Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez Facultad de Geología – Minerías
Departamento de Minas

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero de Minas

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

Diplomante: Luis Vega Martínez

Tutor (es): MSc. Naisma Hernández Jatib
Dr.C. Yuri Almaguer Carmenate

Curso
2013 – 2014
Año 56 de la Revolución

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi familia en especial a mis padres que son quienes se han sacrificado a lo largo de estos cinco años para que a día de hoy yo pueda optar por el título de Ingeniero de Minas.

Agradecimientos

La realización de esta tesis de diploma no hubiese sido posible sin la colaboración de muchas personas a las cuales quiero agradecerle desde lo más profundo de mi corazón. A mi novia quien me ha brindado su apoyo incondicional en todo momento, a mi tutora y al Dr. C. Yuri Almaguer que han estado dispuesta a colaborar con mi trabajo continuadamente y a mis amigos y compañeros de grupo con quienes he compartido a lo largo de estos años.

Pensamiento

Los jóvenes de estos tiempos tienen una batalla campal para alcanzar la libertad económica de nuestros países, para alcanzar la libertad más allá de lo soñado, para que cada uno de nosotros sea dueño de su alma, capitán de su destino.

Nelson Rolihlahla Mandela

Resumen

En Cuba, la explotación de canteras de materiales para la construcción se realiza empíricamente, escogiendo los métodos de arranque en función de la experiencia práctica de los especialistas. Se aplicó un procedimiento para determinar teóricamente el método de arranque de las rocas. El procedimiento 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 Gibara, y se obtuvieron dos dominios, estableciendo el método de arranque por voladura para los dos.

ABSTRACT

In Cuba, quarrying of construction materials is carried out empirically, based on practical experience of specialists. This paper aims to propose a procedure to theoretically determine the breaking-ground method of rocks. The procedure begins with the structural analysis of the rock mass, the determination of the physical-mechanical rock properties and the geo-mechanics domains that comprise it, information with which it is possible to choose the breaking-ground method from the graph of Karpuz. The procedure was applied in the quarry of Los Caliches in the district of Gibara and two domains were obtained, establishing the blasting method for the first domain.

Índice

INTRODUCCIÓN 1

Problema 2

Objeto de estudio 2

Campo de acción 2

Objetivos generales 2

Hipótesis: 2

Objetivos específicos: 2

CAPÍTULO I: ANÁLISIS DE LOS ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS Y ACTUALIDAD DE LA TEMÁTICA 3

1.1. Introducción 3

1.2. Breve actualización sobre los métodos de arranque en la minería a cielo abierto 3

1.3. Generalidades sobre el arranque de rocas 5

1.4. Clasificaciones de excavabilidad 6

1.5 Clasificaciones de los macizos rocosos y la estimación de la excavabilidad. 15

1.6 Criterios para definir el método de arranque de la roca 20

1.7 Actualidad y situación del tema en Cuba 22

CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOGRÁFICA DEL YACIMIENTO LOS CALICHES 24

2.1 Ubicación geográfica 24

2.2. Relieve 25

2.3. Características geológicas del yacimiento 25

2.4. Tectónica 27

2.5 Morfología estructural y tectónica del yacimiento 27

CAPÍTULO III: ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ARRANQUE DE LA ROCA EN EL YACIMIENTO “LOS CALICHES” 29

3.1. Análisis estructural del macizo rocoso 29

3.2. Determinación de las propiedades mecánicas de las rocas 31

3.3. Análisis de los índices geomecánicos - Índice de calidad de la roca (RQD, RMR) 33

3.4. Determinación de dominios geomecánicos 35

3.5. Elección del método de arranque 37

Conclusiones 40

Recomendaciones 41

Bibliografía 42

Anexos 44

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Valoración de la excalabilidad de los macizos rocosos propuesto por Scoble y Muftuoglu (1984). 9
Tabla 1. 2. Factores de ponderación de los parámetros del índice de volabilidad. 11
Tabla 1. 3. Nuevo sistema de evaluación del índice de Excavabilidad (Hadjigeorgiou y Scoble, 1988). 12
Tabla 1. 4. Clasificación de macizos rocosos según su escarificación. 14
Tabla 1. 5. Clasificación de los terrenos respecto a la excavabilidad (Romana, 1994). 17

Tabla 2. 1. Coordenadas de la concesión minera del yacimiento. 24

Tabla 3. 1. Clasificación de las trazas de las grietas. 30
Tabla 3. 2. Valoración referente al espaciamiento de juntas, recomendada por Bieniawski (1976). 30
Tabla 3. 3. Caracterización de agrietamiento en el yacimiento Los Caliches. 31
Tabla 3. 4. Clasificación de las rocas según RQD Bieniawsky (1976). 34

Índice de figuras

Figura 1.1 Clasificación propuesta por Franklin (1971, 1997). 7
Figura 1.2. Clasificación propuesta por Louis (1974). 16
Figura 1.3 Clasificación propuesta por Romana Ruíz (1981, 1994). 17
Figura 1.4. Clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden (1983). 19

Figura 2. 1 Ubicación geográfica y geológica del área. 25

Figura 3. 1 Diagramas de contorno del Yacimiento los Caliches. 31
Figura 3. 2 Diagrama de rosetas del Yacimiento Los Caliches. 31
Figura 3. 3 Plano de ubicación de las zonas con las propiedades resistentes de las rocas por pozos. 33
Figura 3. 4 Plano de representación de la calidad geomecánica según el índice RMR y RQD. 35
Figura 3. 5 Plano de dominios geomecánicos 37
Figura 3. 6 Gráfico de excavabilidad de la roca (Karpuz *et al.* 1990). 39

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 en ese momento. Esto traía como consecuencia que los mineros murieran por los grandes riesgos a los que estaban expuestos y que fueran sometidos a inhumanas jornadas laborales. Con el desarrollo y la mecanización industrial se han incrementado las opciones para la extracción de los minerales, dentro de los métodos de arranque de las rocas más difundidos encontramos: el arranque con perforación y voladura y el arranque mecánico. El empleo de estos métodos está determinado por las condiciones geotécnicas del macizo fundamentalmente; por lo que la elección del método de arranque está estrechamente vinculada a las demás etapas del proceso productivo.

La **situación problémica** relacionada con la temática tratada se caracteriza por la siguiente regularidad.

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 aquí 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.

Problema

La necesidad de elegir el método de arranque de las rocas en el yacimiento de áridos para la construcción Los Caliches.

Objeto de estudio

Los métodos de arranque.

Campo de acción

El yacimiento: Los Caliches

Objetivos generales

Elegir el método de arranque de las rocas más racional para la explotación del yacimiento Los Caliches.

Hipótesis:

Si se conocen las condiciones de aplicación de los diferentes métodos de arranque, la estructura del macizo, las propiedades físico-mecánicas de las rocas y los índices geomecánicos, entonces es posible elegir el método de arranque de las rocas para la explotación del yacimiento Los Caliches

Objetivos específicos:

1. Determinar las condiciones de aplicación de los diferentes métodos de arranque.
2. Caracterizar estructuralmente el yacimiento.
3. Determinar las propiedades físico-mecánicas de las rocas.
4. Determinar los índices geomecánicos.
5. Definir dominios geomecánicos.
6. Proponer el método de arranque de las rocas.

CAPÍTULO I: ANÁLISIS DE LOS ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS Y ACTUALIDAD DE LA TEMÁTICA

1.1. Introducción

En la actualidad con el implemento de nuevas tecnologías se abren más opciones para la elección del método de arranque a utilizar en canteras de áridos para la construcción. Para la realización de este trabajo se ha tenido en cuenta la revisión de literatura especializada basada en el tema, las clasificaciones de los macizos rocosos y como contribuyen a la estimación de la excavabilidad, así como la estimación de la misma para la elección del método de arranque de las rocas.

1.2. Breve actualización sobre los métodos de arranque en la minería a cielo abierto

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 realiza 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. (Rodríguez y Solis, 2004). En condiciones minero-geológicas determinadas el mullido mecánico de las rocas presenta ventajas sobre el método explosivo. La causa principal es la ausencia del efecto sísmico y el vuelo de los pedazos de rocas durante la explosión, por ello este método se puede utilizar cerca de los puntos de población, edificios e instalaciones. Además disminuye a veces el costo de la fragmentación, así como las pérdidas y el empobrecimiento y aumenta la productividad del trabajo y de los equipos de carga y transporte. (Rodríguez y Solis, 2004). A continuación, se describen los métodos de arranque mecánico, y con perforación y voladura:

Arranque mecánico

Tractores con escarificador

Solis et al. (2004) plantean que la profundidad del escarificado está limitada por la potencia del tractor y las características físicas de las formaciones rocosas

(resistencia, meteorización, fracturación y la abrasividad). Normalmente la profundidad que se alcanza no es mayor de 1,5 m, en rocas con resistencia entre 80-100 MPa.

La escarificación es favorable cuando:

- Existen fracturas, fallas y planos de discontinuidad;
- Meteorización;
- Grado de estratificación y esquistosidad;
- Baja resistencia a la compresión y gran tamaño de grano.

Es desfavorable cuando:

- Existen formaciones masivas y homogéneas;
- Origen cristalino y fragilidad;
- Sin discontinuidades;
- De grano fino y agente de cementación sólido;
- Comportamiento plástico.

Excavadoras

Las excavadoras para el arranque de macizos rocosos sin voladura previa o prevoladura, se utilizan en macizos de muy bajas velocidades sísmicas y con abundantes superficies de estratificación, diaclasas o fracturas y fragilidad del material, con resistencia a la compresión entre 12,5-50 MPa). Solis et al. (2004)

Martillos rompedores

Existen tres tipos de martillos rompedores: neumáticos, eléctricos e hidráulicos, los más comunes son los neumáticos utilizados ampliamente en la industria minera y constructiva y en los últimos años, los hidráulicos, para la fragmentación secundaria y en menor grado, el arranque, fundamentalmente en los trabajos a cielo abierto

Los parámetros a tener en cuenta para evaluar la facilidad de excavación del macizo son: resistencia de la roca (80-100 Mpa), tamaño del bloque, alteración, disposición estructural.

