

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE MINERÍA

**INDICACIONES METODOLOGICAS PARA LA ELECCION DEL METODO DE
ARRANQUE DE LAS ROCAS DURANTE EL LABOREO DE EXCAVACIONES
SUBTERRÁNEAS HORIZONTALES DE PEQUEÑA Y MEDIANA SECCION EN
CUBA ORIENTAL**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

Autor: MSc. Ing. RAFAEL ROLANDO NOA MONJES

Tutor: DrC. Prof. Tit. Ing. Roberto Cipriano Blanco Torrens

Año de los Gloriosos Aniversarios de Martí y el Moncada

Moa – 2003

Dedicatoria

Dedicatoria

*A mis familiares, Hermanos y padre y
Especialmente a mi madre Vilma Monje por su Dedicación y
Amor.*

*A mis hijas Darianna y Rosario, por la mayor muestra de ternura y
Amor que he conocido en mi vida.
A Nuestra Revolución.*

Agradecimientos

Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracia a la colaboración de un gran número de personas e instituciones, por lo que el mismo no estaría completo si no dejara escrito mis mas sinceros agradecimientos. Ellos son:

- Al Dr. Roberto Blanco Torrens, tutor de este trabajo, por la confianza que ha depositado al poner en mis manos tan alta responsabilidad.
- A la Ing. Yolennis Proenza Mejias (mi esposa), por su apoyo incondicional en todo, durante el proceso de realización de este trabajo.
- Al Dr. José Otaño Noguel, por la revisión y críticas de gran acierto que sirvieron de ayuda para la culminación de esta investigación.
- Al Msc. Marcos Medina Arce, por su valioso apoyo bibliográfico y estadístico.
- A los Drs. Segundo Pereda y Ricardo Batista Matos, por el tiempo dedicado a la revisión de la tesis y las críticas constructivas realizadas a este trabajo.
- Al Lic. Benigno Noa Monjes, por su preocupación y colaboración en la redacción de esta tesis.
- Al Dr. Osmany Mondejar Oquendo, jefe del Departamento de minería a partir del 2002, por haberme guiado y criticado oportunamente durante la realización de este trabajo.
- Al Dr. Roberto Watson Quezada, por su guía y sabios consejos.
- Al Dr. Rafael Guardado Lacaba, por sus orientaciones.
- A la Dra. Mayda Ulloa Carcasses, jefe del Departamento de minería hasta el año 2002, por haber depositado en mi su confianza.
- A la memoria del Dr. Joel Batista, por sus sabios consejos.
- A la Lic. Adis Fiol, por su ayuda incondicional en la materia de Inglés.
- Al equipo de futuros doctores del ISMM, especialmente a Diosdani, Miguelito, Carlos Izaguirre, y Benito, quienes mañana, tarde y noche compartimos el Gabinete Doctoral.
- A los miembros del tribunal del mínimo de Idioma de la Universidad de Oriente.
- A los miembros del tribunal del mínimo de Problemas sociales de la ciencia y la tecnología de la Universidad de Oriente.
- A la dirección de la Empresa Cobre Santiago.
- A los compañeros de la EMNI, por su valiosa colaboración.

- A la Empresa CROMOMOA, especialmente al Ms.C. Ricardo Ricardo Ávila por su apoyo incondicional
- A la UBM Las Merceditas y Mina Amores, especialmente a Orlando, Bartelemy, Eduardo Zariol y Dennis, Bienvenido y demás trabajadores de estas entidades mineras.
- A todos aquellos amigos o no, que se han preocupado día a día por mis resultados.
- A los estudiantes y trabadores de la Facultad de Geología y Minería.
- Al Dr. Jesús Blanco Moreno, por su colaboración en la terminación de este trabajo.
- Al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, por darme la oportunidad de formarme como Ingeniero de Minas en 1995 y ahora como Doctor en Ciencias Técnicas.
- A mis colegas miembros del departamento de minería, por asumir parte de mis tareas diarias.
- A la revolución cubana por transformar nuestros sueños en realidad.
- Al Dr. Armin Mariño, por sus consejos.
- Al MsC. Yuri Almaguer, por su colaboración.

