

Árbol de excavabilidad para elegir método de arranque en canteras de áridos de la construcción: yacimiento El Cacao

Naisma Hernández-Jatib
Yiezenia Rosario-Ferrer
Yuri Almaguer-Carmenate
José Otaño-Noguel

Resumen

Este trabajo presenta un procedimiento para seleccionar el método más racional de excavación de la roca para las canteras de materiales de construcción en Cuba. Se realizó un estudio de los métodos de ruptura del terreno y los parámetros que son tomados en cuenta para seleccionarlos. Como resultado, se obtuvo un árbol de la excavabilidad del macizo rocoso, cuyas entradas son el índice de carga puntual y el tamaño de bloque. Este procedimiento facilita la elección del método más apropiado que, de acuerdo con criterios económicos y sostenibles, garantiza la explotación satisfactoria de las canteras.

Palabras clave: excavabilidad; métodos de arranque; canteras; materiales de la construcción; sistema de decisión.

Excavability tree to select the method of mining aggregate quarries: El Cacao ore body

Abstract

This investigation presents a procedure the most rational method of rock excavations for quarries of construction materials in Cuba. The methods for breaking the ground were studied as well as the parameters that are taken into consideration for the selection. The investigation results provided a tree of excavability of rocky massif. The inputs were point load index and the block size. This procedure facilitates the selection of the most appropriate method, which in turn guarantees mining the quarries satisfactory in compliance with economic and sustainable criteria.

Keywords: Excavability, mining method, quarries, materials of construction, decision making.

1. INTRODUCCIÓN

La elección del método de arranque depende de las propiedades del macizo rocoso, la disponibilidad de medios técnicos y las exigencias en la calidad de la materia prima. Las rocas blandas pueden ser excavadas con cualquier equipo de arranque, en este caso la preparación del macizo se conjuga con la excavación y se realiza con el mismo equipo. En las rocas duras, la excavación se realiza con equipos de mayor potencia y el macizo se prepara mediante explosivos (Luengo & González 2004).

La correcta elección de los métodos de arranque de la roca durante la explotación minera, en función de las condiciones concretas de cada macizo rocoso, constituye un aspecto esencial y garantiza el éxito de dicho proceso (Watson 2008 com. esc.).

Para seleccionar un método racional de arranque de la roca deben tenerse en cuenta las características geomecánicas del macizo, que incluyen las propiedades másicas, de resistencia, macro y micro estructurales; estas juegan un papel determinante en el mecanismo de ruptura del macizo, ya sea por los esfuerzos creados en él por la energía mecánica, la hidráulica o por la energía de las explosiones, que resulta la más difundida, aunque en la actualidad la necesidad del empleo de tecnologías limpias ha provocado que en el mundo se introduzca con gran aceptación el uso de la energía mecánica.

Actualmente, de acuerdo con la experiencia mundial, el método de arranque mecánico ha permitido la explotación de canteras de diferentes materias primas en las áreas urbanas o cercanas a los puntos poblacionales donde está prohibida la voladura (Espí 1999). La utilización de estos métodos de arranque en los yacimientos donde hay restricciones económicas y ambientales tiene las siguientes ventajas:

- Se obtiene la granulometría deseada directamente en la extracción (proceso de arranque-carga).
- Pueden explotarse yacimientos con estructuras complejas, al permitir la extracción selectiva de los diferentes cuerpos minerales que la componen.
- Se reduce sensiblemente la generación de polvo, ruido, onda sísmica, comunes en los trabajos de voladura, con lo que se garantiza el mínimo impacto al medio ambiente.

En este artículo se presenta un procedimiento para la elección de métodos de arranque durante la explotación de canteras de materiales de construcción, considerando las particularidades de cada macizo rocoso y

tomando en consideración que en Cuba predominan las canteras de rocas sedimentarias (calizas estratificadas).

2. CLASIFICACIONES DE LA EXCAVABILIDAD

La excavabilidad se define como la facilidad que presenta un terreno para ser cavado. Algunas clasificaciones para la minería subterránea han sido propuestas en diversas investigaciones. Esas propuestas se basan, generalmente, en el índice de carga puntual, la energía específica, el índice de triturabilidad de la roca y en características de las discontinuidades y de los sistemas de clasificación de macizos rocosos (Roxborough 1987; Gehring 1992).

Franklin *et al.* (1971) plantean que la excavabilidad se basa en los valores del espaciamiento entre las grietas (E_g) y en la resistencia a la compresión simple de las rocas (R_c). Esta clasificación tiene como limitaciones que no incluye el tipo de maquinaria de arranque a utilizar ni sus capacidades, y no valora la influencia de las grietas en la dirección de ataque de las rocas. Es una clasificación muy conservadora ya que exige voladura para rocas masivas a partir de una resistencia a la compresión lineal muy baja.