Arranque con perforación y voladura

Para la perforación y voladura se requiere tener en cuenta las características del macizo tales como: agrietamiento (abertura, espaciamiento, distancia entre grietas

y relleno), propiedades físico-mecánicas como: resistencia a la compresión y tracción, densidad, masa volumétrica, velocidad de las ondas longitudinales y transversales, módulo de elasticidad y coeficiente de poisson. Para realizar la perforación se requiere de características esenciales como: la fortaleza (función de resistencia a la compresión), dureza, abrasividad y el agrietamiento. En la elección de la sustancia explosiva a emplear se deben tener en cuenta las posibilidades reales de suministro; el precio del explosivo; el diámetro de carga; las características de las rocas; el volumen de roca a volar y la presencia de agua. L. Jimeno (1990)

1.3. Generalidades sobre el arranque de rocas

Frecuentemente en las explotaciones mineras en nuestro país existe una clara desconexión entre proyecto y los trabajos que en realidad se realizan. La caracterización atribuida al arranque en la fase de estudio o investigación no coincide (o lo hace muy poco) con lo que el ejecutor se encuentra en los frentes en el momento de su realización. Esto se produce cuando en fase de proyecto, se califica a la roca de arranque como excavabable, ripable o volable, no teniendo clara la importancia de lo que esto implica. Esta definición condiciona el enfoque de los trabajos, los medios, plazos y permisos para realizarlos, y sobre todo el precio de la unidad de excavación; lo que influye de forma determinante en el presupuesto para la realización de la misma. Esta situación nos puede conducir a las siguientes problemáticas:

Problemática técnica: de acuerdo con el proyecto se dimensionan, preparan y trasladan al lugar de las excavaciones los equipos técnicos y humanos necesarios. El factor tiempo que supone el cambio a nuevos métodos de excavación, condicionará entonces el plan de obra o explotación, lo que lleva ligado irremediablemente una nueva e imprevista problemática.

Problemática económica: los nuevos costos conducirán a una revisión de los presupuestos. Si no es así, ello originará una situación de discusión por los precios de la unidad de excavación.

Problemática administrativa: una labor en la que los terrenos se consideren inicialmente excavables por medios mecánicos, y se comprueba, ya en fase de ejecución, que sólo es realizable mediante labores de voladura, conllevará un retraso inevitable y costoso debido al tiempo necesario para la obtención de los permisos pertinentes y viceversa.

1.4. Clasificaciones de excavabilidad

La excalabilidad, se define como la facilidad que presenta un terreno para ser excavado. Ha sido estudiada por Duncan (1969), Franklin (1971, 1997); Louis (1974); Atkinson (1977), Romana (1981, 1997, 1994); Kirsten (1982); Abdullatif y Crudden, (1983); Scoble y Muftuoglu (1984); Bell (1987); Hadjigeorgiou y Scoble (1988), entre otros que propusieron clasificaciones para la minería subterránea, Noa (2003) propuso una metodología para la determinación del método de arranque en excavaciones subterráneas. Por su parte, la compañía Caterpillar (1970), Franklin et al. (1971), Weaver (1975), Kirsten (1982), Minty y Kcarns (1983), Scoble & Muftuoglu (1984), Smith (1986), Singhet al. (1987), Ovejero (1987), Karpuz (1990), Hadjigeorgiou y Scoble (1990), Pettifer y Fookes (1994), establecieron clasificaciones de excavabilidad para las labores a cielo abierto. Duncan (1969) establece que las evaluaciones para determinar la facilidad o dificultad con la cual el macizo rocoso puede ser excavado se basan en:

a) El material de la roca que conforma el bloque dentro del macizo (porque la excavación trae consigo la fragmentación y ruptura del material de la roca cuando el volumen del bloque es grande).

b) La naturaleza, extensión y orientación de las fracturas.

c) El tipo de roca (ígnea, sedimentaria o metamórfica), sus características (composición, espesores, yacencia, etc.) y estado de conservación.

Franklin, (1971, 1997) se basa en los valores del espaciamiento entre las grietas (Eg) y los valores de la resistencia a la compresión simple de las rocas (Rc), ver figura 1.1.

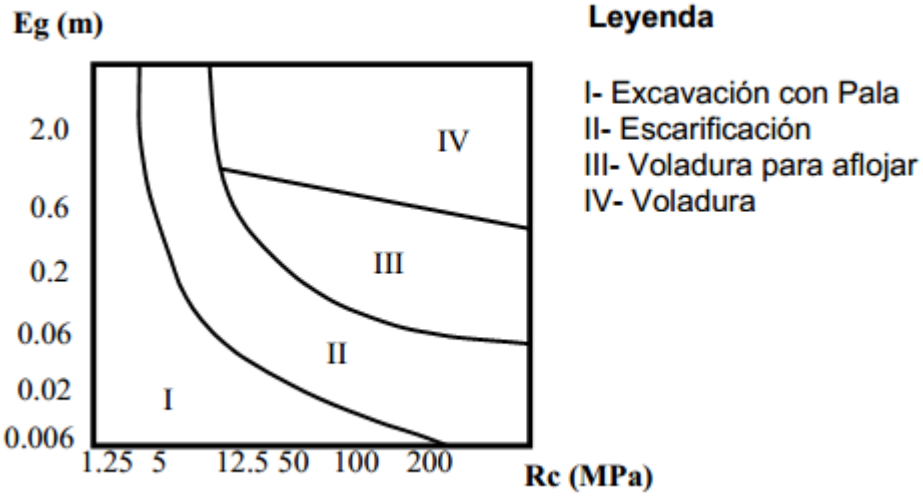


Figura 1.1 Clasificación propuesta por Franklin (1971, 1997).

Esta clasificación de excavabilidad propuesta por Franklin (1971, 1997) 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, 2003).

En este caso, el índice de espaciamiento 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 (Figura 1.1), pero no se especifican los tipos de maquinarías de arranque a utilizar ni sus capacidades (Aduvire, 1992). Consideramos que este es un criterio que debe ser evaluado en la cantera objeto de estudio.

Atkinson (1977) propuso un nomograma en el que aparecen zonas de aplicación para cada tipo de maquinaria utilizada en el arranque de la roca, en función de la resistencia a compresión simple de las rocas. En la referida investigación, de acuerdo con los criterios expuestos por Noa (2003), el autor tiene en cuenta uno de los parámetros que más influye en el proceso de arranque de la roca, pero no tuvo en cuenta 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 planos de debilitamiento estructural o las diaclasas abiertas. Estos aspectos alcanzan su mayor efecto cuando se realiza el arranque en las canteras, cuestión que se pretende utilizar como criterio en la presente investigación.

Basándose en la clasificación dada por Louis (1981), Romana (1981) presentó una nueva propuesta, la cual estaba más adaptada a las capacidades tecnológicas de la maquinaria de excavación. Posteriormente Romana (1994) 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. Consideramos que esta clasificación es indicativa y debe usarse en la fase de estudios previos o anteproyectos de obras. Scoble y Muftuoglu, (1984) fundamentan su clasificación en la determinación de un índice de escalabilidad del macizo rocoso, mediante la utilización de la expresión que se muestra a continuación, la cual es utilizada en la tabla 1.1

$$IE = W + S + J + B$$

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.

Tabla 1. 1. Valoración de la excalabilidad de los macizos rocosos propuesto por Scoble y Muftuoglu (1984).

Clase	**Facilidad de excavación**	**Índice (W + S +J+B)**	**Equipo de excavación**	**Modelos de equipos empleados**
1	Muy fácil	<40	Tractores de escarificado; Dragalinas; Excavadoras	Tractor (Cat. D8) Dragalina > 5m^3 (Lima 2400) Excavadora de cables > 3m^3 (Ruston Bucyrus 150 RB)
2	Fácil	40-50		Tractor (Cat. D9) Dragalina > 8 m3; (Marion 195) Excavadora de Cables > 5m^3; (Ruston Bucyrus 150 RB)
3	Moderada-mente difícil	50 - 60	Dragalinas; Excavadoras	Tractor - Excavadora – Pala; Cargadora (Cat. D9) Excavadora Hidráulica > 3 m^3; (Cat. 245)
4	Difícil	60 - 70		Tractor - Excavadora – Pala Cargadora (Cat. D10). Excavadora Hidráulica > 3 m^3; (Cat. 245 ó O&K RH40)
5	Muy difícil	70 - 95	Excavadoras	Excavadora Hidráulica > 3 m^3; Cat. 245 ó O&K RH40
6	Extremada-mente difícil	95 -100		Demag H111-Excavadoras; Poclain 1000 CK Hidráulicas P & H 1200 > 7 m^3; R H 75
7	Extremada-mente difícil	> 100		Demag H 185 Excavadoras Demag H 241 Hidráulicas O & K RH300 > 10 m3

Según Scoble y Muftuoglu (1984), la meteorización fue incluida para tener en cuenta el efecto reductor de la resistencia de las discontinuidades. Los límites relativos superiores de S, J y B se definieron tomando como referencia el rendimiento de las excavadoras hidráulicas. Todos los macizos rocosos con índices menores a 70 podrían arrancarse con equipos medianos, entre 70 y 100 con equipos grandes y los de índices mayores a 100 solo con voladuras.

Al igual que otras clasificaciones, esta también tiene limitaciones: no se tiene en cuenta el coeficiente de abrasividad de las rocas, se propone tener en cuenta la resistencia de la roca bajo carga puntual cuando lo correcto sería valorar la resistencia estimada del macizo que es mucho más real, aunque se hace una propuesta del tipo de maquinarias a emplear, los autores solamente se limitan a proponer el grado de facilidad de excavación de los macizos, otra deficiencia es que para determinar el grado de deterioro de las rocas se debe realizar a partir de excavaciones realizadas anteriormente y en el caso de que el laboreo se realice en macizos vírgenes no se recomienda nada al respecto.

Mc Lean y Gribble (1985) estimaron la relación entre la resistencia de compresión uniaxial y la dureza de la roca intacta, determinada por el martillo de Smich y la escarificación de la roca.

Lilly (1986, 1992) en trabajos con rocas blandas y duras propuso el índice de Volabilidad “BI” (Blastability Index) obtenido como la suma de las calificaciones asignadas a cinco propiedades geomecánicas:

$BI = 0.5\ (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI)$

RMD: Descripción del macizo rocoso
JPS: Espaciamiento de las juntas planares
JPO: Orientación de las juntas planares
SGI: Gravedad específica
RSI: Dureza de la roca

El radio de influencia de la dureza de la roca (RSI) se estima a partir de la expresión:

$RSI = 0{,}05 * RC;$

RC es resistencia a la compresión (MPa)

A partir del índice de volabilidad se puede determinar los consumos específicos de explosivo (CE) y los factores de energía (FE), que se calculan con las expresiones siguientes:

$CE = (kg\ anfolt) = 0.004 * BI$ $FE\{MJIt) = 0.015 * BI$

El índice planteado por Lilly, se puede corregir por nuevos parámetros, como la alteración y la abundancia (ver tabla 1.2), dichos valores entran restando al índice original, y la relación queda de la siguiente forma:

$BI = 0{,}5 * (RMD + JPS + JPO + SGI + ALT * AB)$

Tabla 1. 2. Factores de ponderación de los parámetros del índice de volabilidad.

