

Elección del método de arranque de las rocas en la cantera de áridos Los Caliches*

Luis Vega Martínez

Especialidad: Ingeniería en Minas

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se aplicó un procedimiento para determinar teóricamente el método de arranque de las rocas que parte del análisis estructural del macizo rocoso, la determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas y de los dominios geomecánicos que lo conforman; información con la cual es posible elegir el método de arranque a partir del gráfico de Karpuz. El procedimiento fue aplicado a la cantera Los Caliches del municipio de Gibara, y se obtuvieron dos dominios, estableciendo el método de arranque por voladura para los dos.

Palabras clave: Arranque de roca; extracción de minerales; dominios geológicos.

* Trabajo tutorado por la M. Sc. Naísma Hernández Jatib y el Dr. Yuri Almaguer Carmentate.
Recibido: 12 noviembre 2014 / Aceptado: 25 febrero 2015.

Selection of a rock digging method for the aggregate quarry Los Caliches

Abstract: A procedure was applied for the theoretical identification of a rock digging method. This procedure is based on the structural analysis of the rocky massif, the identification of the physical and mechanical properties of rocks and the geo-mechanical domains the rocky massif is made up. Based on this information it is possible to select the digging method from the Karpuz chart. The procedure was applied to the quarry Los Caliches located in the municipality of Gibara. Two domains were obtained and the blasting-based digging method was chosen for both.

Key words: Rock digging; ore mining.

Introducción

En tiempos remotos la extracción de los recursos naturales del macizo rocoso se realizaba manualmente por la poca mecanización y la falta de tecnología existente. Con el desarrollo y la mecanización industrial se han incrementado las opciones para la extracción de los minerales.

La elección del método de arranque depende, ante todo, de las propiedades de las rocas en el macizo, presencia de medios técnicos y exigencias a la calidad de la materia prima. La excavación de las rocas blandas se puede realizar con cualquier equipo de arranque, en este caso, la preparación se conjuga con la excavación y se ejecuta con el mismo equipo. En las rocas duras se realiza con equipos de mayor fuerza y deben ser preparadas para la excavación por métodos con explosivos.

La correcta elección de los métodos de arranque de las rocas durante la explotación minera, en función de las condiciones concretas de cada macizo rocoso, constituye un aspecto esencial que garantiza el éxito de dicho proceso. De ahí la necesidad de realizar estudios que permitan argumentar de forma científico-técnica y económicamente factible su empleo en el yacimiento Los Caliches, pudiendo esto ahorrar miles de pesos por concepto de gastos de explosivos y servicios, por ello el objetivo es elegir el método de arranque de las rocas más racional para la explotación del yacimiento Los Caliches.

Clasificaciones de excavabilidad

La excavabilidad se define como la facilidad que presenta un terreno para ser excavado. Ha sido estudiada por Franklin, Broch & Walton (1971); Franklin (1977); Romana (1981, 1994); Kirsten (1982); Scoble & Muftuoglu (1984), entre otros, que propusieron clasificaciones para la minería subterránea. Noa (2006) propuso una metodología para la determinación del método de arranque en excavaciones subterráneas. Por su parte, Franklin, Broch & Walton (1971); Weaver (1975); Kirsten (1982); Scoble & Muftuoglu (1984); Karpuz (1990); Pettifer & Fookes (1994) establecieron clasificaciones de excavabilidad para las labores a cielo abierto.

La clasificación de excavabilidad propuesta por Franklin, Broch & Walton (1971) tiene varias limitaciones: no hay una elección del tipo de maquinaria de arranque a utilizar ni de sus capacidades, no se realiza un análisis para valorar 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; en ella se utiliza la resistencia a la compresión de las rocas, cuando lo correcto sería utilizar la resistencia del macizo (Noa, 2006). En este caso, el índice de espaciado entre grietas es un valor promedio, por lo que su medida es aproximada y requiere que se acompañe de un histograma o se presente a través de intervalos de variación. En esta metodología se proponen cuatro zonas o regiones, de acuerdo con los valores de los parámetros medidos, pero no se especifican los tipos de maquinarias de arranque a utilizar ni sus capacidades. Este es un criterio que debe ser evaluado en la cantera Los Caliches.

Basándose en la clasificación dada por Louis (1974), Romana (1981) presentó una nueva propuesta, la cual estaba más adaptada a las capacidades tecnológicas de la maquinaria de excavación. Posteriormente, Romana (1994) ofreció 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.

