \sum A_i * R_i * n \quad (3)$$

Donde:

EQC:	Contenido Equivalente de Cuarzo
A _i :	Contenido de mineral, %
R _i :	Dureza Rosiwal
n:	Número de minerales

El método para determinar el Contenido Equivalente de Cuarzo es ampliamente conocido por distintos profesionales y aplicado a la investigación previa de los terrenos para evaluar el desgaste de las herramientas de corte.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del Contenido Equivalente de Cuarzo para las muestras ensayadas en este estudio.

3.4 Índice de Abrasividad de la Roca, RAI

Con la finalidad de cubrir los puntos débiles detectados de los índices de desgaste convencionales, Plinninger (2002) propuso el Índice de Abrasividad de la Roca, RAI (Rock Abrasivity Index, RAI). Este índice representa una modificación del Contenido Equivalente de Cuarzo, EQC, y es aplicable fundamentalmente a rocas resistentes, pero también es adecuado para rocas menos resistentes. El índice RAI se calcula multiplicando la Resistencia a la Compresión Simple de la Roca, UCS, por el Contenido Equivalente de Cuarzo, EQC, de acuerdo con (4).

$$RAI = \sum EQC \cdot \sigma_c \quad (4)$$

Donde:

RAI: índice de Abrasividad de la Roca

EQC: Contenido Equivalente de Cuarzo

σ_c : Resistencia a la compresión simple, Mpa

En la Tabla 5 se presentan los resultados del Índice de Abrasividad de la Roca para las muestras ensayadas en este estudio.

3.5 Índice de Abrasividad Cerchar, CAI

Esta prueba mide el desgaste en la punta de un pin de acero que tiene una dureza Rockwell, HRC de 55. Una muestra de roca, en forma de disco o irregular, se sujeta firmemente en el equipo de prueba. El pin se hace descender con cuidado hasta entrar en contacto con la superficie de la roca. Mientras está bajo una fuerza normal de 70 N, el pin se desplaza una distancia total de 10,0 mm sobre la superficie de la muestra.

Los valores del CAI sobre muestras con superficies “rugosas” tienen un valor de CAI aproximadamente 0,5 veces mayor que las muestras con superficies lisas. Se sugiere corregir los resultados del ensayo mediante (5).

$$CAI_R = 0.99 * CAI_L + 0.48 \quad (5)$$

Donde:

CAI_R: Índice de Abrasividad Cerchar Estándar (superficies rugosas)

CAI_L: Índice de Abrasividad Cerchar (superficies lisas, cortes con disco diamantado)

El valor del CAI define el desgaste plano o redondeado de la punta del pin de acero medido con un microscopio mediante un ocular micrométrico. El desgaste de la punta se mide en 4 posiciones, siendo la aguja girada 90° en 3 ocasiones. A continuación, el CAI se calcula con (6).

$$CAI = 10 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum d [mm] \quad (6)$$

Siendo:

n Número de ensayos realizados

d Diámetro de la superficie desgastada medida con una precisión de 0,01 mm

En el presente estudio no se determinó directamente este parámetro; el mismo fue deducido a partir de su relación con el RAI conforme (7).

$$CAI = 0.9^3 \sqrt{RAI} \quad (7)$$

En la Tabla 5 se presentan los resultados del Índice de Abrasividad Cerchar deducidos a partir de la RAI, para las muestras ensayadas en este estudio.

Conviene analizar la propuesta de modificación de este parámetro, el CAI, planteada por [7] quien, en su investigación, propone algunas correlaciones de fácil y comprensible manejo.

3.6 Índice de Abrasividad Schimazek, $FSch$

Este índice, propuesto por [8], se determina en laboratorio a partir de la resistencia a la tracción indirecta de la roca, el diámetro medio de los granos de cuarzo y el Contenido Equivalente de Cuarzo. El índice Schimazek permite conocer la rozabilidad de un determinado tipo de roca. Posiblemente sea uno de los índices de abrasividad más utilizados; dicho índice responde a (8).

$$F_{Sch} = EQC * d_{50} * \sigma_t \quad (8)$$

Donde:

F_{Sch} : Índice de Abrasividad Schimazek, N/mm (kp/cm)

EQC: Contenido Equivalente de Cuarzo de minerales abrasivos, %

d_{50} : Diámetro medio de los granos de cuarzo, mm (cm)

σ_t : Resistencia a la Tracción Brasilera, N/mm² (Kp/cm²)

Ref.[9] realizó una modificación de este índice, utilizando el EQC, el Índice de Carga Puntual (I_{50}) y el tamaño medio del grano de cuarzo equivalente.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del Índice de Abrasividad Schimazek para las muestras ensayadas en este estudio.