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS	**CALIFICACIÓN**
1.– Descripción del macizo rocoso (RMD)	
Friable/poco consolidado.	10
Diaclasado en bloques.	20
Poco masivo.	50
2.– Espaciamiento entre planos de juntas (JPS)	
Pequeño (< 0,1 m)	10
Medio (0,1 a 1 m)	20
Grande (> 1 m)	50
3.– Orientación de los planos de juntas (JPO)	
Horizontal.	10
Buzamiento normal al frente.	20
Dirección normal al frente.	30
Buzamiento coincidente con el frente	40
4.– Influencia del peso específico (SGI)	
(SGI es el peso específico en t/m3)	SGI = 25 * SG-50

Ovejero (1987) considera que la velocidad de propagación de las ondas sísmica de las rocas es sin duda, en el arranque de rocas el parámetro más significativo. Es una característica de las que las clasifican significativamente en cuanto 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 et al. (1987) también propusieron un índice de escarificación (rippability index) para formaciones carboníferas, los gráficos para el funcionamiento del

escarificador (rippper) fueron propuestos para una amplia variedad de rocas basadas en las ondas P (Church, 1981; Caterpillar, 2001).

Hadjigeorgiou y Scoble (1988) proponen 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. En la tabla 1.3, se presentan las valoraciones que se adjudican a cada uno de los parámetros.

Tabla 1. 3. Nuevo sistema de evaluación del índice de Excavabilidad (Hadjigeorgiou y Scoble, 1988).

Clase	1	2	3	4	5
Resistencia bajo carga puntual: $I_s(50)$	0.5	0.5 - 2.0	1.5-2.0	2.0-3.5	>3.5
Valoración (I_s)	0	10	15	20	25
Tamaño de bloque	Muy pequeño	Muy pequeño	Medio	Grande	Muy grande
J_v (Juntas/m^3)	30	10-30	3-10	1-3	1
Valoración (B_s)	5	15	30	45	50
Alteración					
Valoración (W)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Disposición estructural relativa	Muy favorable	Favorable	Ligeramente favorable	Desfavorable	Muy desfavorable
Valoración (J_s)	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
Valoración iE	Muy fácil	Fácil	Difícil	Muy difícil	voladura
Facilidad de excavación	< 200.5	20-30	30-45	45-55	>55

El índice de Excavabilidad (IE) se define mediante la expresión:

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

Is = índice de resistencia bajo carga puntual

Bs = índice de tamaño de bloque

W = índice de alteración

Js = índice de disposición estructural relativa

Como es obvio, 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 consecuentemente 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 Mega a afectar 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, este consiste en la determinación de cuatro parámetros geomecánicos (ver tabla 1.4) para la clasificación de los macizos; estos parámetros son: resistencia a la tracción y espaciamiento entre discontinuidades, estimado a partir del índice de carga puntual, grado de meteorización, obtenido 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. Según el criterio de la autora del presente trabajo la propuesta alcanzada por Singh *et al.* (1989), 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 además propone la maquinaria para distintos grupos de macizos.

Tabla 1. 4. Clasificación de macizos rocosos según su escarificación (Singh et al., 1989).

Parámetros	Clases de macizos rocosos				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Resistencia a tracción (Mpa)	< 2	2 - 6	6-10	10-15	> 15
Valoración	0-4	4 - 8	8-12	12-16	16-20
Grado de alteración	Completo	Alto	Moderado	Ligero	Nulo
Valoración	0-4	4 - 8	8-12	12-16	16-20
Grado de abrasividad	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Nulo
Valoración	0-4		8-12	12-16	16-20
Espaciamiento entre discontinuidades (m)	< 0.06	4- 8	0.3-1	1-2	> 2
Valoración	0-10	06 - 0,3	20-30	30-40	40-50
Valoración total	< 22	10 - 20	44-66	66-88	> 88
Escarificación	Fácil	22 - 44	Difícil	Marginal	Voladuras
Tractor recomendado	Ninguno-clase 1 ligero	Clase 2 medio	Clase 3 pesado	Clase 4 Muy pesado	Clase 5
Potencia (kW)	< 150	150-250	250-350	< 350	—
Peso (t)	< 25	25-35	35-55	< 55	—

Karpuz (1990) y Basarir y Karpuz (2004) proponen un sistema de clasificación de escarificación para formaciones carboníferas y margas para el uso en 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 Smich.

Aduvire y López Jimeno (1992) presentaron un resumen de varios criterios de escarificación que se basan en la determinación previa de algunas características geomecánicas de la roca a excavar.

Pettifer y 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, las características de discontinuidad define

el tamaño individual del bloque rocoso que constituye uno de los más importantes parámetros de la escarificación de la roca. Ellos presentaron un gráfico detallado que es similar al propuesto por Franklin et al. (1971). Pero con una categorización más detallada de los métodos de excavación. Aunque numerosos métodos están disponibles para predecir la excavabilidad, ningún método en particular es universalmente aceptado por 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.

1.5 Clasificaciones de los macizos rocosos y la estimación de la excavabilidad

Los sistemas de clasificación del macizo rocoso también han sido utilizados para la evaluación de la excavabilidad. Louis en 1974 presentó una clasificación basada en el (RQD) propuesto por Deere (1964) y los valores de la resistencia a compresión simple de la roca, a partir de un trabajo realizado para el centro de la villa de Marsella, excavado en calizas urgonianas. Independientemente que se valora el agrietamiento del macizo, no se tiene en cuenta la influencia que tiene la dirección de los principales sistemas de grietas en la dirección de ataque de las rocas y no se realiza un análisis de las capacidades tecnológicas de las maquinarias de excavación, lo que impide en caso de que el método de arranque sea mecánico estimar el campo de aplicación de estas, (figura 1.2). Este criterio actualmente no se utiliza a causa del bajo límite asignado a la excavación mecánica, pero en todo caso el concepto en que se basa es correcto.

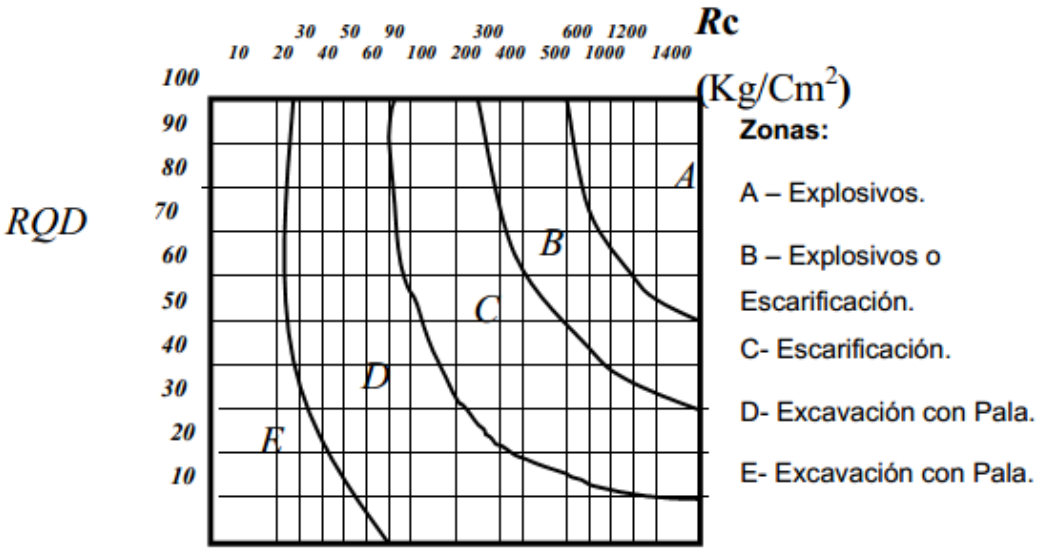


Figura 1.2. Clasificación propuesta por Louis (1974).

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

Selby (1980) propuso la clasificación Rock Mass Strength (RMS) con el objetivo de entender los elementos de las masas rocosas que les proporcionan resistencia a los procesos de meteorización y erosión y que fuera universalmente aplicable para establecer una base común de medición.

Romana Ruiz (1981,1994) se basa en los valores del (RQD) propuesto por Deere (1964) y los valores de la resistencia a compresión simple de las rocas (Rc) en Mpa, así como en una clasificación de los terrenos respecto a la excavabilidad mecánica en túneles (ver figura 1.3 y tabla 1.5). Procede de la propuesta dada por Louis (1974) y está más adaptada a las capacidades tecnológicas de las maquinarias de excavación, independientemente de esto esta clasificación tiene varios inconvenientes, los que impiden en determinado grado su empleo, para establecer por sí sola el método de arranque de la roca. Se considera que es indicativa por lo que debe usarse con prudencia y solamente en la fase de estudios previos o anteproyectos de obras (Noa, 2006).

Al igual que otras clasificaciones, ésta propone utilizar los valores de la resistencia a compresión lineal de las rocas y no tiene en cuenta la dirección de ataque de la roca respecto a la orientación de manifestación de las diaclasas.

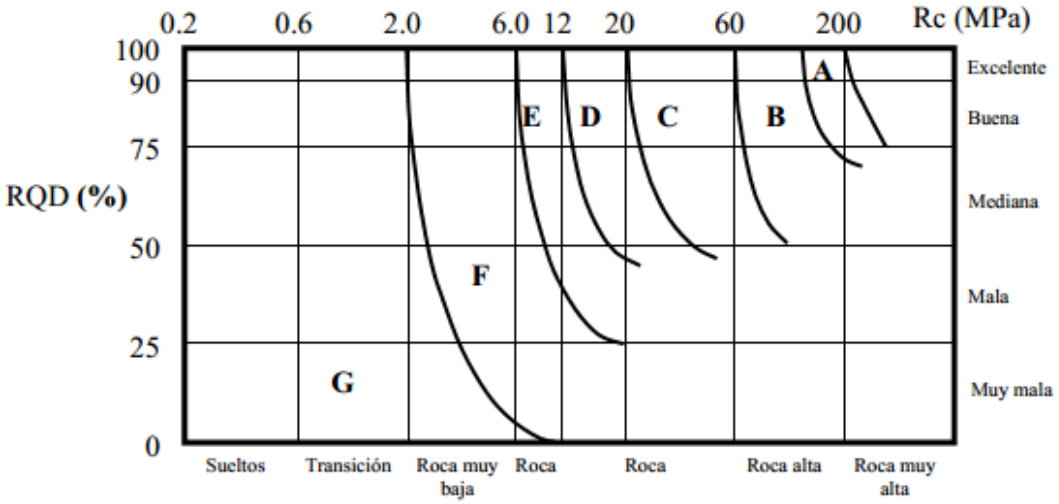


Figura 1.3 Clasificación propuesta por Romana Ruíz (1981, 1994).