Esta clasificación es indicativa y debe usarse en la fase de estudios previos o anteproyectos de obras. Scoble & Muftuoglu (1984) fundamentaron su clasificación en la determinación de un índice de escalabilidad del macizo rocoso, mediante la utilización de la expresión $IE = W + S + J + B$. Donde: W -Grado de alteración del macizo rocoso, determinado en las paredes de las excavaciones; S -Resistencia de la compresión simple; J -Distancia entre grietas; B -Potencia de los estratos.

Ovejero (1987) consideró que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de las rocas es, sin duda, en el arranque de rocas, el parámetro más significativo. Es una característica de las que las clasifican significativamente con respecto a su dureza y se viene utilizando tradicionalmente para clasificarlas en cuanto a su escarificación o volabilidad. Aunque, si bien es un parámetro muy significativo, no debe ser tenido en cuenta aisladamente como "decisor único", sino visto en conjunto con otros factores del macizo rocoso a considerar, como el comportamiento mecánico de la roca. Singh, Denby & Egretli (1987) también propusieron 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 basadas en las ondas P (Church, 1981; Caterpillar, 2001).

Hadjigeorgiou & Scoble (1990) expusieron un sistema de clasificación empírica para evaluar la facilidad de excavación de los macizos rocosos combinando los valores de cuatro parámetros geomecánicos: resistencia bajo carga puntual, tamaño de bloque, alteración y disposición estructural relativa.

$$IE = (I_s + B_s)W*J_s$$

I_s = índice de resistencia bajo carga puntual

B_s = índice de tamaño de bloque

W = índice de alteración

J_s = índice de disposición estructural relativa.

Tanto la resistencia como el tamaño de bloque son dos de los parámetros más importantes que condicionan la propagación de la rotura a través del material y la facilidad de excavación. Estos dos parámetros configuran el núcleo o estructura básica del sistema de clasificación. En algunos casos, la mayor alteración o meteorización de los materiales rocosos puede ayudar a hacer una excavación más fácil, razón por la cual aparecen en la expresión anterior. De igual manera, la disposición espacial de la estructura rocosa, con respecto a las direcciones y sentidos de los elementos de arranque, juega un papel significativo que afecta a la escalabilidad de los macizos, y es por ello que también interviene en el sistema de evaluación.

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: resistencia a la tracción y espaciado entre discontinuidades, estimado a partir del índice de carga puntual; grado de meteorización, conseguido mediante observación visual; y grado de abrasividad, obtenido por medio del índice de Cercha. A partir de este índice los autores clasificaron los macizos rocosos en cinco grupos de acuerdo a la facilidad de arranque mecánico de la roca. La propuesta alcanzada por Singh, Denby & Egretli (1987) para evaluar la facilidad del arranque con medios mecánicos se toma como acertada para el caso en estudio, y registra parámetros geomecánicos para proceder a la clasificación de los macizos rocosos que se ajustan a las condiciones dadas y que, además, propone la maquinaria para distintos grupos de macizos.

Criterios para definir el método de arranque de la roca

Las propiedades físico-mecánicas tienen una gran importancia en la elección del método de arranque de las rocas, ya que de acuerdo con su dureza se determina cuando una máquina puede o no laborear una roca sin un mullido previo.

En los trabajos de perforación y voladura tiene un gran significado la correcta valoración de la anisotropía, la resistencia, el clivaje, el agrietamiento, así como la estratificación del macizo, ya que la fragmentación de las rocas con explosivos ocurre siempre por las superficies de debilitamiento (Noa, 2006).

Para elegir el método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales de pequeña y mediana sección en Cuba oriental, estudiados por Noa (2006), se tuvo en cuenta un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilitan con su empleo lograr su correcta elección, las cuales se fundamentan en: el análisis de las características ingeniero-técnicas de la obra; caracterización geomecánica del macizo; determinación del grado de bloquicidad del macizo y evaluación de la estabilidad del macizo. Agrupando estas por su orden se evalúan diferentes factores como: forma, dimensiones, profundidad de la excavación, tamaño de los bloques; génesis, afloramientos, elementos de yacencia; así como la correspondiente valoración hidrogeológica; propiedades como: resistencia del macizo, abrasividad, dureza, porosidad, presencia de agua en rocas, entre otras.