3.7 Coeficiente de Abrasividad del LCPC, LAC

Esta prueba está regulada por la Norma Francesa P18-579 (ANFOR 1990). Se realiza empleando un abrasímetro o raspador, que funciona con un motor de 750 Watts. La platina de prueba LCPC (50×25×5 mm) está fabricada en acero al carbono (grado XC-12) con una dureza Rockwell de HRB 60-75, la cual se fija con la ayuda de un tornillo en el eje vertical de la máquina. Esta técnica consiste en preparar una fracción de roca (500 ± 2g -5x10-4 t-) secada al aire de entre 6,3 y 4,0mm. Esta muestra de roca se coloca en un recipiente de hierro de 10 cm de diámetro; la pieza de prueba, previamente fijada, se hace girar a modo de un aspa en una licuadora, que contiene la fracción de roca, durante cinco minutos a una velocidad de 4500 rpm.

La relación entre la diferencia de peso de la platina antes y después de la prueba respecto al peso del material abrasivo original, arroja el coeficiente de abrasividad LCPC (ABR) en g/t, conforme (9).

$$LAC = \frac{(m_o - m)}{M} \quad (9)$$

Donde:

LAC coeficiente de abrasividad LCPC, (g/t)

m_o masa inicial de la platina de ensayo, (g)

m masa final de la platina de ensayo, (g)

M masa del material abrasivo (-6.3 mm + 4.0 mm), (t)

El valor de LAC varía entre 0 y 2000 (g/t) para muestras de suelo y roca natural. Se utiliza una nueva platina de ensayo para realizar cada una de las pruebas.

El Coeficiente de Abrasividad LCPC, correlaciona bastante bien con el CAI mediante (10).

$$LAC = 303,7 * CAI - 71,02 \quad (10)$$

Donde:

LAC: Coeficiente de Abrasividad del LCPC, g/t

Los valores de LAC fueron deducidos según la expresión anterior.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del Índice de Abrasividad LAC deducidos a partir del CAI, para las muestras ensayadas en este estudio.

Después de la prueba, la fracción de roca ensayada se tamiza para obtener la fragilidad de los granos de la roca. La porción de peso porcentual de material más fino que pasa un tamiz de 1,6 mm formado por la prueba con el peso de la muestra inicial especifica el coeficiente de rotura del LCPC (LBC%), el cual tiene un rango de 0% a 100%, (11).

$$LBC = 100 M_{1,6} / M \quad (11)$$

Donde:

$M_{1,6}$: Fracción de masa, de la muestra, inferior a 1,6 mm después del ensayo LCPC

M : Masa del material de la muestra original.

3.8 Dureza Total, HT

La Dureza Total es uno de los parámetros de la roca más utilizado en el mundo entero para predecir las tasas de penetración de las TBM (velocidad de avance, costo de los cortadores y utilización real de la TM) [10] y [11]. Su determinación exige conocer previamente la Dureza Schmidt y la Dureza o Abrasión Taber; esta última, requirió del envío de las muestras de roca al laboratorio Taber en Estados Unidos, para su determinación. La Dureza Total se calcula mediante (12).

$$H_T = H_R * (H_A)^{0,5} \quad (12)$$

Donde:

H_T : Dureza total

H_A : Dureza de Abrasión de la roca (Abrasión Taber)

H_R : Dureza de Rebote del Martillo Schmidt

HA = 1/(pérdida de peso promedio, en gramos, de dos 2 discos de roca -espesor de 0,6 cm- sometidos a abrasión uno contra el otro después de estar sometidos a 400 revoluciones por cada lado. En la Tabla 6 se presentan los resultados de la Dureza Total realizada a 6 muestras, diferentes, pero del mismo lote en investigación, por lo que se supone que representan bien las muestras analizadas ya que, salvo la dacita, las demás corresponden al tipo de gneiss que caracteriza el macizo rocoso en estudio.