Tabla 1. 5. Clasificación de los terrenos respecto a la excavabilidad (Romana, 1994).

Zona	Topo		Rozadora			Martillo	Pala
	Fn >25 tn	Fn < 25 tn	P > 80 tn	50-80 tn	< 50 tn		
A	Posible ?	-	-	-	-	-	-
B	Adecuado	Posible ?	Posible ?	-	-	-	-
C	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	-	-	-
D	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible ?	-
E	Posible	Posible	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible ?
F	-	-	-	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible
G	-	-	-	-	Posible	Posible ?	Adecuado

Romana (1994) propone un sistema de clasificación para la excavación de los macizos rocosos basado en el siguiente índice:

$$N = M_s \frac{RQD}{J_n} * J_s * \frac{J_r}{J_a}$$

Ms: Resistencia a compresión de las rocas (MPa)

RQD: Rock Quality Designation (%)

Jn,Jr: Parámetros del sistema de clasificación Q de Barton

Js : Valor de la disposición relativa de los bloques inclinados según la dirección de arranque. Para material intacto Js = 1,0

Ja : Factor de alteración de la junta

Según el índice de excavabilidad N obtenido por la ecuación anterior se evalúa la facilidad al arranque mediante escarificado de la siguiente forma:

- Fácilmente ripable……..(1<N<10)
- Escarificado duro……(10<N<1.000)
- Escarificado muy duro……..(100<N<1.000)
- Escarificado extremadamente duro/voladura…..(1.000<N<10.000)
- Voladura…… (N>10.000)

Kirsten (1982) propuso un sistema para la evaluación de la excavabilidad en términos de las características del macizo rocoso tales como la tensión del macizo, tamaño del bloque, orientación relativa de la estructura geológica, tensión de la pared de la junta. Su sistema de clasificación se basa en las propiedades ingenieriles desde suelos débiles hasta la roca más dura. Kirsten (1982) formuló el índice de excavabilidad (*n*) que es determinado por medio del uso graduado de varios sistemas de clasificaciones para la evaluación de la escarificación de la roca.

La clasificación de excavabilidad propuesta por Kirsten (1982) tiene también algunas limitaciones, que se relacionan con el comportamiento geoestructural del macizo y que no le permiten determinar cuál es el método más adecuado de arranque; no se valora grado de humedad de las rocas el que afecta considerablemente las características de resistencia del macizo, no se tiene en cuenta la estratificación del macizo, la bloquicidad ni el grado de deterioro de las rocas, siendo estos los elementos que mayor influencia tienen en el comportamiento geoestructural y por consiguiente en el proceso de arranque, tampoco se realiza un análisis que permita definir el tipo de maquinaria a emplear en caso de que el arranque se realice con métodos mecánicos, lo que teniendo en cuenta las características geoestructurales del macizo es muy evidente.

Abdullatif y Crudden (1983) recomiendan la utilización de los valores del índice RMR propuesto por Bieniawski (1976) y los valores del índice Q propuesto por Barton (1974), ver figura 1.4

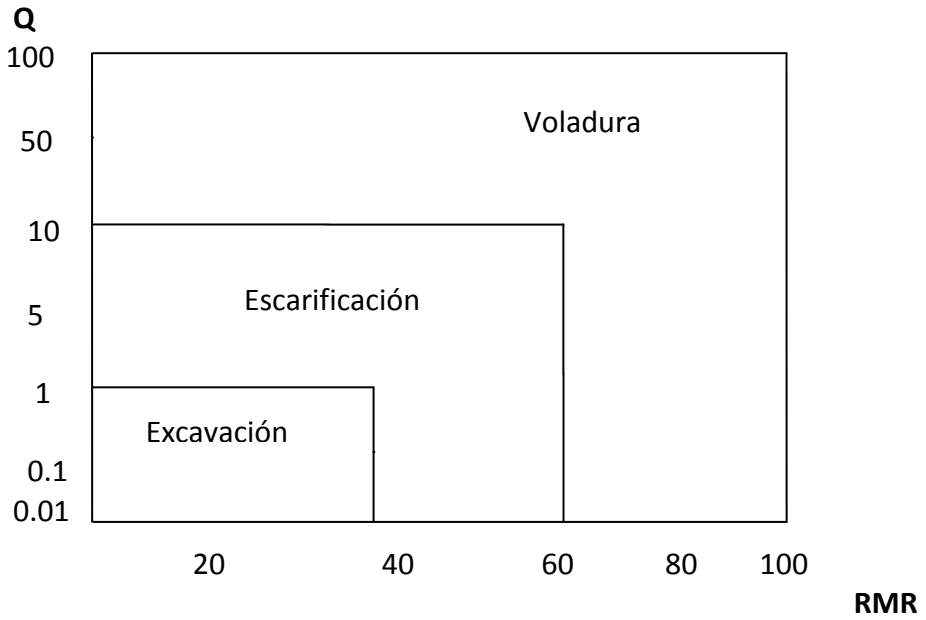


Figura 1.4. Clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden (1983).

Abdullatif y Crudden (1983) también observaron un salto en el valor de Q; a partir de 0,14 los macizos eran excavables, y a partir de 1,05 debían ser escarificados. Este hecho puede ser debido a la mala adecuación del sistema de clasificación Q a las operaciones de arranque.

Una de las limitaciones que ha tenido este método, es que no se tiene en cuenta la dirección de laboreo de las excavaciones con respecto a la dirección de las diaclasas y que en el caso de rocas fuertes no se realiza ninguna propuesta del tipo de maquinarias a emplear (Noa, 2003), criterios con los cuales coincide la autora teniendo en cuenta que esta propuesta fue realizada para excavaciones subterránea. En este caso, aunque es importante la orientación en que se desarrollan los principales sistemas de debilitamiento estructural en relación a la dirección de desarrollo de los frentes de arranque, el espacio en que se desarrolla la investigación es menos confinado.

Minty y Kerans (1983) modificaron el sistema de Waver para las condiciones australianas. El índice de factores geológicos (GFR) incorporó nuevos índices numéricos y reintrodujo factores para las condiciones de las aguas subterráneas y para la rugosidad superficial de las discontinuidades que fueron incluidos en el

sistema original RMR. Ellos multiplicaron el índice GFR, por la velocidad de las ondas sísmicas y graficaron el producto contra el tamaño del tractor con el objetivo de determinar si el escarificado sería satisfactorio o marginal. La velocidad de las ondas sísmicas está muy relacionada a los otros parámetros incluidos en este sistema y Smith (1986) utilizó casos de estudio de Estados Unidos y sugirió que podía ser omitida.

Hoek y Karzulovic (2000) utilizaron los datos del estudio de Abdullatif y Cruden (1983) para estimar el GSI, para este índice y la tensión de los macizos rocosos sugirieron un rango de GSI para 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 alrededor de 60 y valores de tensión del macizo alrededor de 10 Mpa. La voladura sería el único método efectivo de excavación que exhiben valores de GSI mayores que 60 y tensiones del macizo mayores que 15 Mpa.

1.6 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, 2003).

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 (2003) 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 (tabla 1 anexos), 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.

Como se puede observar existen diferentes clasificaciones de excavabilidad unas referidas a las excavaciones subterráneas, y otras a obras civiles y explotaciones a cielo abierto, propuestas por los diferentes autores en las últimas décadas, en prácticamente todas se plantea determinar como propiedad básica la resistencia a la compresión y a partir de ella se determinan los demás parámetros. 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 sólo en las labores subterráneas, y que también se consideren las características mecánico-estructurales del macizo de rocas, y sus propiedades físicas.

En general las investigaciones que se desarrollaron con posterioridad al siglo XIX y XX y que actualmente se llevan a cabo se basan en la aplicación de uno o varios de los métodos y teorías anteriormente analizadas, aunque se debe destacar la aplicación de métodos computacionales para la modelación y simulación numérica de los procesos de arranque de las rocas por medio de los software profesionales creados para estos propósitos y de esta manera trazar nuevos caminos en la extracción de minerales útiles que sugiere la explotación de la roca eficiente y ecológica.

1.7 Actualidad y situación del tema en Cuba

Los materiales de construcción constituyen un importante renglón en el desarrollo de la economía de nuestro país. Antes del triunfo de la Revolución esta industria era muy pobre. La producción de áridos, no superaba los 2 millones de m^3, lo que frenaba su desarrollo desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo, y por consiguiente tenga gran influencia en el desarrollo tecnológico y en el grado de modernización de los medios técnicos empleados para su obtención, determinantes en el proceso económico productivo que se iniciaba (Deschapells, 2009).

En la actualidad esta industria realiza un conjunto de inversiones tendentes a aumentar la elaboración de los productos necesario para mantener el ritmo de construcción con el país. Por esta razón se construyen y se amplían canteras, areneras, fábricas de cementos, bloques, cabillas, cerámica y otros materiales complementarios. Esto ha conllevado en los últimos tiempos que el proceso de excavación en las canteras de materiales de construcción alcance un desarrollo considerable principalmente en el arranque de las rocas. En relación con esta problemática y conforme al acelerado auge que se está alcanzando a nivel mundial en este aspecto; en Cuba se hace necesario un perfeccionamiento en el proceso de elección del método de arranque de la roca y en lograr que el mismo tenga la posibilidad de una fácil adecuación a las condiciones concretas de cada macizo rocoso (Cardentey *et al*, 2001).

Varios investigadores recomiendan dar seguimiento a esta temática por la importancia que reviste y no limitarse a clasificar las rocas por una simple metodología; sino por experimentos y ensayos de laboratorio (Barton, 1972; Deer, 1972). Sin embargo, resulta evidente la necesidad de profundizar en los aspectos relacionados con la temática objeto de estudio de la presente investigación; no sólo por la importancia de la diferenciación, sino también para adecuar las investigaciones futuras de forma tal que resuelva las dificultades que impiden establecer modelos analíticos del comportamiento de un determinado macizo con un mínimo de idealización.