Del análisis se puede sintetizar que los sistemas han sido propuestos tanto para la evaluación general de la excavabilidad en operaciones específicas como el escarificado, así como para aplicaciones particulares en la explotación a cielo abierto. Cada sistema considera un conjunto diferente de parámetros geotécnicos, pero la mayoría incluye factores para la tensión de la roca intacta y el grado de fracturación del macizo rocoso. La velocidad de las ondas sísmicas, que depende de la tensión de la roca, la densidad, la intensidad de fracturación y la erosión ha sido ampliamente utilizada desde 1960 y es un factor importante en varios de los sistemas.

Existen diferentes clasificaciones de excavabilidad, unas referidas a las excavaciones subterráneas, y otras a obras civiles y explotaciones a cielo abierto, propuestas por diferentes autores. Ninguna integra todos los parámetros sino que lo hacen de manera aislada, como es el caso de las discontinuidades presentes en los macizos rocosos;

aspecto de gran influencia en el proceso de excavación, ya que en las rocas duras, más que un corte de estas, se realiza un arranque aprovechando los pianos 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.

Elección del método de arranque de la roca en el yacimiento Los Caliches

Para la elección del método de arranque más racional en el yacimiento objeto de estudio se tomó como punto de partida el procedimiento propuesto por Hernández *et al.* (2014), en el cual se proponen los siguientes pasos:

- Análisis estructural del macizo;
- Determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas;
- Análisis de los índices geomecánicos (RQD, RMR);
- Determinación de dominios geomecánicos;
- Elección del método de arranque.

Análisis estructural del macizo rocoso

La cantera objeto de estudio presenta un notable deterioro en su desarrollo minero y no fue posible realizar este estudio en todos los sectores de la misma, por lo que el análisis se concentró en las zonas que actualmente se encuentran en explotación. El procesamiento se realizó aplicando las técnicas de proyección estereográfica para lo cual se usó el software Dip. Versión 5.103. Como resultado se obtuvieron las familias de discontinuidades a continuación referidas.

Se determinaron tres familias de discontinuidades en el macizo, las cuales se pueden observar en los diagramas de contorno y de rosetas (Figuras 1 y 2). Las direcciones que predominan son: familia 1: 70/100, familia 2: 40/189 y familia 3: 23/153; con una dirección de buzamiento SE-E, SO-S, SE-S, respectivamente. La familia 1 tiene un buzamiento alto, superiores a 45 grados, mientras que las familias 2 y 3 son de buzamiento bajo.

El espaciado característico para las familias 1, 2 y 3 son: 1,2; 0,5 y 1,6; respectivamente. Se clasifican como cerradas las familias 1 y 3 y muy cerrada la familia 2 (Tabla 1).

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 y que la distancia promedio entre grietas es de 1,50 m, por lo que según la clasificación brindada por Bieniawski (1976), referente al espaciamiento de juntas, el macizo se clasifica como masivo (Tabla 2).

Tabla 1. Clasificación de las trazas de las grietas

Descripción	Espaciamiento (mm)
Extremadamente cerrado	< 20
Muy cerrado	20 - 60
Cerrado	60 - 200
Moderadamente espaciado	200 - 600
Espaciado	600 - 2000
Muy espaciado	2000 - 6000
Extremadamente espaciado	Extremadamente espaciado > 6000

Tabla 2. Valoración referente al espaciamiento de juntas, recomendada por Bieniawski (1976)

Descripción del espaciamiento	Espacio entre juntas	Tipo de macizo rocoso
Muy ancho	>3 m	Sólido
Ancho	1-3 m	Masivo
Moderadamente cerrado	cerrado 0,3 - 1 m	En bloques
Cerrado	0,05 - 0,3 m	Fracturado
Muy cerrado	< 0,05 m	Triturado

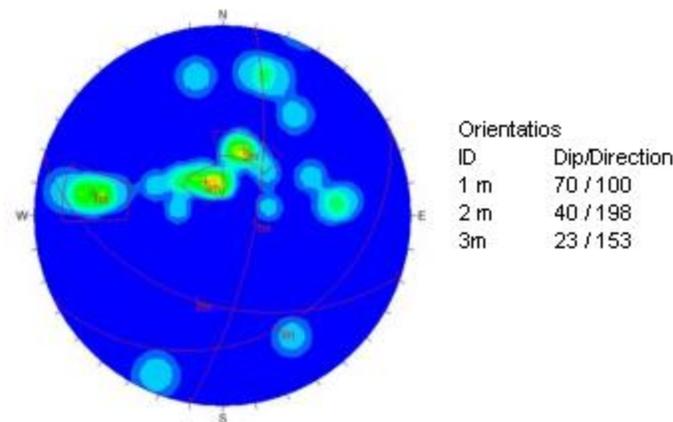


Figura 1. Diagramas de contorno del yacimiento Los Caliches.