Weaver (1975), utilizando ejemplos de Sudáfrica, propone un gráfico para evaluar la escarificación, el cual fue adaptado desde el sistema RMR (Bieniawski 1974), utilizado para el diseño de sostenimiento de túneles. Su cambio fundamental es el reemplazamiento de la designación de calidad de roca (RQD) por la velocidad sísmica, la introducción de la erosión y el ajuste para los efectos de la orientación de discontinuidades en escarificación.

Romana (1981) presenta una propuesta basada en la clasificación aportada por Louis (1974), adaptada a las capacidades tecnológicas de la maquinaria de excavación. Posteriormente, presenta una versión más actualizada de dicha clasificación en función de la calidad del macizo y la resistencia a la compresión de la roca, indicando los intervalos de aplicación de los diferentes métodos de excavación (Romana 1994).

Scoble & Muftuoglu (1984) fundamentan su clasificación en la determinación de un índice de excavabilidad del macizo mediante la utilización de la expresión $IE = W + S + J + B$, donde: W , es el grado de alteración del macizo rocoso, determinado en las paredes de las excavaciones; S , la resistencia de la compresión simple; J , la distancia entre grietas y B , la potencia de los estratos. Según esta clasificación, todos los macizos rocosos con índices de excavabilidad menores a 70

podrían excavarse con equipos medianos; entre 70 y 100 con equipos grandes y mayores a 100 solo con voladuras.

Lilly (1986) propone, para rocas blandas y rocas duras, el índice de volabilidad (BI: *Blastability Index*), obtenido como la suma de las calificaciones asignadas a cinco propiedades geomecánicas: descripción del macizo rocoso, espaciamiento y orientación de las juntas planares, gravedad específica y dureza de la roca.

Singh *et al.* (1987) también proponen un índice de escarificación (*Rippability Index*) para formaciones carboníferas, los gráficos para el funcionamiento del escarificador (*ripper*) fueron propuestos para una amplia variedad de rocas, con base en las ondas P (Church 1981; Caterpillar 2001).

Singh *et al.* (1989) definen un índice de arranque de las rocas (IR) que consiste en la determinación de cuatro parámetros geomecánicos para la clasificación de los macizos; estos parámetros son: resistencia a la tracción, espaciamiento entre discontinuidades, grado de meteorización y grado de abrasividad. A partir de este índice los autores clasificaron los macizos rocosos en cinco grupos de acuerdo con la facilidad de arranque mecánico de la roca.

Karpuz (1990) y Basarir & Karpuz (2004) proponen un sistema de clasificación de escarificación para formaciones carboníferas y margas para minas de lignito. Este se basa en la velocidad sísmica de las ondas P, el índice de carga puntual o la resistencia a la compresión uniaxial, el promedio del espacio de discontinuidad y la dureza determinada por el martillo de Smichdt.

Pettifer & Fookes (1994) establecen que la excavabilidad de la roca depende de propiedades individuales, del equipamiento para la excavación y del método de laboreo. También establecieron que con la excepción de la tensión de la roca, expresada por el índice de carga puntual y las características de discontinuidad, se define el tamaño individual del bloque rocoso que constituye uno de los más importantes parámetros de la escarificación de la roca.

Hoek & Karzulovic (2000) estimaron el índice GSI (*Geological Strength Index*) y sugirieron sus rangos para los diferentes métodos de excavación. Ellos propusieron que los macizos rocosos pueden ser excavados con valores GSI hasta 40 y valores de tensiones del macizo de alrededor de 1 MPa, mientras que pueden ser escarificados para valores de GSI de aproximadamente 60 y valores de tensión del macizo cerca de

los 10 MPa. La voladura sería el único método efectivo de excavación que exhibe valores de GSI mayores a 60 y tensiones del macizo mayores a 15 MPa.

Aunque numerosos métodos están disponibles para predecir la excavabilidad (Tabla 1), ninguno en particular es universalmente aceptado por la falta de apreciación de casos de estudios previos o dificultades en la determinación de los parámetros de entrada, así como limitaciones de aplicabilidad a un entorno geológico específico. La existencia de un sistema que supere las deficiencias mencionadas sería una herramienta de utilidad para la elección del equipamiento disponible.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos considerados para varios sistemas de excavabilidad

Evaluación de los métodos	Importancia relativa de cada parámetro (I)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Franklin <i>et al.</i> (1971)			X			X			
Weaver (1975)	X			X	X	X	X	X	X
Kirsten (1982)		X				X	X		X
Minty & Kearns (1983)	X		X		X	X	X	X	X
Scoble & Muftuoglu (1984)		X			X	X			
Singh <i>et al.</i> (1987)	X		X		X	X			
Ovejero (1987)	X								
Karpuz (1990)		X		X	X	X			
Pettifer & Fookes (1994)			X			X			X

(1) Velocidad sísmica, (2) Resistencia a la compresión, (3) Resistencia de carga puntual, (4) Dureza de la roca, (5) Abrasividad/erosión, (6) Discontinuidad/ tamaño del bloque, (7) Discontinuidad/persistencia, (8) Separación de las discontinuidades, (9) Orientación de las discontinuidades.