Tabla 6. Dureza Total, HT, de las muestras ensayadas en [11].

Muestra	I	II	III	IV	V
1	Gneiss cuarcítico	56,40	12,50	199	Muy alta
2	Dacita	57,90	6,45	147	Alta
3	Gneiss wollastonítico	60,80	4,26	125	Alta
4	Gneiss cuarcítico	54,80	4,76	120	Alta
5	Gneis piroxénico	51,50	3,51	96	Media
6	Gneiss Wollastonítico	57,50	1,75	76	Media

Donde:

- I Clasificación petrográfica
- II Dureza Schmidt, H_R
- III Abrasión Taber, H_A
- IV Dureza Total, H_T
- V Clasificación de Abrasividad.

3.9 Índice de la Tasa de Perforación, DRI

El DRI es una medida de la dificultad de perforar rocas; fue desarrollado en la Universidad de Ciencia y Tecnología en Trondheim, Noruega. Se basa en los resultados de dos pruebas de laboratorio: la de microperforación J de Sievers (SJ) y la de fragilidad, (S20).

La prueba de microperforación J de Sievers, desarrollada por H. Sievers en la década de 1950, mide indirectamente la dureza de la superficie de las rocas. El valor J de Sievers se obtiene en una prueba de microperforación midiendo su profundidad en una muestra de roca después de 175–200 revoluciones, en décimas (1/10) de mm. La prueba se repite de cuatro a ocho veces para cada muestra de roca, y el valor J de Sievers es el valor medio de las profundidades de las perforaciones.

Por su parte, la prueba de fragilidad, S20, es una medida indirecta de la resistencia de la roca al crecimiento de grietas y al aplastamiento por impactos repetidos. Esta prueba, desarrollada por N. Von Matern y A. Hjelmer en 1943, se realiza en tres porciones iguales de roca con una granulometría de 11,2 a 16,0mm. Se toman 500g de la muestra de roca con una densidad de 2,65 g/cm³. El valor de fragilidad se calcula como el porcentaje de material que pasa la malla de 11,2 mm después de 20 caídas desde una altura de 25 cm, de un martillo de 14 kg y se presenta como el valor medio de los tres ensayos.

La determinación del DRI como una función del SJ y el S20, se realiza mediante el ábaco de la Figura 3.

En nuestra investigación no se cuantificaron directamente los parámetros SJ ni S20; la determinación del DRI se realizó de forma indirecta mediante (13) citada por [12].

$$DRI = 77,163 * e^{-0,0005B_4} \quad (13)$$

Donde:

- DRI: Índice de la Tasa de Perforación
- B₄: $(\sigma_c * \sigma_t)/2$, MPa

B₄ corresponde a una de las 80 expresiones conocidas para la determinación de la fragilidad de las rocas, de las cuales existen

una decena que se definen en función de relaciones entre la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tracción indirecta de la roca intacta, [13].

En la Tabla 7 se presentan los resultados del Índice de la Tasa de Perforación, deducidos a partir de la determinación en laboratorio de las resistencias a compresión y tracción indirecta de las muestras de roca.

Figura 3. Determinación del DRI en función del S20 y el SJ en muestras 3, 9 y 13.