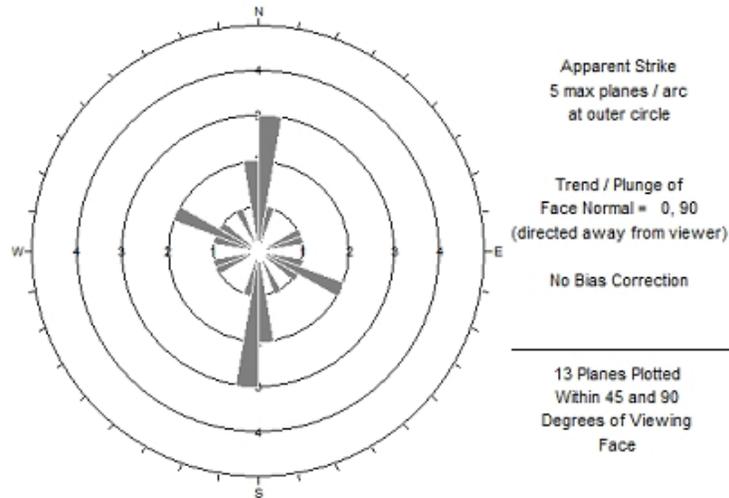


Figura 2. Diagrama de rosetas del yacimiento Los Caliches.

Tabla 3. Caracterización de agrietamiento en el yacimiento Los Caliches

No. de familia	Buzamiento	Acimut de buzamiento	Abertura (mm)	Espaciamiento (m)	Relleno
1	70	100	1,2	1,3	Arcilla
2	40	189	0,5	1,55	Arcilla
3	23	153	1,6	1,45	Arcilla

Determinación de las propiedades mecánicas de las rocas

En los estudios del yacimiento se hace referencia a tres tipos de materias primas descritos en el punto siguiente; básicamente estos se diferencian por su resistencia a la compresión (R_c).

Observación: Los valores de las propiedades físicas que se relacionan fueron extraídos de los informes del yacimiento.

Las características tecnológicas que presenta el mineral extraído de la cantera Los Caliches son las siguientes:

Peso volumétrico promedio: 2,69;

Absorción promedio: 0,97 %;

Resistencia a la compresión promedio: 94,26 MPa.

Tipos tecnológicos de la materia prima:

Primer tipo (caliza resistente): Es el que más predomina en el yacimiento;

Rc: ≥ 89 MPa

Materia prima resistente, poco absorbente y poco porosa;

Segundo tipo (caliza de resistencia media): Se encuentra muy bien enlazada con el primer tipo y en muchos casos es imposible distinguirla aisladamente. Microscópicamente se diferencia en que es una caliza organógeno detrítica, presentando organismos de color blanco y blanco crema al igual que la otra masiva y dura. Tecnológicamente sus propiedades son similares, siendo su resistencia mayor de 48 MPa, poco absorbente, poco porosa, duras, compactas, masivas. Químicamente estas rocas son puras sin elementos nocivos.

Tercer tipo (caliza poco resistente): Presenta una resistencia menor de 30 MPa, son calizas que contienen rocas débiles, poco resistentes, untuosas al tacto. Se presenta como una caliza brechosa, blanca, bastante fracturada con granos gruesos de los otros tipos de calizas, no debiéndose usar como material de la construcción según se expresa en las normas de calidad.