La industria extractiva de materiales de construcción ha desarrollado algunas investigaciones relacionadas con el arranque de rocas (P. Alexandre, 2006), pero estas han estado encaminadas al campo de las voladuras, no así al arranque mecánico. En este sentido Corpas (2000) realiza un estudio geomecánico de los

macizos rocosos mediante la aplicación de la proyección estereográfica, para la aplicación consecuente de estos métodos en los macizos rocosos agrietados, la cual puede servir de base para la elección del método de arranque aunque este no fue su objetivo.

Peñate (2000) demuestra la importancia, de la caracterización geomecánica del macizo del Escambray, para lo cual considera esencialmente los criterios geológicos, clasificando las rocas por su génesis, para la determinación de las propiedades físico-mecánicas, como únicos criterios para la caracterización geomecánica del macizo.

Entre las investigaciones más interesantes en esta temática se destaca la realizada por Neves (2002) tuvo como objetivo llevar a cabo el estudio geomecánico del macizo de la cantera Miguel Raposo en la provincia Guantánamo, el cual sirvió de base para perfeccionar el pasaporte de voladuras existente. Noa (2003) en su tesis doctoral estableció 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. Por su parte Alexandre P (2006) propuso una metodología para el diseño de los patrones de voladura que considera las propiedades de las rocas, las características mecánico estructurales del macizo, las propiedades de las sustancias explosivas y la acción de la explosión de éstas sobre el macizo, que permite reducir la salida de pedazos grandes, pero no considera la acción de las cargas compactas en la cercanía inmediata de estas y la salida de fracciones finas. Por otro lado Joe (2007) hace un estudio para determinar la influencia de la construcción de las cargas de sustancias explosivas sobre el estado tensional del macizo y los parámetros de la explosión en las canteras de áridos para controlar la salida de pedazos sobre medidos y de finos. Hernández (2012) propone un procedimiento para la elección del método de arranque de la roca en canteras para materiales de construcción. Investigación que sirve de base para este trabajo.

CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOGRÁFICA DEL YACIMIENTO LOS CALICHES

2.1 Ubicación geográfica

Administrativamente el yacimiento Los Caliches se encuentra ubicado en el municipio de Gibara provincia de Holguín. Está situado a unos 10 Km. al suroeste de dicho pueblo y a unos 3.5 km. de la carretera Holguín – Gibara. El yacimiento Los Caliches está enmarcado en la porción sur de la formación Gibara, la cual limita al oeste con la bahía de Gibara, al sur con la línea Cacoyuguín - La Púa - Velasco a lo largo de una escarpa abrupta. Al Norte no tiene límite definido, desapareciendo gradualmente debajo de las formaciones del Neógeno a lo largo de la línea Gibara – Laguna Blanca, el Jiquí - La Calesa.

Las coordenadas geográficas del yacimiento son las siguientes:
21^{o} 4'17" latitud norte
76^{o} 13' 6" longitud oeste

Las coordenadas en el sistema Lambert son:

X = 563777.44
Y = 269456.00

Tabla 2. 1. Coordenadas de la concesión minera del yacimiento.

VERTICES	NORTE	ESTE
1	563900	269550
2	564300	269500
3	564385	269000
4	564065	269000
5	563900	269050
1	563900	269550

2.2. Relieve

El yacimiento presenta un relieve accidental formando elevaciones y depresiones calcáreas, pertenecientes a las llamadas Alturas de Candelaria, las cuales forman parte del cinturón Catuco cuya cota oscila desde 0 hasta 250 m sobre el nivel de mar. En el área de estudio las cotas oscilan entre los 24 y 153 m en el flanco sur y norte respectivamente. Todo el flanco sur de este a oeste representa una pendiente abrupta generalmente en partes casi vertical, y en la parte noroeste y este se despliegan llanetas con elevaciones aisladas de hasta 146 m; la parte sur forma una escarpa abrupta.

El carso en superficie se presenta en forma de cavidades cársicas de dimensiones variables y generalmente aparecen rellenadas por arcilla, en profundidad contiene relleno principalmente por alita. Afloran escasas cavernas vacías y de poca potencia, el carso en profundidad está evidenciado además por las diferentes depresiones de dimensiones variadas que se observan en el yacimiento.

2.3. Características geológicas del yacimiento

En el yacimiento de calizas Los Caliches, donde se ubica la cantera de igual nombre, aparecen formaciones de edad del Cretácico Inferior (Albiano)- Cretácico Superior (Maestrichtiano Inferior).

El yacimiento Los Caliches se clasifica como un yacimiento de montaña, en rasgos generales. El esquema estratigráfico de la región se presenta de la manera siguiente (ver figura 2.1).

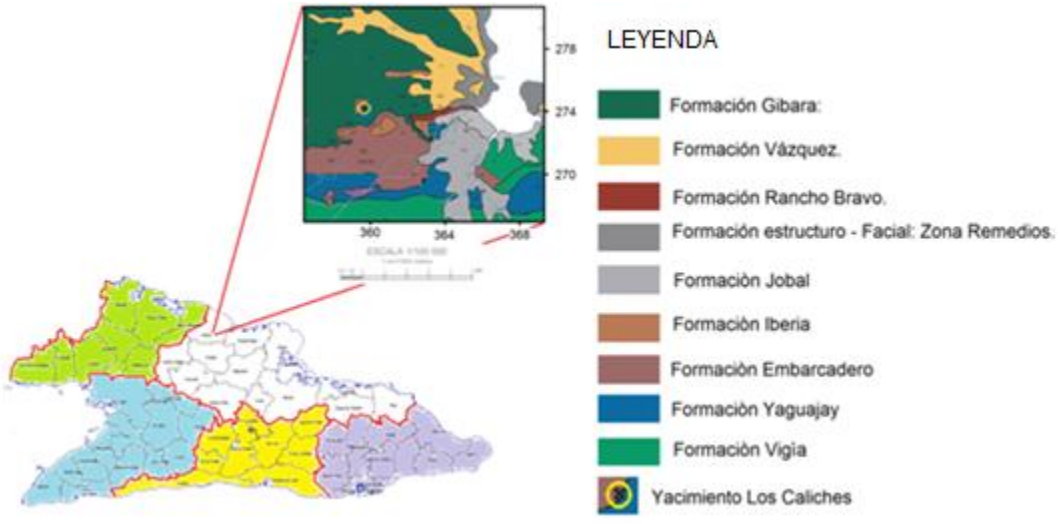


Figura 2. 1 Ubicación geográfica y geológica del área.

Geológicamente la región está compuesta por los sedimentos de las formaciones que a continuación se mencionan: Formación (Fm).

- *Fm. estructuro - Facial: Zona Remedios*
- *Fm. Iberia*
- *Fm. Jobal*
- *Fm. Embarcadero*
- *Fm. Yaguajay*
- *Fm. Vigía*
- *Fm. Rancho Bravo*
- Fm. Puerto Padre
- Fm. Vázquez
- Fm. Gibara

El yacimiento está directamente asociado a la Fm Gibara que a continuación se describe.

Fm. Gibara

Superficialmente los límites de esta formación son: Al este la bahía de Gibara; al sur la línea, río Cacoyuguín, la Púa – Velasco a lo largo de una escarpa abrupta; al norte no tiene límites definidos, despareciendo gradualmente debajo de las formaciones del Neógeno; y hacia el oeste la zona se estrecha y su punto más occidental está cerca del pueblo de San Mateo. Litológicamente está constituida por calizas microcristalinas, compactas, duras sin material terrígeno, muy puras de color blanco parduzco, margas calcáreas color blanco amarillento. Petrograficamente el yacimiento está constituido por calizas organógenas detríticas con variable grado de recristalización. Estas rocas están formadas por organismos, fragmentos de organismos y fragmentos de rocas calcáreas unidas todas por un cemento calcáreo generalmente más recristalizado que los otros elementos de las rocas. La estructura de estas rocas es organógeno, pelitomorfica, criptocristalina, organógeno – detrítica y fragmentaria.

En el orden siguiente de predomino aparecen las calizas pelitomórfica organógenas y pelitomórfica, las cuales se caracterizan por ser masivas de color blanco lechoso con variable grado de recristalización y presentan moldes fósiles

sustituidos por calcitas macrocristalinas. Las rocas presentan muchas grietas con potencia de 1 a 3 mm rellenas por calcitas, las cuales no presentan ángulos definidos. Debido a su grado de calcificación no se pueden establecer elementos de yacencia excepto en la pared vertical de una gran cueva ubicada en la parte oeste del yacimiento.

2.4. Tectónica

En el flanco sur del yacimiento donde la aflorabilidad es mayor se manifiesta la tectónica de manera más intensiva coincidiendo con las áreas de mayor desarrollo del carso superficial. Aquí las fallas presentan extensión submeridionales formando sistemas casi paralelos.

Las rocas más abundantes en el yacimiento son las calizas organógenas detríticas con variable grado de recristalización. A estas rocas la característica que las distingue es que se han formado en condiciones litorales y neríticas someras en un medio ambiente dinámico expuesto a la acción de las olas y los mares. Son rocas muy duras, compactas de color blanco y blanco cremoso menos frecuentemente con tonalidades rosáceas que yacen masivamente formando grandes espesores.

2.5 Morfología estructural y tectónica del yacimiento

El yacimiento tiene un área de 1.16 km^2 con una forma alargada de oeste a este. Presenta un relieve accidentado y las cotas oscilan entre 24 m. en el flanco sur y 153 m. en la parte norte. Todo el flanco sur de este a oeste representa una pendiente abrupta generalmente en partes casi vertical. En la parte noroeste y este se presentan llanetas con elevaciones aisladas de hasta 146 m. La parte sur forma una escarpa abrupta. La mitad oriental del yacimiento presenta un relieve formando elevaciones y depresiones. En toda el área del yacimiento existe un amplio desarrollo del carso en forma de diente de perro (con altura de 10 a 15 m) fundamentalmente en toda la franja sur, la mitad oriental y en las partes elevadas de la porción oeste. El carso en superficie se presenta en forma de cavidades de dimensiones variables y generalmente aparecen rellenadas por arcilla, y en su profundidad principalmente por alita. Aparecen escasas cavernas vacías y de poca potencia, el carso en profundidad está evidenciado además por las diferentes depresiones de dimensiones variadas que se observan en el

yacimiento. En el flanco sur del yacimiento donde la aflorabilidad es mayor se manifiesta la tectónica de manera más intensiva coincidiendo con las áreas de mayor desarrollo del carso superficial. Aquí las fallas presentan extensión submeridionales formando sistemas casi paralelos.