En la mayoría de las clasificaciones se determinan como propiedades básicas la resistencia a la compresión simple o a la carga puntual y la presencia de discontinuidades, las cuales tiene gran influencia en el proceso de excavación ya que en las rocas duras, más que un corte, se realiza el arranque aprovechando los planos de debilitamiento estructural o las diaclasas abiertas.

Estos aspectos alcanzan su mayor efecto cuando se realiza el arranque en las canteras, criterio que se ha venido utilizando solo en las labores subterráneas, en la que también se consideran las características mecánico-estructurales del macizo de rocas y sus propiedades físicas.

3. PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR EL MÉTODO DE ARRANQUE

Considerando las regularidades encontradas en las investigaciones de diferentes autores, citados en el epígrafe anterior, relativas a las condiciones de excavabilidad y los métodos de arranque de las rocas, se propone un procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras de materiales de la construcción.

El procedimiento propuesto consta de los siguientes pasos:

- Análisis estructural del macizo
- Determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas
- Determinación de dominios geomecánicos
- Elección del método de arranque.

El análisis estructural del macizo rocoso debe considerar las estructuras geológicas que constituyan discontinuidades, tales como: grietas, fallas, estratificación, foliación secundaria, entre otras.

Asimismo, deben considerarse los elementos de yacencia, la orientación (que incluye la longitud y la abertura), la continuidad y el tamaño del bloque natural.

En cuanto a las características de las grietas, es importante considerar la rugosidad, el carácter de la pared y el relleno, al igual que el espaciamiento, el número de familias y la presencia de agua.

La determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas tiene en cuenta la resistencia a la compresión simple y la carga puntual.

La determinación de dominios geomecánicos permite obtener un modelo general del yacimiento a partir de la integración de los mapas de factores geológicos y geomecánicos, que posibilite la delimitación de primer orden de los dominios y la delimitación de segundo orden, de acuerdo a las franjas protectoras de las cuencas hidrográficas y el límite de la concesión del yacimiento.

3.1. Sistema de decisión

La elección del método de arranque parte de la caracterización del yacimiento por condiciones geológicas y geomecánicas. Los parámetros geotécnicos: resistencia a la compresión, resistencia a la carga puntual y

aquellos relacionados con el grado de agrietamiento de la roca, son considerados en la mayoría de las clasificaciones de excavabilidad como los parámetros de mayor influencia.

Es por ello que se propone un sistema de decisión que permite establecer las categorías de excavación de rocas en yacimientos de áridos, basado en el espacio entre discontinuidades, la resistencia a la carga puntual y el tamaño y la forma del bloque natural. La materia prima explotada en las canteras de materiales de construcción en Cuba es predominantemente la roca caliza, de resistencia media a alta (50-200 MPa), las que pueden ser extraídas utilizando métodos de arranque mecánico.

El sistema propuesto tiene como entradas el índice de carga puntual de las rocas y el tamaño del bloque. Para definir el método de arranque de la roca más racional a emplear fueron establecidas cinco áreas de excavabilidad: arranque hidráulico, escarificación dura, escarificación fácil, excavación fuerte y excavación fácil; que será la salida del sistema de decisión.

Atendiendo al índice de carga puntual, las rocas son clasificadas en: muy débiles, débiles y fuertes (Tabla 2); esta clasificación coincide con la de los materiales de la construcción (Stapledon 1968).

Tabla 2. Clasificación de las rocas de acuerdo al índice de carga puntual (Stapledon 1968).

Clasificación	Valores de resistencia (MPa)
Muy débiles	Menores a 0,35
Débiles	Entre 0,35 y 1
Fuertes	Entre 1 y 3,5

El tamaño de los bloques que conforman el macizo rocoso condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad. En la Tabla 3 se relaciona el tamaño del bloque con el valor de las discontinuidades y el tipo de macizo rocoso.

Tabla 3. Descripción del tamaño de bloque en función del número de discontinuidades (González de Vallejo 2007)

Descripción	Tipo de macizo rocoso	Jv (Discontinuidades/m ³)
Bloques muy grandes	Sólido	Menores que 1
Bloques grandes	Masivo	Entre 1 y 3
Bloques de tamaño medio	En bloques	Entre 3 y 10
Bloques pequeños	Fracturado	Entre 10 y 30
Bloques muy pequeño	Triturado	Mayores que 30

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de las características estructurales de diferentes macizos rocosos en los que se explotan materiales de construcción permitió establecer el árbol de decisión (Figura 1) que permite seleccionar el método de arranque a partir del índice de carga puntual y el tamaño del bloque, según Tablas 2 y 3.