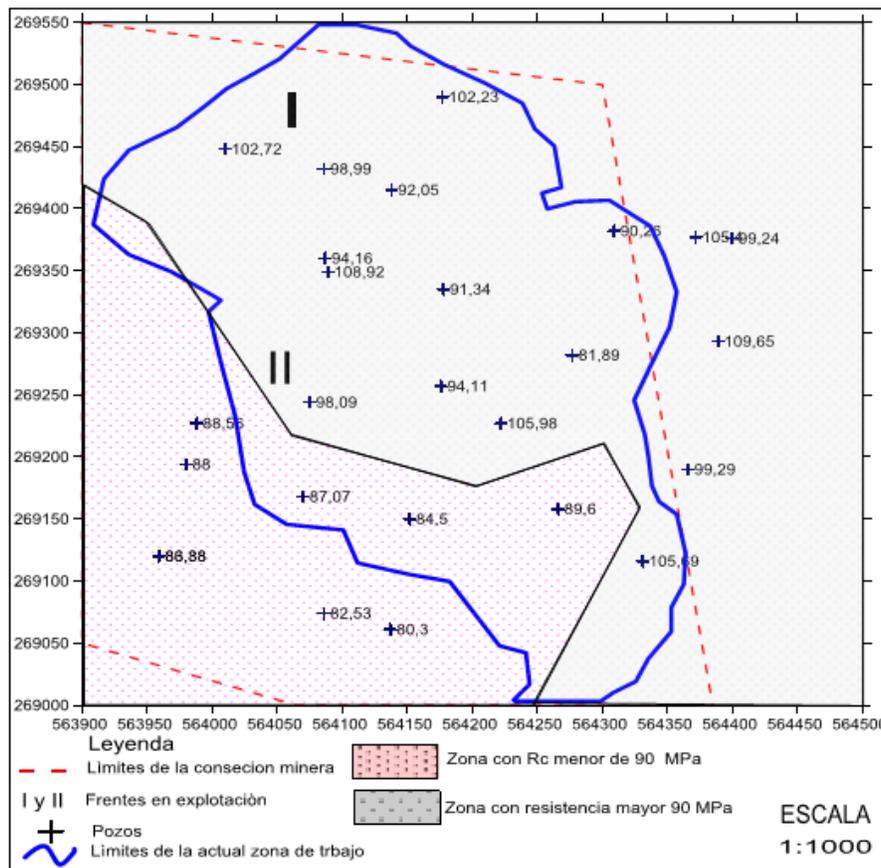


Figura 3. Plano de ubicación de las zonas con las propiedades resistentes de las rocas por pozos.

Análisis de los índices geomecánicos

Índice de calidad de la roca (RQD, RMR)

El índice RQD se determina con la expresión: $RQD = 115 - 3.3 * R$
 $QD = 115 - 3,3 * (100/150) = 112,8$

$$Jv = \sum \frac{100}{S_i}$$

S_i : espaciamiento medio entre juntas (m).

Según la Tabla 4 se clasifica el macizo como de muy buena calidad.

Tabla 4. Clasificación de las rocas según RQD Bieniawsky (1976)

RQD	Tipo de roca
≥91	Muy buena
76 - 90	Buena
51 - 75	Media
26 - 50	Mala
0 - 25	Muy mala

Cálculo del RMR:

La clasificación consiste en la obtención de un índice de calidad del macizo rocoso denominado *Rock Mase Rating* (RMR); para el cálculo del mismo se tuvieron en cuenta cinco parámetros:

1. Rc
2. RQD
3. Espaciamiento entre grietas
4. Estado de las diaclasas
5. Agua freática.

Luego se suman todos estos parámetros y se obtiene un valor del RMR, el cual arroja el valor de la calidad del macizo; por lo que podemos decir que estamos en presencia de un macizo de muy buena calidad, según se muestra en la Figura 4.