CAPÍTULO III: 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 (2012), para la elegir el método de arranque de las rocas en las canteras de áridos, 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

3.1. Análisis estructural del macizo rocoso

La cantera objeto de estudio presenta un notable deterioro en su desarrollo minero por lo cual 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 realiza aplicando las técnicas de proyección estereográfica para lo cual debe usarse el software Dip. Versión 5.103 (Rockscience, 2003) y como resultado se obtienen las familias de discontinuidades a continuación mostradas.

Se determinan tres familias de discontinuidades en el macizo, las cuales se pueden observar en los diagramas de contorno y de rosetas (Figuras 3.1 y 3.2). 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, clasificadas como cerradas la familia 1 y la 3 y cerradas la familia 2 muy cerrada. (Tabla.3.1).

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.3.2

Tabla 3. 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	> 6000

Tabla 3. 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	0.3 - 1 m	En bloques
Cerrado	0,05 – 0,3 m	Fracturado
Muy cerrado	< 0,05 m	Triturado

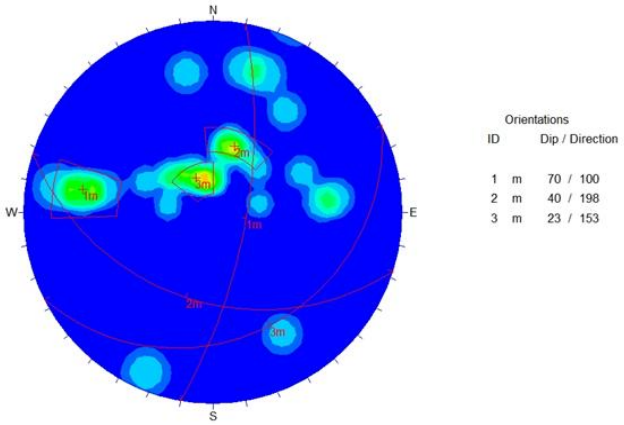


Figura 3. 1 Diagramas de contorno del Yacimiento los Caliches.

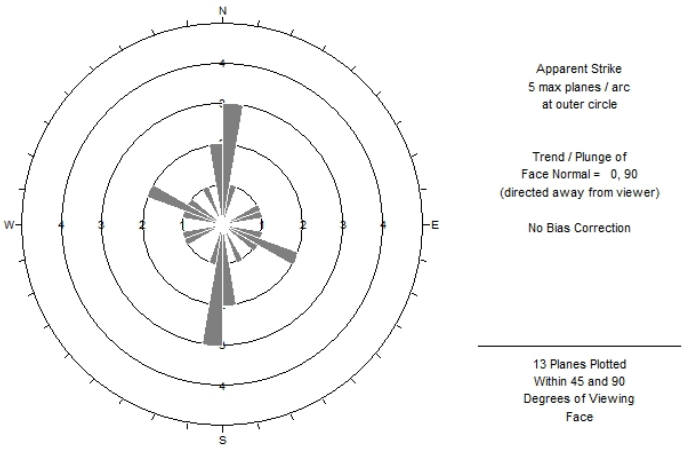


Figura 3. 2 Diagrama de rosetas del Yacimiento Los Caliches.

Tabla 3. 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

3.2. Determinación de las propiedades mecánicas de las rocas

En el anexo 2 se muestran las propiedades mecánicas de las rocas que se tomaron de los pozos de exploración realizados dentro del área de la concesión minera. 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 (Rc).
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 de mayor 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.

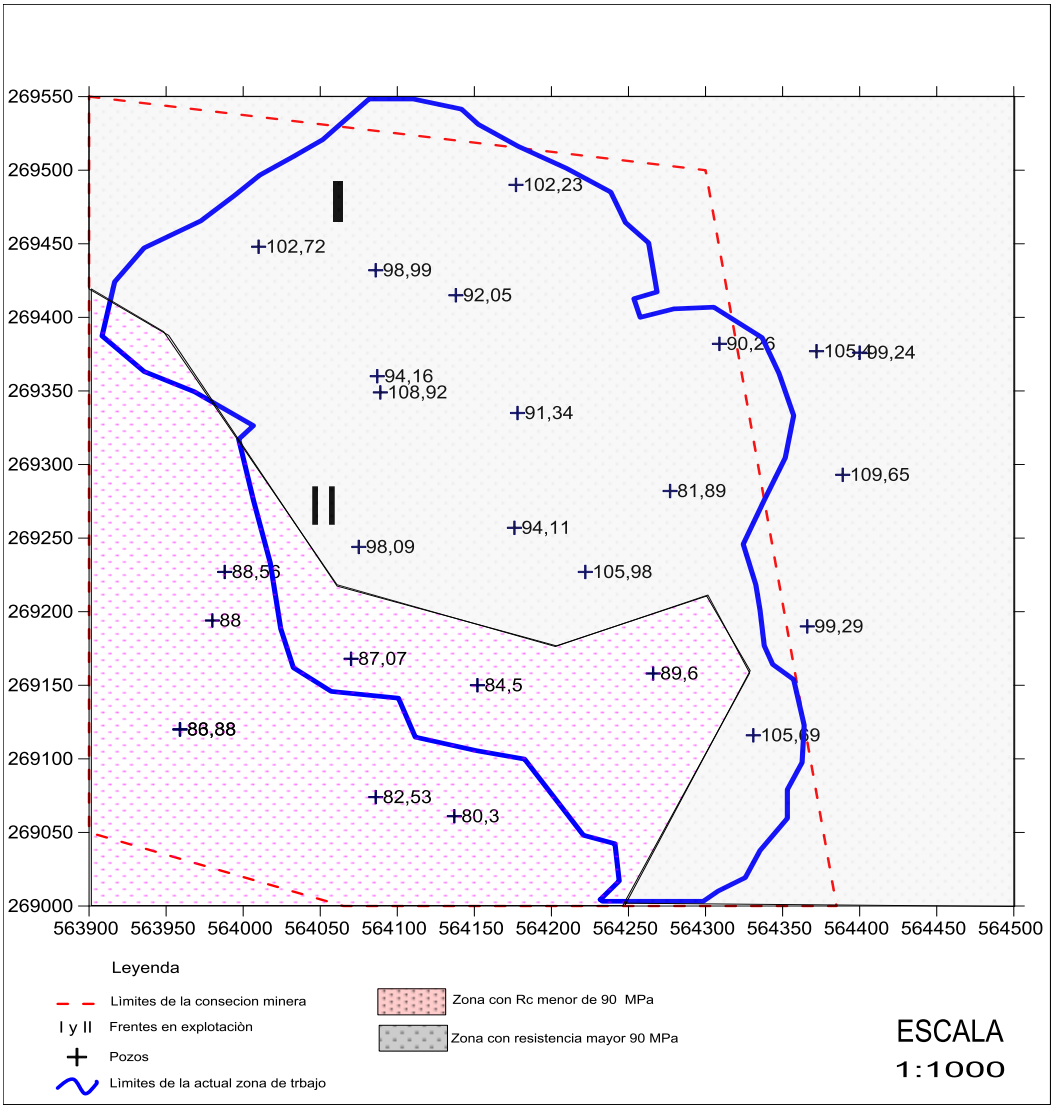


Figura 3. 3 Plano de ubicación de las zonas con las propiedades resistentes de las rocas por pozos.

3.3. Análisis de los índices geomecánicos - Índice de calidad de la roca (RQD, RMR)

El índice RQD se determina con la siguiente expresión:

RQD = 115-3.3 * J_v

RQD = 115-3.3 * (100/150) = 112.8

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

Si; espaciamiento medio entre juntas (m)

Según la tabla 3.3 se clasifica el macizo como de muy buena calidad.

Tabla 3. 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:

Esencialmente, 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 los parámetros descritos en el anexo 3 donde se describen 5 parámetros para calcular el mismo, estos son:

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

Luego se suman todos estos parámetros obteniendo un valor del RMR el cual es evaluado en el anexo 4 arrojando el valor de la calidad del macizo. Por lo que podemos decir que estamos en presencia de un macizo de muy buena calidad según muestra.