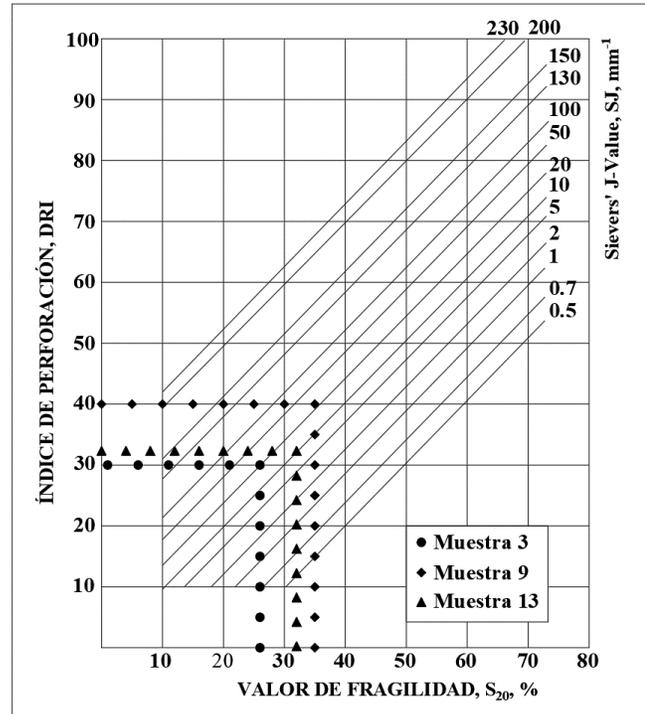


Tabla 7. Dedución del DRI, el SJ, el S20, el AVS, el CLI y el BWI, de las muestras ensayadas

Muestra	σ_c , MPa	σ_t , MPa	B ₄ , MPa	DRI, MPa	S _J , 1/10mm	S ₂₀ , %	AV, mmg	AVS, mmg	CLI, m/broca	BWI, m/brc
1	392	14	2744	28	14	28	132	128	5,90	89
2	144	12	864	34	16	34	120	116	6,46	74
3	300	25	3750	30	20	26	126	120	6,95	84
4	192	11	1056	32	18	30	118	116	6,76	78
5	191	19	1814	36	22	32	122	118	7,25	69
6	246	11	1353	25	15	24	124	120	6,22	97
7	196	15	1470	40	16	38	125	122	6,33	61
8	274	14	1918	26	14	26	127	124	6,00	97
9	132	14	924	40	24	35	115	112	7,65	60
10	149	23	1713	32	17	32	122	118	6,57	78
11	214	20	2140	34	12	36	126	122	5,67	72
12	144	16	1152	38	18	36	118	114	6,80	65
13	267	20	2670	32	13	32	127	123	5,63	79
14	300	12	1800	28	16	26	124	120	6,37	89

Donde:

- σ_c : Resistencia a la Compresión Simple, MPa
- σ_t : Resistencia a la Tracción Indirecta, MPa
- B₄: $(\sigma_c * \sigma_t)/2$, MPa
- DRI: Índice de Tasa de Perforación, MPa
- S_J: Coeficiente S_J, 1/10mm
- S₂₀: Valor de fragilidad, %
- AV: Valor de abrasividad del acero al tungsteno, mg
- AVS: Valor de abrasividad del acero, mg

CLI: Índice de Vida del Cortador, CLI, m/broca

3.10 Valor de Abrasividad del Acero, AVS

El Valor de Abrasividad del Acero, AVS, es una medida de la abrasión tiempo dependiente del acero debido al contacto con el polvillo de roca triturada. Este ensayo se desarrolló en el Departamento de Geología del NTH en los años 1958-61 por Reidar Lien, Rolf Selmer-Olsen; consiste en hacer pasar una porción de roca triturada de menos de 1mm, sobre un disco de acero, bajo una pieza de material de acero que está sometida a una carga de 10kN, durante 1 minuto y a 20 revoluciones por minuto. El caudal del polvillo de abrasión de roca sobre el disco de acero giratorio se alimenta a una tasa aproximada de 80 g/min. La muestra del acero se extrae de un disco de corte o de una broca. El valor del AVS es el promedio de 2 a 4 medidas de la pérdida de peso en mg de la muestra del acero ensayada, (14).

$$AVS = (WP_1 - WP_2) \quad (14)$$

Donde:

- WP₁: Peso de la pieza de acero antes del ensayo, mg
- WP₂: Peso de la pieza de acero después del ensayo, mg

El valor de la abrasión, AV, es la pérdida de peso en miligramos de la pieza de carburo de tungsteno después de 100 revoluciones del disco, correspondiente a 5 minutos de tiempo de prueba.

Este valor no se midió en el laboratorio, pero se dedujo a partir de otras mediciones que se hicieron en las que se pesó el extractor de núcleos antes y después de haber perforado 1660 mm, con una pérdida de peso de 5,81 g.