$$RMR=7 + 20 +25 +20 +10$$

$$RMR=82$$

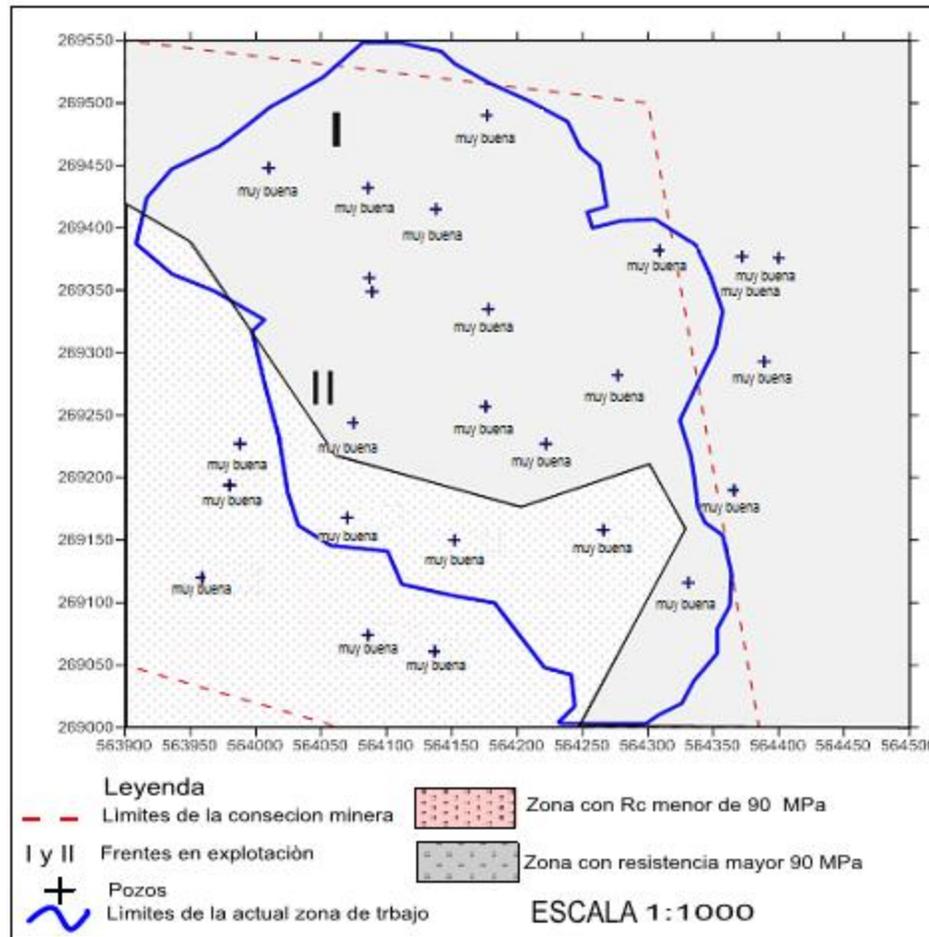


Figura 4. Plano de representación de la calidad geomecánica según el índice RMR y RQD.

Determinación de dominios geomecánicos

El procedimiento parte de la integración de los mapas de factores geológicos y geomecánicos para obtener un modelo general que permite la delimitación de primer orden de los dominios, y la delimitación de segundo orden se realiza de acuerdo a las franjas protectoras de las cuencas hidrográficas y el límite de la concesión del yacimiento. Para lo cual se confeccionó el mapa de la Figura 5 en el que se ilustran las dos zonas en las que se dividió el área de estudio para su análisis; para realizar esta división solo se tuvo en cuenta la resistencia a la compresión de las rocas pues este es el único parámetro que varía.

Dominio 1

Ubicación: Se ubica al norte del yacimiento. Propiedades de las rocas: La resistencia a la compresión de las rocas varía entre 109,65 MPa y 90,26 MPa; con un valor

promedio de 97,41 MPa; la absorción entre 1,82 y 0,49; el peso volumétrico promedio de esta zona es de 2,69 g/cm³.

Dominio 2

Ubicación: Se encuentra ubicado al sur-oeste del yacimiento. Propiedades de las rocas: La resistencia a la compresión de las rocas varía entre 89,6 MPa y 80,3 MPa; con un valor promedio de 85,53 MPa; la absorción entre 1,78 y 0,72 y el peso volumétrico entre 2,71 g/cm³ y 2,65 g/cm³.