RMR=7 + 20 +25 +20 +10

RMR=82

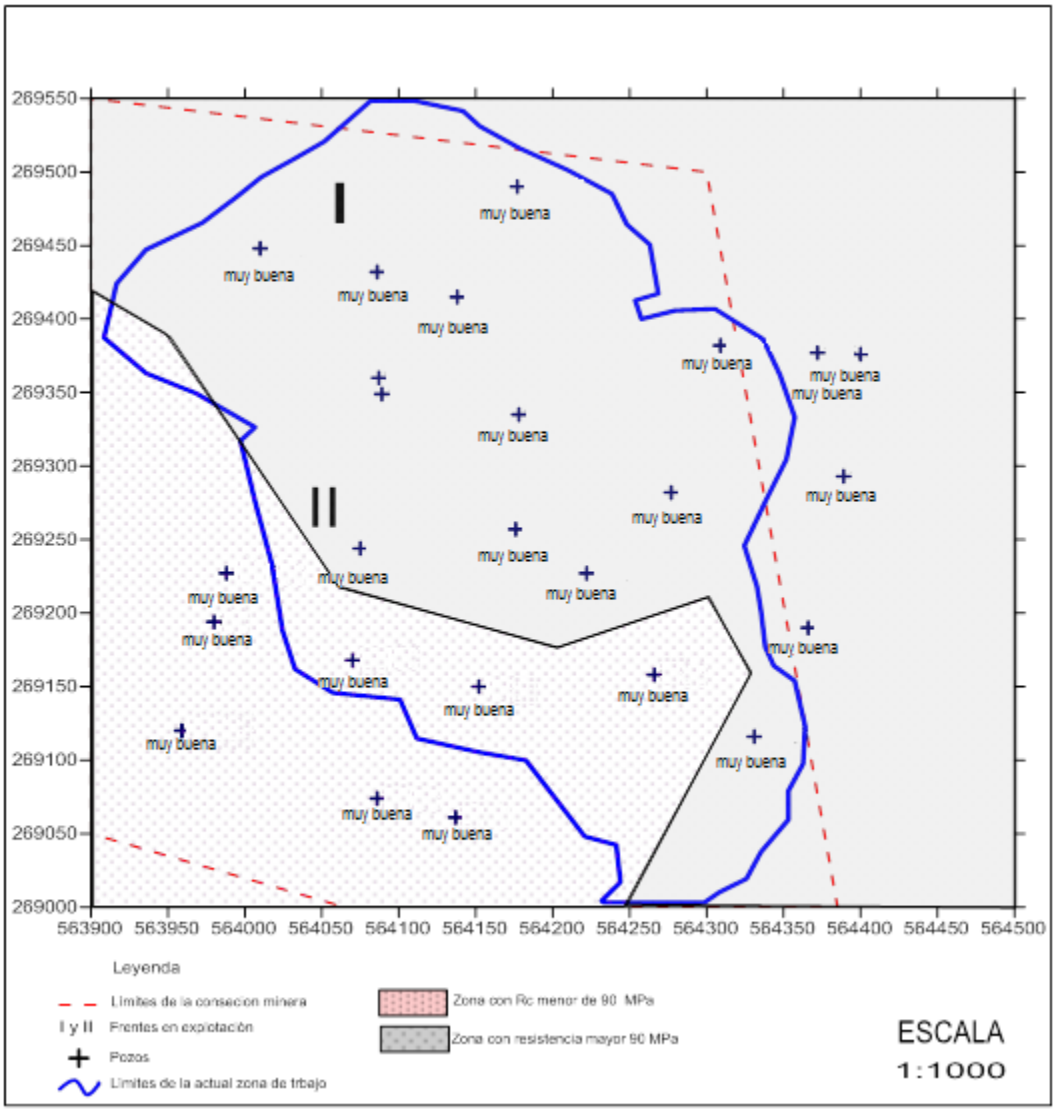


Figura 3. 4 Plano de representación de la calidad geomecánica según el índice RMR y RQD.

3.4. Determinación de dominios geomecánicos

El procedimiento parte de la integración de los mapas de factores geológicos y geomecánicos (anexos figura 1) 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 3.5 en el que se ilustran las dos zonas en las que se dividió el área de estudio para su análisis, para realizar esta división sólo se tuvo en cuenta la resistencia a la compresión de las rocas ya que 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 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/cm^3.

Dominio 2.

Ubicación: Se encuentra ubicado sur-oeste del yacimiento

Propiedades de las rocas: La resistencia a la compresión de las rocas varía entre 89,6 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 y 2,65 g/cm^3.

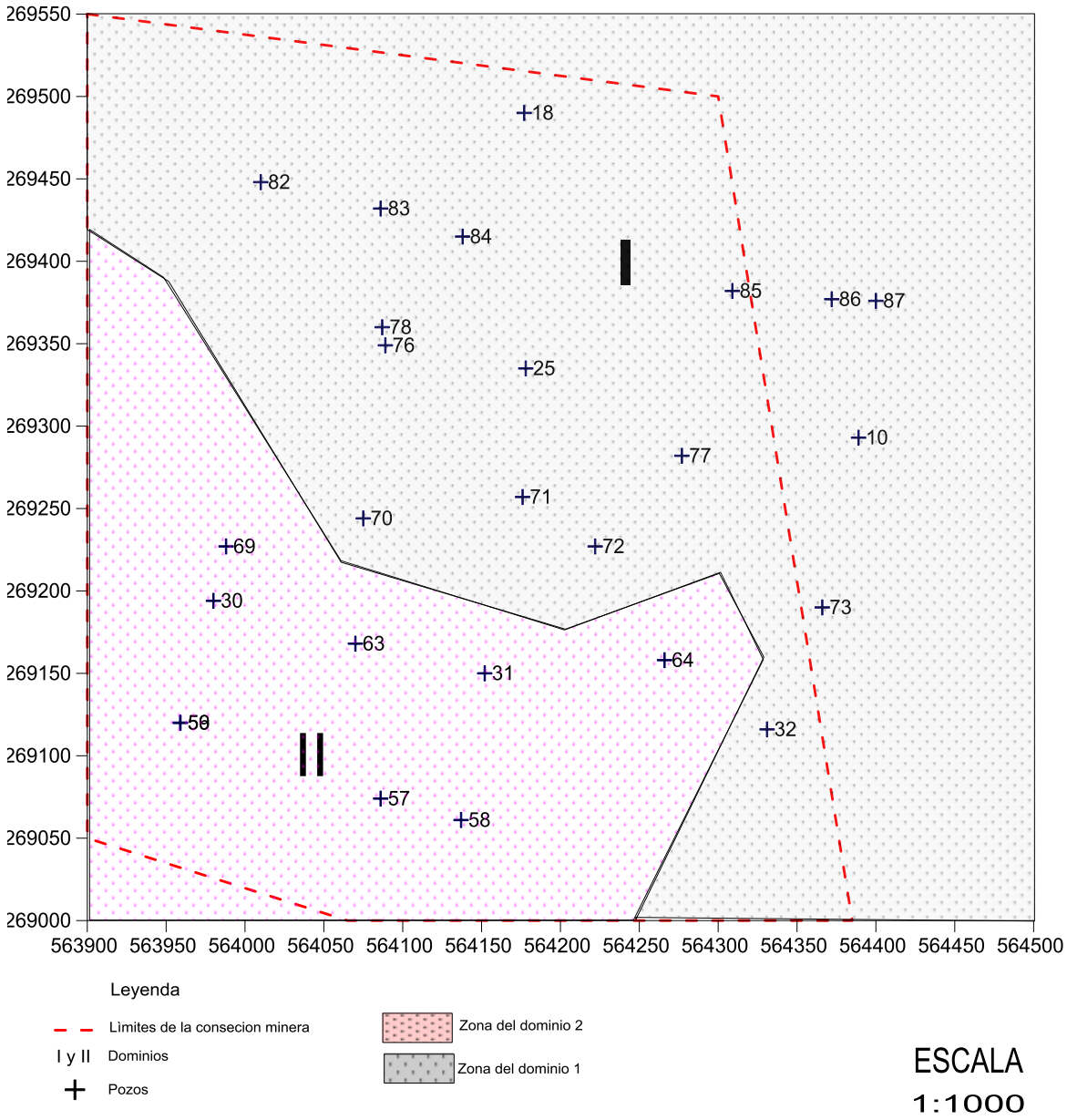


Figura 3. 5 Plano de dominios geomecánicos

3.5. 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 *et. al* .(1990), quienes propusieron 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 (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 (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 3.6 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). Según 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: Perforación y voladura

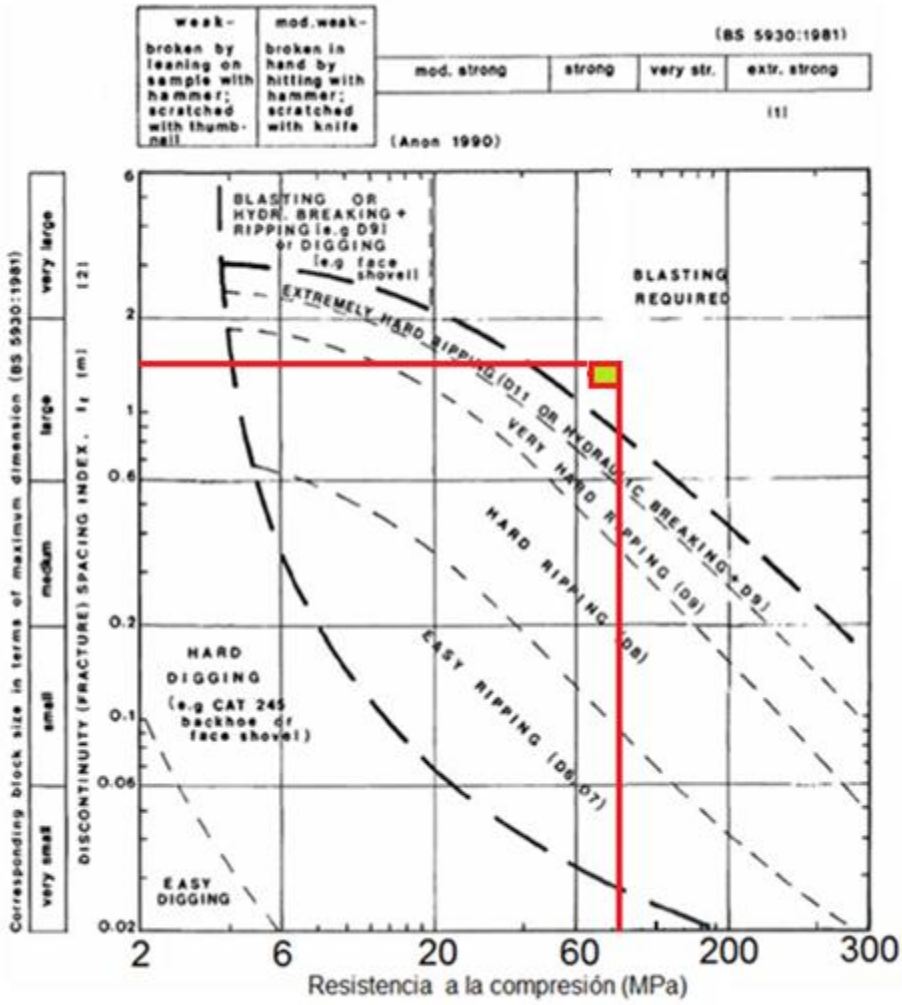


Figura 3. 6 Gráfico de excavabilidad de la roca (Karpuz *et al.* 1990).

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 antes de este estudio, 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.

Recomendaciones

Se propone que se realice un estudio de agrietamiento detallado del yacimiento, lo cual propiciará en primer lugar que el pasaporte de perforación y voladura sea el adecuado para cada zona del yacimiento y que se desarrollen trabajos con mayor grado de detalle referidos a la utilización de la tecnología de arranque.