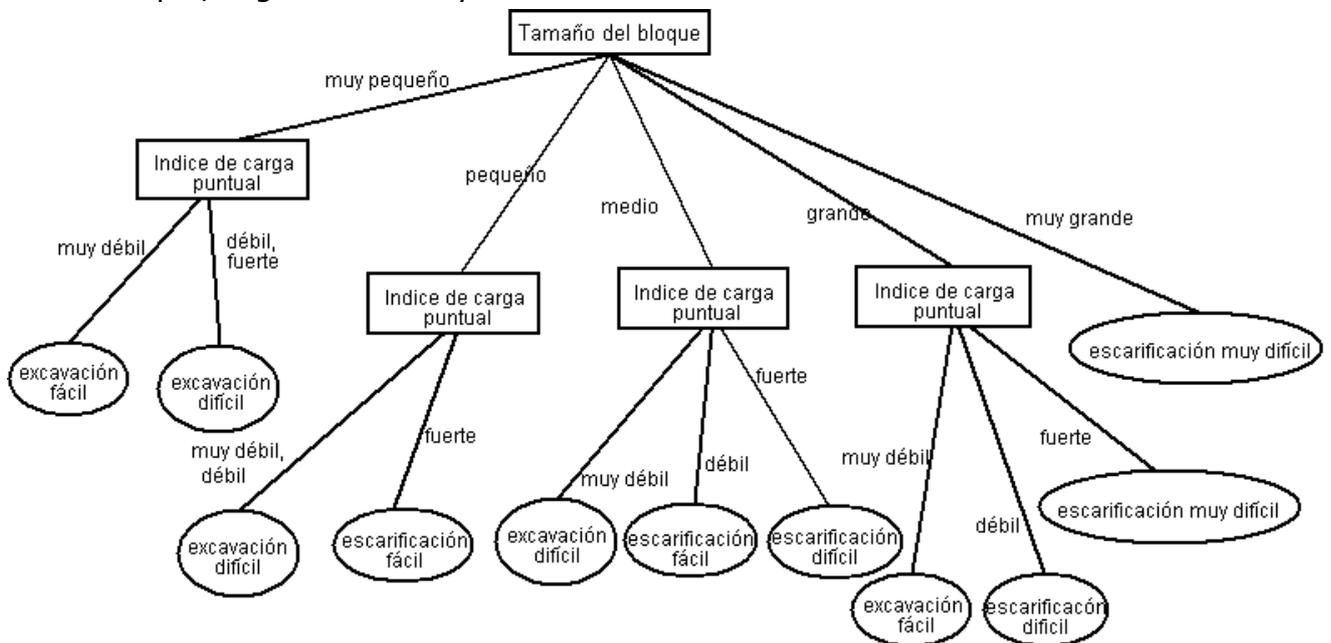


Figura 1. Árbol de decisión para elegir el método de arranque.

En la Tabla 4 se comparan los resultados del método propuesto en la presente investigación y los métodos de excavabilidad descritos por Franklin *et al.* (1971) y Pettifer & Fookes (1994).

Tabla 4. Valoración de los métodos de excavabilidad propuestos para este estudio comparado con los métodos antes usados

Parámetros del macizo rocoso			Métodos de excavación		
Caso	Jv	I _s (MPa)	Franklin <i>et al.</i> (1971)	Pettifer & Fookes (1994)	Hernández-Jatib <i>et al.</i> (2014)
1	5,2	5,1	Voladura	Escarificación muy dura	Escarificación dura o arranque hidráulico
2	33	0,3	Excavación con pala	Excavación fuerte	Excavación fuerte
3	100	0,3	Excavación con pala	Excavación fuerte	Excavación fácil
4	6,25	8,2	Voladura	Escarificación muy dura	Escarificación dura o arranque hidráulico
5	4,05	9,5	Voladura	Voladura	Escarificación dura o arranque hidráulico
6	7,31	7,3	Voladura	Escarificación muy dura	Escarificación dura o arranque hidráulico
7	8,10	8,5	Voladura	Escarificación muy dura	Escarificación dura o arranque hidráulico

Los resultados obtenidos en este estudio, de manera general, son similares a los alcanzados con los métodos referidos anteriormente. Para los casos 1, 4, 6 y 7 los métodos anteriores proponen la utilización de voladura y escarificación muy dura, en la presente investigación se propone solamente la escarificación dura. La clasificación en estas áreas de excavabilidad permite una selección de equipamiento que optimiza la explotación del yacimiento lo que trae aparejado la reducción de los costos.

Para el caso 5 los métodos anteriores proponen la utilización de voladura, este método sugiere la escarificación dura que resulta más eficiente en el sentido de que se logra la granulometría deseada y no es necesario el procesamiento posterior del material extraído.

Para las rocas débiles o blandas (casos 2 y 3) los métodos coinciden en la utilización de la excavación, pero el presente estudio propone la excavación fácil para rocas blandas muy meteorizadas.

4.1. Ejemplificación en el yacimiento El Cacao

El yacimiento El Cacao se ubica en el municipio de Jiguaní, provincia de Granma, Cuba; en él aparecen formaciones vulcanógenas de edad

Paleoceno-Eoceno Medio, representadas por el grupo El Cobre, sobreyacido por calizas de la formación Charco Redondo, del Eoceno Medio (Iturralde-Vinent 1996), como se muestra en la Figura 2.