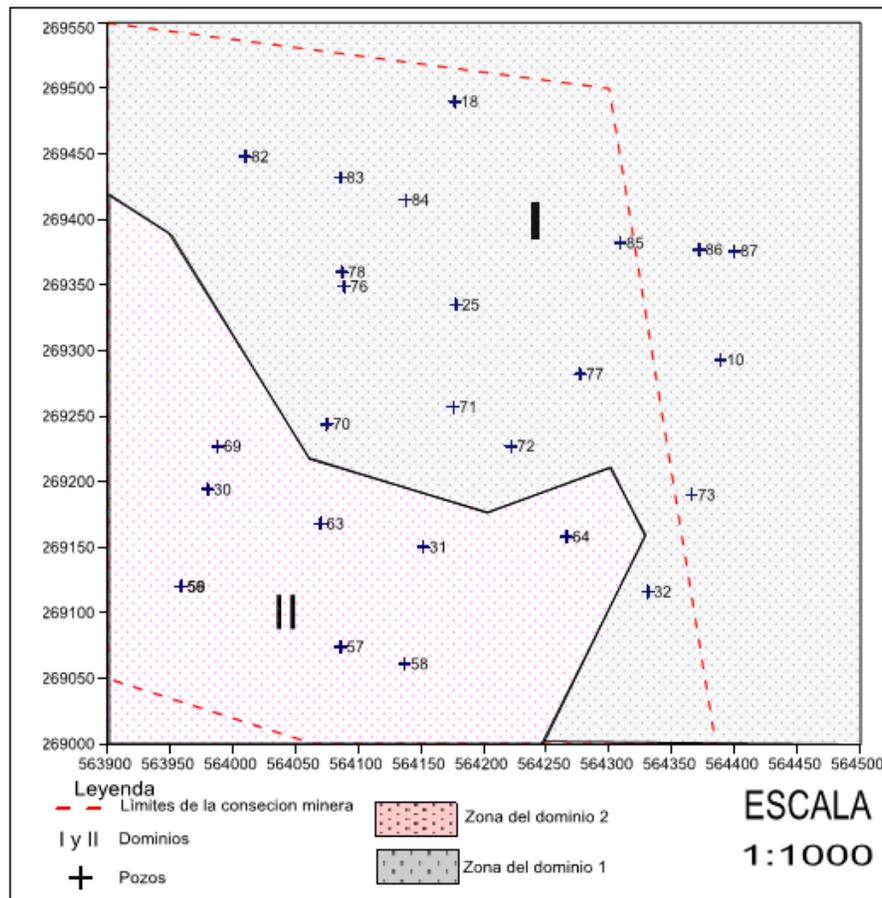


Figura 5. Plano de dominios geomecánicos.

Elección del método de arranque

Para la elección del método de arranque se parte de los dominios del yacimiento caracterizados por condiciones geológicas y geomecánicas que permiten la aplicación del procedimiento planteado por Karpuz (1990), quien propuso un gráfico de excavabilidad con nuevas subdivisiones para los límites de operación de varias

categorías de excavaciones de rocas. Los ejes tienen escalas logarítmicas como el presentado por Franklin, Broch & Walton (1971), basándose en el espacio entre discontinuidades y la resistencia de carga puntual.

En el gráfico se definen siete áreas de excavabilidad: voladura, escarificación o arranque hidráulico extremadamente duro, escarificación muy dura, escarificación dura, escarificación fácil, excavación difícil y área de excavación fácil. La frontera entre las áreas de igual escarificación se muestra en dirección opuesta a la frontera entre la escarificación y voladura del gráfico original (Franklin, Broch & Walton, 1971). Esto refleja la dificultad en las condiciones de escarificación en rocas relativamente débiles con un amplio espacio de discontinuidad y en rocas extremadamente fuertes. Las nuevas fronteras son esencialmente lineales por encima de su sección central.

En la Figura 6 se muestra el gráfico de excavabilidad del yacimiento Los Caliches, en el que se representa el área a que pertenecen las rocas, a partir de la combinación del índice resistencia a la compresión simple (MPa) y el índice de discontinuidad (m). Como muestra el gráfico las rocas se agrupan según la fortaleza de su estructura en moderadamente fuertes y fuertes, y de acuerdo al índice de espaciamiento se agrupa como grande, según el tamaño de bloque. Esta ubicación permite definir como método de arranque: voladura.