Bibliografía

1. Aduvire & López Jimeno (1992). Arranque y Ripado de macizos rocosos.
2. Barton (1972). A model study or rock Joint deformation. International Journal of rock Mechanic Geomechanics Abstracts. Vol. 9, No. 5, Septiembre. 1972.
3. Basarir & Karpuz (2004) A Rippability Classification System for Marls in Lignite mines. Journal of Engineering Geology, (Vol. 74) Issues 3 - 4: 303 - 318.
4. Bieniawski, (1976). Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp., (Edited by Bieniawski Z.T.) 1, 97 - 106. Cape Town, Balkema.
5. Cardentey (2001). Estado “del arte” en las producciones de áridos en Cuba y propuesta del método para implantar sistemas de calidad en estos procesos. Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre “Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción”. Programa CYTED. Madrid.
6. Férnandez (2009). Yacimiento El Cacao, primer eslabón de la cadena constructiva en Granma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesina del diplomado Explotación de yacimientos de materiales de construcción] 50 p.
7. Joe Seidu A. (2007). Influencia de la construcción de cargas de sustancias explosivas sobre el estado tensional del macizo y los parámetros de la explosión en las canteras de áridos. Tesis Doctoral. ISMMM.
8. Karpuz (1990). A Classification System for Excavation of Surface Coal Measures, Mining Science and Technology, No. 11, pp. 157 - 163
9. Kirsten (1982). A Classification System for Excavation in Natural Materials. The Civil Engineer in South Africa, 24, 293 - 308.
10. Lily PA (1986). An Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability, In: Davidson (Ed). Large Open Pit Mining Conference, Ausimm, Victoria, pp 89-92.
11. López Jimeno, E. *et al*. : Manual de perforación y voladuras de rocas. Instituto Tecnológico Geominero de España. Serie: tecnología y seguridad minera, Madrid, 1994.

12. López Jimeno, E. *et al*. : Manual de perforación y voladuras de rocas. Instituto Tecnológico Geominero de España. Serie: tecnología y seguridad minera, Madrid, 2000.
13. Noa R. (2003). 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. Tesis Doctoral. ISMMM.
14. Neves (2002). Caracterización geomecánico del macizo en el yacimiento la Inagua. Tesis de Maestría. ISMMM.
15. Ovejero (1987). Laboreo de Cantera y Graveras de Áridos: arranque directo y carga. España.

Anexos

Anexo 1. Parámetros geotécnicos considerados para varios sistemas de excavabilidad.

Evaluacion de los métodos	**Importancia relativa de cada parámetro**								
	(v) Sism.	**Rc**	**Resist a carga puntual**	**Dureza de la roca**	**Abrasibidad**	**Discont/Tamaño del bloque**	**Discont/persistencia**	**Separacion de las discont**	**Orientacion de las discont**
Carterpillar(1970)	****								
Franklin(1971)			***			****			
Weaver(1975)	****			**	**	****	*	*	***
Kirsten(1982)		****				****	*		*
Minty y Kcarns (1983)	****		**		**	***	*	*	**
Scoble & Muftuoglu (1984)		**			**	****			
Smith (1986)		**			**	****	*	*	***
Sigh (1987)	***		**		**	****			
Ovejero (1987)	*								
Karpuz (1990)		**		**	**	****			
Hadjigeorgiou y Scoble (1990)			***	*	*	****			*
Petiffer y Fookes (1994)			****			****			**

Anexo 2. Calidad geomecánica por pozos según índice de RMR y RQD.

Pozo	x	y	Rc	PV	absorción	RMR	RQD
10	269293	564389	109,65	2,71	0,5	Muy buena	Muy buena
18	269490	564177	102,23	2,7	0,49	Muy buena	Muy buena
25	269335	564178	91,34	2,72	0,55	Muy buena	Muy buena
30	269194	563980	88	2,72	0,85	Muy buena	Muy buena
31	269150	564152	84,5	2,65	0,43	Muy buena	Muy buena
32	269116	564331	105,69	2,63	0,56	Muy buena	Muy buena
56	269120	563959	86,38	2,69	0,75	Muy buena	Muy buena
57	269074	564086	82,53	2,7	0,98	Muy buena	Muy buena
58	269061	564137	80,3	2,68	1,4	Muy buena	Muy buena
59	269120	563959	83,88	2,71	0,94	Muy buena	Muy buena
63	269168	564070	87,07	2,7	1,32	Muy buena	Muy buena
64	269158	564266	89,6	2,69	0,9	Muy buena	Muy buena
69	269227	563988	88,56	2,69	1,78	Muy buena	Muy buena
70	269244	564075	98,09	2,69	1,7	Muy buena	Muy buena
71	269257	564176	94,11	2,69	0,6	Muy buena	Muy buena
72	269227	564222	105,98	2,71	0,92	Muy buena	Muy buena
73	269190	564366	99,29	2,69	0,76	Muy buena	Muy buena
76	269349	564089	108,92	2,69	1,38	Muy buena	Muy buena
77	269282	564277	81,89	2,71	0,95	Muy buena	Muy buena
78	269360	564087	94,16	2,69	1,05	Muy buena	Muy buena
82	269448	564010	102,72	2,69	0,58	Muy buena	Muy buena
83	269432	564086	98,99	2,71	1,82	Muy buena	Muy buena
84	269415	564138	92,05	2,71	0,96	Muy buena	Muy buena
85	269382	564309	90,26	2,69	1,16	Muy buena	Muy buena
86	269377	564372	105,4	2,68	0,9	Muy buena	Muy buena
87	269376	564400	99,24	2,7	1,2	Muy buena	Muy buena

Anexo 3. (RMR) Clasificación de los parámetros y sus valores.

Parámetros	**Escala de valores**							
Resistencia de la roca	**Carga puntual**	**80 kg/cm^2**	**40-80 kg/cm^2**	**20-40 kg/cm^2**	**10-20 kg/cm^2**	**10 kg/cm^2**		
	compresión simple (MPa)	196	98.07-196	49.03-98.07	24.52-49.3	9.8-24.52	2.9-9.8	0.98-2.9
Valor		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
RQD		≥91	76-90	51-75	26-50	25		
Valor		**20**	**17**	**13**	**8**	**3**		
Espaciado de juntas		3m	1-3m	0.3-1m	50- 300mm	50mm		
Valor		**30**	**25**	**20**	**10**	**5**		
Condición de juntas		Muy rugosas sin continuidad cerradas, paredes de roca dura	Ligeramente rugosa <1mm. de separación. Paredes de roca dura	Ligeramente rugosa <1mm. de separación. Paredes de roca suave	Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm ó abiertos 1-5mm, fisuras cont.	Relleno blando de espesor < 5mm ó abiertas < 5mm, fisuras continuas		
Valor		**25**	**20**	**12**	**6**	**0**		
Aguas subterráneas	Cantidad infiltración 10m de túnel	Ninguna		25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min		
	Presión de agua	Cero		0.0-0.2	0.2-0.5	0.5		
	Esfuerzo principal							
	Situación general	Totalmente seco		Sólo húmedo, agua intersticial	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua		
Valor		**10**		**7**	**4**	**0**		

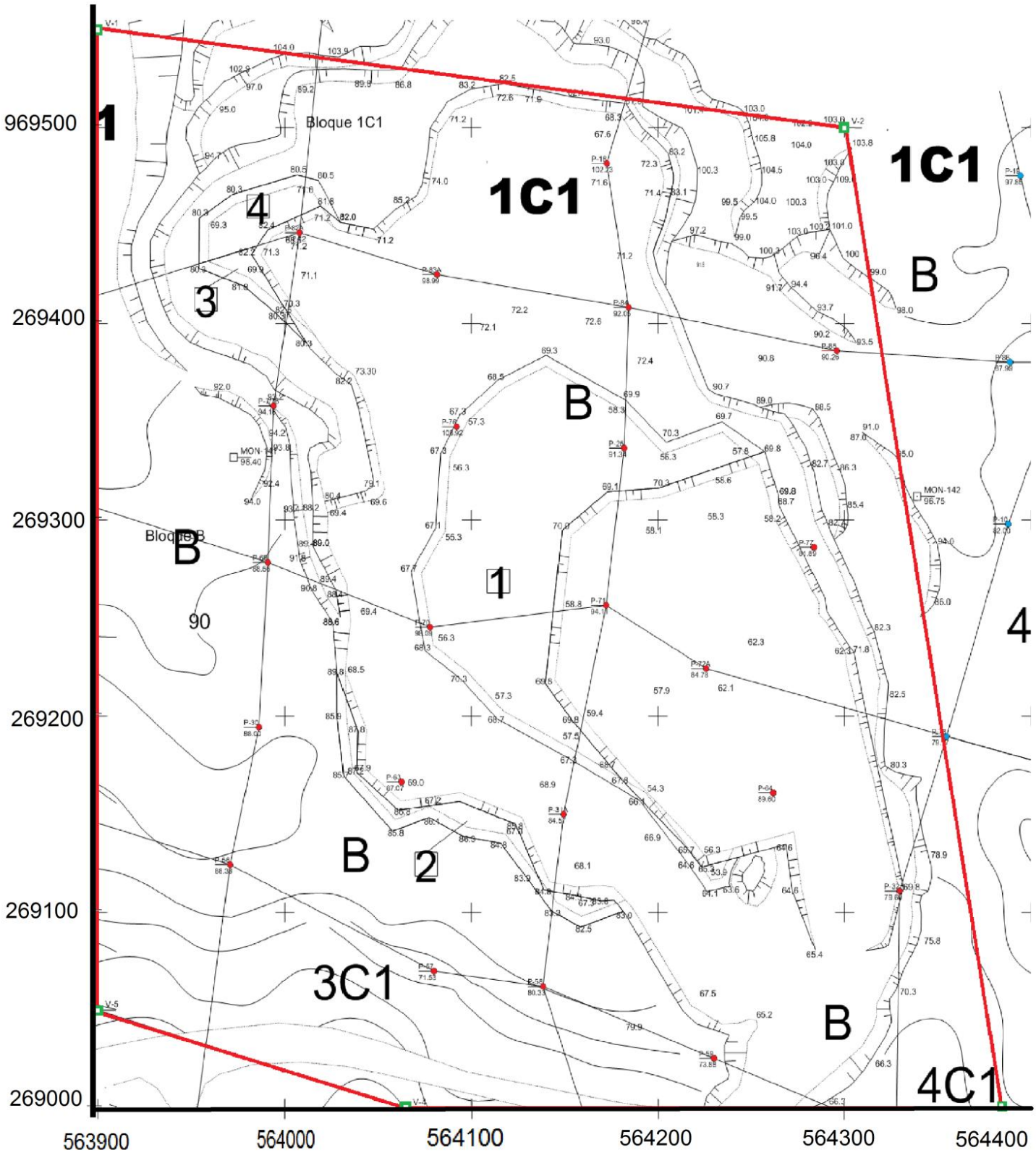
Anexo 4. Clasificación según RMR.

Clase	1	2	3	4	5
Calidad	Muy buena	buena	Media	mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

Anexo 5. Clasificación del espaciamiento de las familias de grietas.

Descripción	**Persistencia (m)**
Muy baja	< 1
Baja	1 - 3
Media	3 - 10
Alta	10 - 20
Muy alta	> 20

Anexo 6. 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	> 6000

Anexo 7. Plano topográfico de la cantera