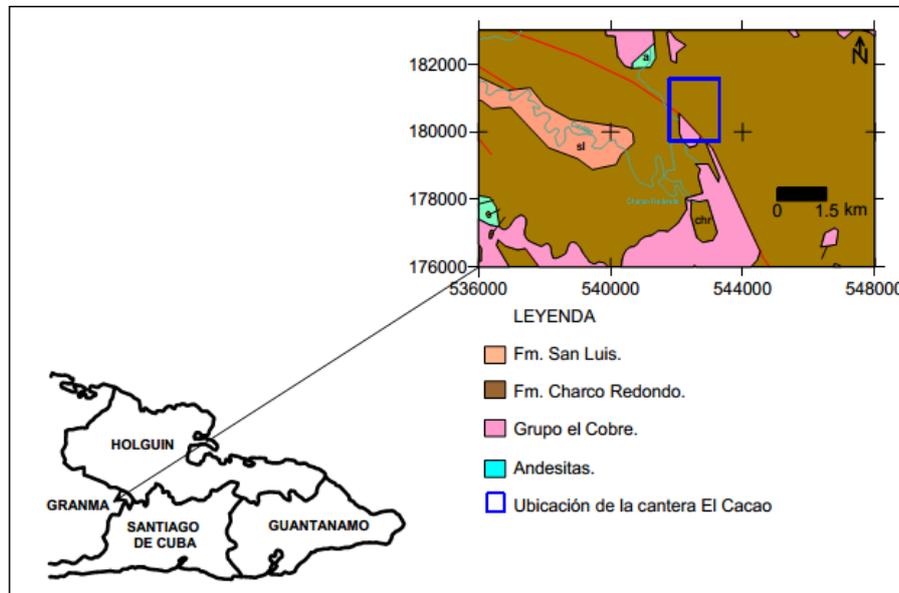


Figura 2. Mapa geológico regional del área.

El macizo que forma el área investigada posee grietas en varias direcciones, las cuales están rellenas en algunas ocasiones por arcillas y calcita recristalizada. En la parte sur del yacimiento se observan calizas con características distintas a las señaladas con anterioridad (areniscas calcáreas estratificadas), y pertenecen a la secuencia inferior del Eoceno Medio.

En el yacimiento existen cinco frentes de arranque, los que se dividen en tres sectores: hacia el suroeste el sector I; hacia el noroeste el sector II y al noreste el sector III.

4.1.1 Análisis estructural del macizo rocoso

El macizo estudiado está afectado por tres familias de grietas, caracterizadas por buzamientos altos, superiores a 70° , como es el caso de las familias 1 y 2, mientras que la familia 3 es de buzamiento subhorizontal (Figuras 3 y 4), y representa la yacencia de los estratos de las rocas carbonatadas.

El espaciado característico para las familias 1, 2 y 3 las clasifica como moderadamente espaciadas, la 1 y la 3, y espaciada la familia 2. Las aberturas que predominan en la familia número 1, 2 y 3 se clasifican como moderadamente abiertas, la 1 y 2, y cerrada la familia 3.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó que las grietas no presentan signos de humedad ni filtración de agua a través de sus superficies (Tabla 5).

Tabla 5. Caracterización del agrietamiento en el yacimiento

No. de familia	Buzamiento	Acimut de buzamiento	Abertura (mm)	Espaciamiento (m)	Relleno
1	83	303	1,09	0,85	Arcilla
2	78	244	1,53	1,43	Arcilla
3	09	042	0,04	0,59	Arcilla

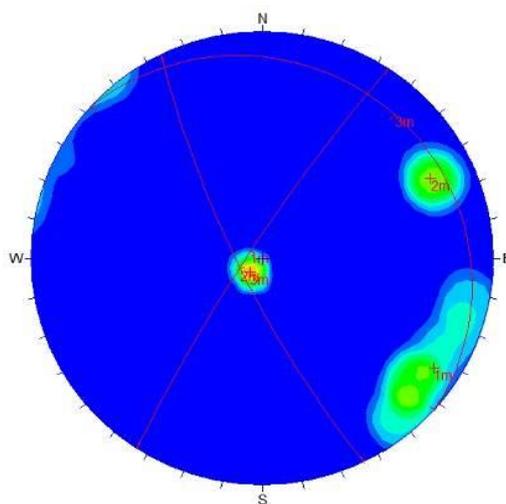


Figura 3. Diagrama de contorno y planos del agrietamiento en el yacimiento El Cacao.

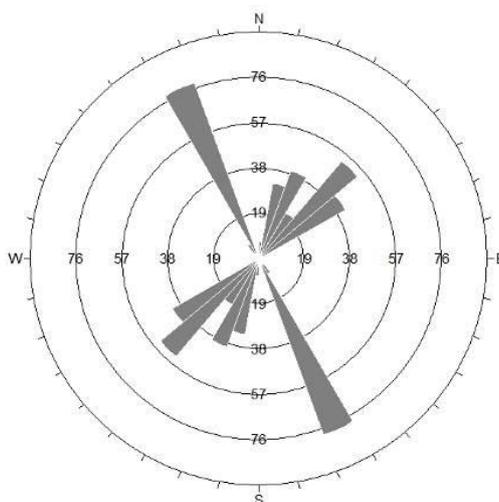


Figura 4. Diagrama de rosetas del agrietamiento en el yacimiento El Cacao.