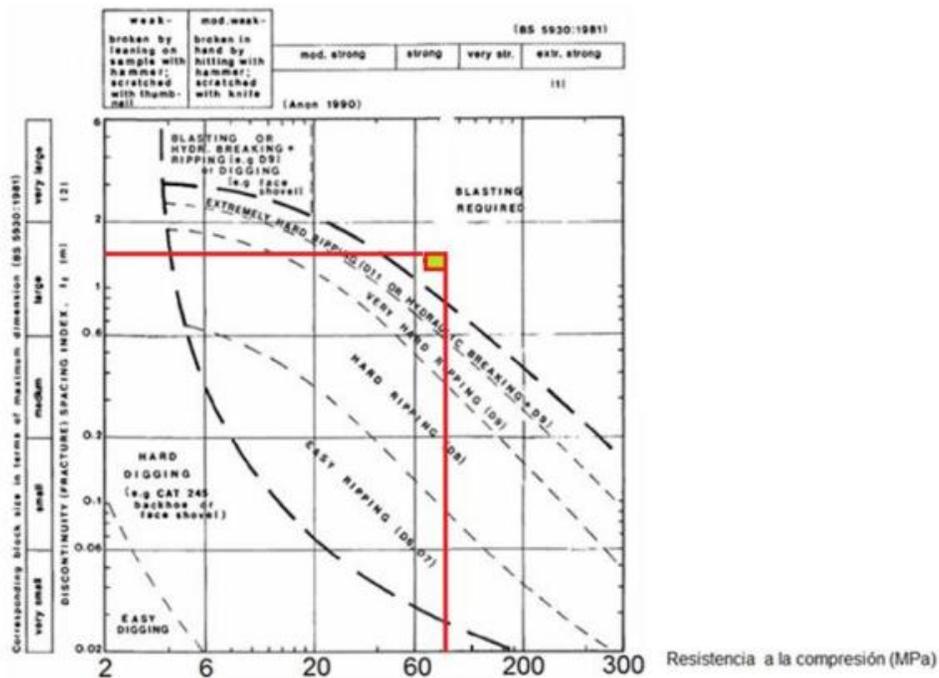


Figura 6. Gráfico de excavabilidad de la roca (Karpuz, 1990).

Conclusiones

La aplicación del procedimiento en el yacimiento Los Caliches, a partir del análisis estructural del macizo, las propiedades físico-mecánicas y el establecimiento de los dominios geomecánicos, permitieron definir que el método más racional de arranque a utilizar es: voladura.

Este método corrobora el aplicado en el yacimiento con anterioridad, sin embargo, de existir un estudio detallado de la geología es posible establecer en varias zonas métodos de arranque combinados, aprovechando los planos de discontinuidades existentes.

Referencias bibliográficas

- BIENIAWSKI, Z. 1976: *Tunnel design by rock mass classifications*. Tech. Rep. GL-799-19. U.S. Corp of Eng. WES Vicksburg MS, 128-130.
- CATERPILLAR. 2001: *Caterpillar Performance Handbook Edition* (38th ed). CAT publication, Caterpillar Inc. Illinois, USA.
- CHURCH, H. 1981: *Excavation handbook*. McGraw-Hill Inc., New York.
- FRANKLIN, J.; BROCH, E. & WALTON, G. 1971: Logging the mechanical character of rock. *Institution of Mining and Metallurgy*, 1-9.
- FRANKLIN, J. 1977: The monitoring of structures of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 14(4): 163-192.
- HADJIGEORGIOU, J. & SCOBLE, M. 1990: Ground Characterization for assessment of ease of excavation. In: *Proceedings of international seminar on mine planning and equipment selection*. November, Calgary, Canadá, 323-331.
- HERNÁNDEZ, N.; ALMAGUER, Y.; ROSARIO, Y. & OTAÑO, J. 2014: Determinación del método de arranque de la roca en la cantera Pilón, Mayarí. *Minería y Geología* 30(2): 42-57.
- KARPUZ, C. 1990: A Classification System for Excavation of Surface Coal Measures. *Mining Science and Technology* 11(2): 157-163.

- KIRSTEN, H. A. D. 1982: A classification system for excavation in natural materials. *Civil Engineer in South Africa* 24(7): 293-295.
- LOUIS, C. 1974: Reconnaissance par sondages dans les roches. *Annales de institu tech. Du Batiment et des travaux public.* p. 319.
- NOA, R. 2006: Indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales de pequeña y mediana sección en Cuba oriental. *Minería y Geología* 22(4).
- PETTIFER, G. & FOOKES, P. 1994: A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 27(2): 145-164.
- OVEJERO, R. 1987: *Laboreo de Canteras y Graveras de Áridos: arranque directo y carga.* España.
- 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, 59-63.
- ROMANA, M. 1994: Clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles. *Ingeopres* 18.
- SINGH, R.; 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, 935-943.
- SINGH, R. 1989: Aspects of Ground Preparation by Mechanical Methods in Surface Mining. Symposium of Surface Mining-Future Concepts. Nottingham, April.
- SCOBLE, M. & MUFTUOGLU, Y. 1984: Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection. *Mining Science and Technology* 1(4): 305-322.
- WEAVER, J. M. 1975: Geological Factors Significant in the Assessment of Rippability. *The Civil Engineering in South Africa* 17(12): 313-316.