En la Tabla 7 se presentan los resultados del Índice de la Tasa de Perforación, deducidos a partir de la determinación en laboratorio de las resistencias a compresión y tracción indirecta de las muestras de roca.

3.11 Índice de Vida del Cortador, CLI, m/broca

Con los valores de SJ y AVS se determina el Índice de Vida de los Cortadores, CLI, que expresa el tiempo de vida de servicio del acero constituyente de un disco de corte o de una broca. El CLI se calcula conforme la expresión recomendada por el NTN/SINTEF [14], (15).

$$CLI = 13.84 \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0.3847} \quad (15)$$

Donde:

- SJ Valor J de Sievers
- AVS Valor de Abrasión de los Aceros

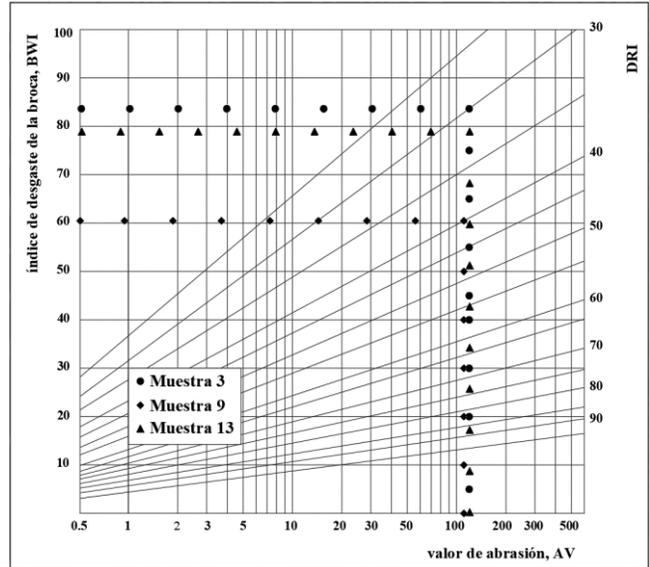
En la Tabla 7 se presentan los resultados del Índice de Vida de los cortadores, deducidos a partir de (15) para las muestras de roca en estudio.

3.12 Índice de Desgaste de la Broca, BWI

A partir de los valores del DRI y el AV, se determina el Índice de Desgaste de las Brocas, BWI, que expresa la vida del cortador en metros o volumen perforado, Figura 4.

En la Tabla 7 se presentan los resultados del Índice de Desgaste de las Brocas deducidos a partir de la Figura 4, de las muestras de roca ensayadas en el estudio.

Figura 4. Ábaco para determinar el BWI conforme a las muestras 3, 9 y 13.



4. Conclusiones y recomendaciones

El estudio de la abrasividad de la roca explotada en la Cantera Puente de Hierro II localizada en el norte de Caldas, mediante la determinación de las abrasividades AMC, VH, EQC, RAI, CAI, FSchim, LAC, HT, DRI, AVS, CLI y BWI, permitió clasificarla como una roca con abrasividad de alta a extremadamente alta, la que a su vez condujo a inferir que el desgaste de las brocas se clasifica en ese mismo rango, conforme lo que se indica a continuación:

1. De la Tabla 5 se concluye que el CAI varía de 3,9 a 6,0; promedio: 5,0 y el FSchim de 1,4 a 10,8; promedio: 6,1 lo que clasifica la roca como de abrasiva a extremadamente abrasiva, Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación de las rocas según los índices Cerchar y Schimazek

Clasificación	CAI, mm/10	F _{Sch} (N/mm)
No abrasiva	< 0,5	<0,5
Muy ligeramente abrasiva	<1,2	<0,5
Ligeramente abrasiva	1,2 a 2,5	0,5 a 2,0
Abrasividad media	2,5 a 3,5	2,0 a 4,0
Moderadamente abrasiva	3,5 a 4,0	4,0 a 5,0
Abrasiva	4,0 a 4,2	5,0 a 8,0
Altamente abrasivo	4,2 a 4,5	8,0 a 11,0
Extremadamente abrasivo	> 4,5	>11

2. De la Tabla 7 se infiere que el DRI varía de 28 a 40; promedio: 34 y el CLI, de 5,63 a 7,65; promedio: 6,64, lo que clasifica la roca en categoría baja, Tabla 9.