4.1.2 Propiedades físico-mecánicas de las rocas

Resistencia a la compresión simple

Los datos relacionados con las propiedades de las rocas en el yacimiento objeto de estudio exponen valores para diferentes propiedades; particularmente la resistencia a la compresión simple se comporta como se ilustra en la Figura 5.

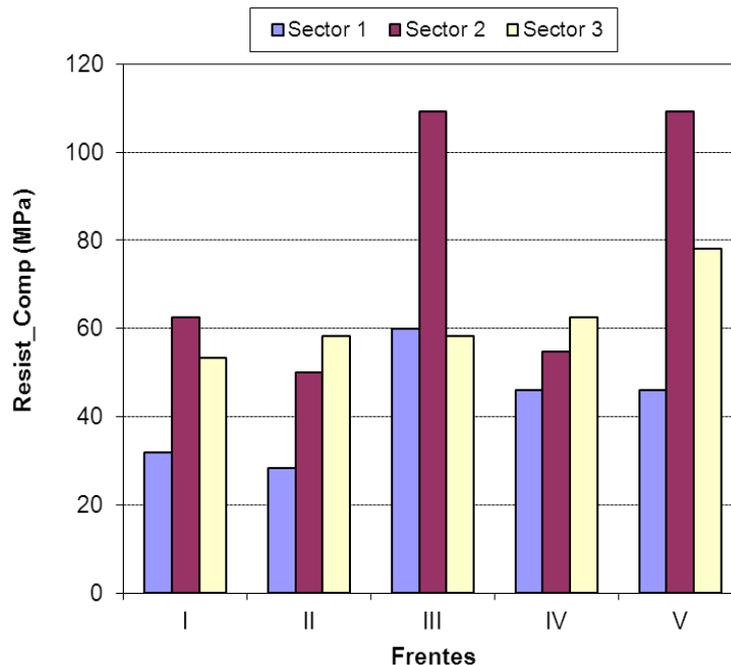


Figura 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión por sectores en cada uno de los frentes.

Como se muestra en la Figura 5, hacia el suroeste (sector I) presenta menores valores de resistencia, con promedio de 42,44 MPa, esto se debe fundamentalmente a que las rocas tienen mayor porosidad, condicionado por la aparición de abundantes grietas en su cercanía a sistemas de fallas, con dirección NE y NW, que se interceptan en las proximidades del sector.

Hacia el noroeste (sector II) las rocas manifiestan mayor resistencia debido a que esta área está más alejada de las fallas presentes, de manera que la intensidad del agrietamiento y porosidad de las rocas es menor.

En el noreste (sector III) las rocas tienen una resistencia promedio de 62,08 MPa.

4.1.3 Índices geomecánicos

La calidad geomecánica es un parámetro numérico que describe, en forma cuantitativa, la calificación de la misma. Se usan generalmente para calificar el macizo rocoso y los utilizados en este procedimiento son: la designación de la calidad del macizo rocoso RQD (Deere *et al.* 1967); el RMR (Bieniawski 1973, 1976, 1979).

El índice RQD se determina con la siguiente expresión:

$$RQD = 115 - 3,3 * J_v$$

$$RQD = 115 - 3,3 * 5,3$$

$$RQD = 97,3$$

De acuerdo con el índice J_v , relacionado con la intensidad del agrietamiento en el macizo rocoso, el RQD se valora entre 90-100 %, mostrando una calidad geomecánica muy buena y una valoración de 20 en la clasificación del RMR.

4.1.4 Clasificación RMR de Bieniawski

Del análisis realizado a 46 pozos, se determina que las clases buenas representan el 2,63 %, las medias el 21,05 %, las malas el 42,10 % y las muy malas el 34,21 %, lo que indica el predominio de clases malas; se obtuvo valores de calidad que varían entre 7 y 65, por lo que se clasifica el macizo entre media y muy mala.

En relación a la distribución espacial de la calidad geomecánica se observa regularidad, ubicándose los valores de calidad media hacia el noroeste, que forma una franja alargada alejada de las fallas del sector; en la parte central del yacimiento se manifiestan los valores de muy mala calidad asociados a zonas de intercepción de fallas y la disposición desfavorable de las familias de grietas con relación a los frentes de explotación, mientras que hacia el este del yacimiento están las calidades medias y/o malas asociadas a cercanías de fallas locales e intensidad de agrietamiento.