3. Finalmente, el Índice de Desgaste de la Broca, BWI (60 - 97) y el AVS (112-128) Tabla 7, la clasifica como de categoría muy alta a extremadamente alta, Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de la roca según los índices DRI, CLI, AVS y BWI

Categoría	DRI	CLI	AVS	BWI
Extremadamente baja	≤25	≤5	<1	≤10
Muy baja	26 - 32	5.0 - 5.9	2-3	11 - 20
Baja	33 - 42	6.0 - 7.9	4-2	21 - 30
Media	43 - 57	8.0 - 14.9	13-25	31 - 44
Alta	58 - 69	15.0 - 34	26-35	45 - 55
Muy alta	70 - 82	35 - 74	35-44	56 - 69
Extremadamente alta	≥83	≥75	<44	≥70

4. Si bien no es el único parámetro que incide en la toma de decisiones sobre la utilización de D&B o la TBM para la construcción de un túnel, sí se recomienda siempre realizar un estudio de esta naturaleza que permita conocer la capacidad abrasiva de la roca. La fragilidad del material intacto, definido como una relación entre la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tracción indirecta, al igual que las características del macizo rocoso en tanto a su comportamiento esfuerzo-deformacional, así como su estado de diaclasamiento y estado de esfuerzos in-situ, también juegan un papel protagónico en esta decisión [15].

Referencias

- [1] Correa Arroyave Á et al., “Estudio de la abrasividad y otras propiedades físicas y mecánicas de las rocas explotadas en la cantera Puente Hierro II” Bogotá, (2004), 205 pp.
- [2] Ellecosta P., “Determining abrasivity for hard rock TBM tunnelling”. Tesis de Doctor-Ingeniero en la Technische Universität München, Munich, Alemania, (2020), 255 pp.
- [3] Majeed, Y., Abu Bakar, M.Z. & Butt, I.A. “Abrasivity evaluation for wear prediction of button drill bits using geotechnical rock properties”. *Bull Eng Geol Environ* 79, 767–787 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01587-y>.
- [4] Yagiz S., Rostami J., & Ozdemir L., “Recommended rock testing methods for predicting TBM performance: focus on the CSM and NTNU models”. *ISRM International Symposium* (2008).
- [5] Correa Arroyave Á., “Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio”, ISBN 978-958-98770-5-0, Bogotá, 2013, 388 pp.
- [6] Llinás R. D., “Resultados ensayos petrográficos muestras de roca, Cantera Puente Hierro II”. Bogotá, (2004).
- [7] Ghasemi A., “Study of Cerchar Abrasivity Index and potential modifications for more consistent measurement of rock abrasion”. The Pennsylvania State University, Thesis, August (2010).
- [8] Schimazek, J. y Knatz, H. “Die beurteilung der bearbeitbarkeit von gesteinen durch schneid-und rollenbohrwerkzeuge”. *Erzmetall*, 29(3): 113-119, (1976).
- [9] Ewendt, G., “Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln”. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, 33, (1989).
- [10] Tarkoy P. J., “Predicting TBM penetration rates In Selected rock types”. *Proc., 9th Canadian Symposium on Rock Mechanics*, Montreal, Quebec, Dec. 13-15, (1973).
- [11] Tarkoy, Peter J., “Practical geotechnical and engineering properties for tunnel-boring machine performance analysis and prediction.” *Transportation Research Record*, (1986).
- [12] López Jimeno C. et al., “Manual de perforación en túneles. Capítulo 2. Propiedades de las rocas y de los macizos rocosos y su perforabilidad”, ETSI-Minas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, pp47-106. (2013).
- [13] Meng F et al., “Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>.
- [14] Dahl F., “DRI, BWI, CLI Standards”. NTNU, Angleggsdrift, Trondheim, (2003).
- [15] Giraldo Paredes E. M., “Las máquinas tuneladoras tipo “TBM” como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: desarrollo de túneles en Yunca”. *Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería geológica, minera y metalúrgica. Tesis de Maestro en Ciencias con Mención en Ingeniería de Minas*, Lima-Perú., (2010).