4.1.5 Dominios geomecánicos y método de arranque

El procesamiento de la información geomecánica, así como las características litológicas y la distribución espacial de las discontinuidades, permitieron obtener los dominios geomecánicos, definidos como sectores o áreas con semejante comportamiento de las características geomecánicas del macizo rocoso. Se delimitaron dos dominios que se describen a continuación:

- Dominio 1

Ubicación: al noroeste del yacimiento

Área: 551 106,78 m²

Propiedades de las rocas: La resistencia a la compresión es de 1,9 MPa; la porosidad entre 2,5 % y 4,2 %; la absorción entre 0,53 % y 0,56 %; el peso volumétrico entre 2,64 g/cm³ y 2,65 g/cm³; la potencia de 2,6 y 49,6; el tamaño del bloque es grande y las intercalaciones de 18 991 230 m.

- Dominio 2

Ubicación: Está compuesto por varios subdominios ubicados en los límites del yacimiento, bordeando la concesión minera.

Área: 140 321,38 m².

Propiedades de las rocas: La resistencia a la compresión es de 3,25 MPa; la porosidad entre 2,7 % y 3,0 %; la absorción entre 0,51 % y 0,58 %; el peso volumétrico entre 2,66 g/cm³ y 2,80 g/cm³; la potencia de 2,5 y 18,5; el tamaño del bloque es grande y las intercalaciones de 18 991 230 m.

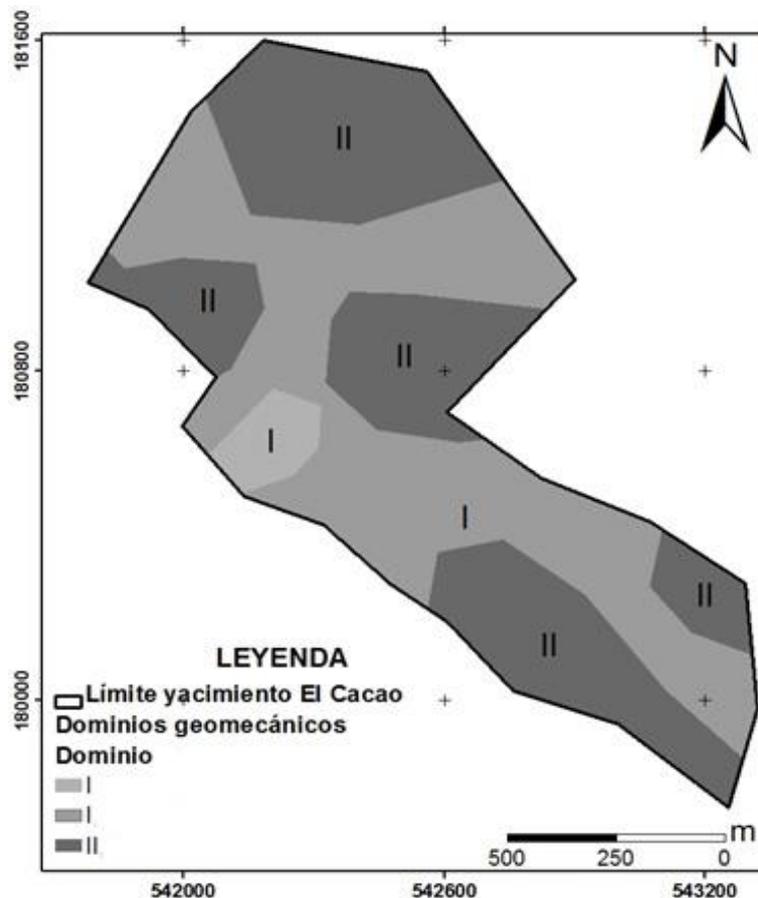


Figura 6. Plano de dominios geomecánicos del yacimiento El cacao.

Basado en la evaluación del yacimiento, y utilizando el sistema de decisiones propuesto, así como la base de datos que contiene valores de resistencia a la compresión (MPa) y espaciamento de las discontinuidades, se realiza la evaluación del yacimiento El Cacao, con vista a la correcta elección del método de arranque de la roca.

El sistema permite definir, como método de arranque para los dominios I y II, la escarificación muy dura o arranque hidráulico. La decisión planteada incide positivamente en el plano ambiental debido a que se obtiene la granulometría deseada directamente en la extracción (proceso de arranque-carga); se pueden explotar yacimientos con estructuras complejas, al permitir la extracción selectiva de los diferentes cuerpos minerales que la componen; y se reduce sensiblemente la generación de polvo, ruido, onda sísmica, comunes en los trabajos de voladura.

5. CONCLUSIONES

- La explotación de los yacimientos de materiales de construcción puede ser realizada utilizando, preferentemente, métodos de arranque mecánico.
- El sistema de decisión propuesto facilita la evaluación de la excavabilidad de la roca y la selección del método de arranque.
- Existen dos parámetros geomecánicos que tienen la mayor influencia en la excavabilidad de la roca: el espaciamento entre discontinuidades y la resistencia a la carga puntual.
- El sistema de decisión que se propone no resuelve el problema del equipamiento para la explotación, pero provee herramientas para facilitar su elección.

6. REFERENCIAS

- BASARIR, H. & KARPUZ, A. 2004: Rippability Classification System for Marls in Lignite mines. *Journal of Engineering Geology* 74(3-4): 303-318.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1973: Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15: 335-344.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1974: Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling. In: Third Congress on Rock Mechanics. ISRM, Denver, 27-32 p.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1976: Rock mass classification in rock engineering. In: Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering, Balkema, Cape Town, 97-106.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1979: Tunnel design by rock mass classifications. Tech. Rep. GL-799-19. U.S. Corp of Eng. WES Vicksburg MS, p. 128-130.

- CATERPILLAR. 2001: Caterpillar Performance Handbook Edition (38th ed). CAT publication, Caterpillar Inc. Illinois, USA.
- CHURCH, H. K. 1981: *Excavation handbook*. McGraw-Hill Inc., New York
- DEERE, D. U.; HENDRON, A. J.; PATTON, F. D. & CORDING, E. J. 1967. Design of surface and near surface construction in rock. Proceedings of the 8th Symposium on Rock Mechanics. American Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum Engineering. Minneapolis, Minnesota, p. 237-302.
- ESPÍ, J. 1999: Las políticas de un sector minero integrado con el desarrollo del país. *Canteras y Explotaciones* 31(376): 50-56.
- FRANKLIN, J. A.; BROCH, E. & WALTON, G. 1971: Logging the mechanical character of rock. *Transactions of the Institution Mining and Metallurgy*, Sec. A.: Mining industry 80, p. A1-9.
- GEHRING, K. H. 1992: Evaluation of Cutting Performance for VASM. Internal Report BBV, 08-04.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I. 2007: *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. 2ª ed. Editorial Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid, 124 p. ISBN 9788478407088.
- HOEK, E. & KARZULOVIC, A. 2000: Rock mass properties for surface mines. En: *Slope Stability in Surface Mining*. HUSTRULID, W. A.; MCCARTER, M. K. & VAN ZYL, D. J. A. (eds). Society for Mining, Metallurgical and Exploration, Littleton, Colorado, p. 59-70.
- ITURRALDE-VINENT, M. 1996: *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*. IGPC Project 364. Special Contribution N. 1.
- KARPUZ, C. A. 1990: Classification System for Excavation of Surface Coal Measures. *Mining Science and Technology* 11(2): 157-163.
- KIRSTEN, H. 1982: Classification system for excavation in natural materials. *The Civil Engineer in South Africa* 24: 293-308.
- LILLY, P. 1986: An Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability. Davidson (ed). In: Large Open Pit Mining Conference. Ausimm, Victoria, p. 89-92.
- LOUIS, C. A. 1974: Reconnaissance par sondages dans les roches. *Annales de institu tech. Du Batiment et des travaux public*. p. 319.
- LUENGO, F. J. & GONZÁLEZ, S. 2004: Definición racional de ripabilidad o volabilidad de los macizos rocosos, factores económicos y técnicos. *Rocas y minerales: Técnicas y procesos de minas y canteras* 391: 42-56. ISSN 0378-3316
- MINTY, E. J. & KEARNS, G. K. 1983: Rockmass Workability, Collected Case Studies. In: *Engineering Geology, Hydrogeology and Environmental Geology*. Editors Knight, Special Publication Geological Society of Australia, No. 11, p. 59-81.
- OVEJERO, R. 1987: *Laboreo de Canteras y Graveras de Áridos: arranque directo y carga*. España.

- PETTIFER, G. S. & FOOKES, P. G. 1994: A Revision of the Graphical Method for Assessing the Excavatability of Rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 27: 145–164.
- ROMANA, M. 1981: New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes. Proc. Int. Symp. Rock Mechanics Mining Civ. Works. ISRM, Zacatecas, Mexico, p. 59-63.
- ROMANA, M. 1994: Clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles. *Ingeopres* 18, abril.
- ROXBOROUGH, F. F. 1987: Cutting Rocks with Picks. *The Mining Engineer* p. 445-455.
- SCOBLE, M. J. & MUFTUOGLU, Y. V. 1984: Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection. *Mining Science and Technology* 1(4): 305-322.
- SINGH, R. N.; DENBY, B. & EGRETLI, I. 1987: Development of a new rippability index for coal measures excavations. Proceedings 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics. Tuscon, A. Z. Balkema, Boston, p. 935-943.
- SINGH, R. N. 1989: Aspects of Ground Preparation by Mechanical Methods in Surface Mining. Symposium of Surface Mining-Future Concepts. Nottingham, April.
- STAPLEDON, D. H. 1968. Discussion of D. F. Coates' Paper Classification of Rock Substances. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract* 5(4): 371–373.
- WEAVER, J. M. 1975: Geological Factors Significant in the Assessment of Rippability. *Civil Engineering in South Africa* 17: 313–316.

Naísma Hernández-Jatib nhjatib@ismm.edu.cu

Máster en Minería. Profesora Auxiliar
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Yiezenia Rosario-Ferrer jessie@ismm.edu.cu

Doctora en Ciencias Informáticas. Profesora Titular
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Yuri Almaguer-Carmenate yalmaguer@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

José Otaño-Noguel joseot@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.