A TODOS:

MUCHAS GRACIAS.

SÍNTESIS

El presente trabajo está relacionado con el proceso de construcción de las excavaciones subterráneas horizontales, en el mismo se realiza una caracterización ingeniero - geológica de varios macizos de la región Oriental de Cuba.

El autor realiza una caracterización ingenieril de las rocas, lo que permite hacer una evaluación del agrietamiento, el grado de deterioro y el tamaño de los bloques, utilizando en este último, varios métodos, determinando cuál es el que más se adecua a cada macizo estudiado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las características geo-estructurales de estos.

También se realiza la evaluación de las condiciones de estabilidad de los macizos rocosos donde se ubican las excavaciones objeto de estudio, utilizando cuatro de las metodologías de clasificación geomecánica existentes: la clasificación de Deere, la clasificación de Bulichev, la clasificación de Bieniawski y la clasificación de Barton.

Se hace un estudio detallado de las clasificaciones de excavabilidad más aceptadas, del que se obtiene que estas clasificaciones, en el mejor de los casos y cuando son usadas convenientemente, pueden ofrecer criterios preliminares sobre como resulta más adecuado realizar el arranque de la roca, pero que nunca ellas deben ser utilizadas como criterio básico, debido a la insuficiente fundamentación que poseen. No obstante lo anterior, se considera posible emplear estas clasificaciones como un criterio más a la hora de elegir el método de arranque, por lo que se define cuáles de estas clasificaciones se adecuan a cada tipo de macizo y obra estudiada.

Por último se realiza la propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilitan con su empleo lograr una correcta fundamentación de la elección del método de arranque de la roca a emplear, durante el laboreo de excavaciones subterráneas.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
CAPITULO I. SITUACIÓN ACTUAL DEL TEMA Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	7
I.1 - Estado actual de esta problemática en el mundo	7
I.2 - Situación actual del tema en nuestro país	14
I.3 - Elección y justificación de las obras a estudiar.	16
I.4 - Planeación de la investigación.	17
CAPITULO II. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS DE LOS MACIZOS ESTUDIADOS.	22
II.1 - Ubicación geográfica de las zonas estudiadas y Características técnicas de las obras.	22
II.2 - Geología e hidrogeología de los macizos rocosos estudiados.	32
II.3 - Análisis de la tectónica de los macizos estudiados.	39
II.4 - Propiedades físico – mecánicas de las rocas.	43
II.5 - Evaluación del agrietamiento en los macizos estudiados.	47
II.6 – Determinación de la bloquicidad en los macizos estudiados.	56
II.7 - Análisis del grado de deterioro de los macizos rocosos.	61
II.8 - Análisis de las condiciones de estabilidad de los macizos rocosos estudiados.	63
II.9 – Conclusiones.	68
CAPÍTULO III. DETERMINACIÓN DEL MÉTODO MAS ADECUADO DE ARRANQUE DE LA ROCA EN CADA MACIZO ESTUDIADO.	69
III.1 – Análisis de las clasificaciones de excavabilidad más utilizadas en la actualidad para la elección del método de arranque de la roca.	69
III.2 – Análisis de la aplicación de las clasificaciones de excavabilidad en los macizos estudiados.	76

III.3 – Indicaciones metodologicas para la elección del método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones horizontales de pequeña y mediana sección.	87
III.4 – Impacto socio - económico.	91
III.5 - Conclusiones	92
CONCLUSIONES.	94
RECOMENDACIONES.	95
BIBLIOGRAFÍA.	
ANEXOS.	

Introducción

INTRODUCCIÓN

Resulta impresionante la gran perseverancia y el desprecio por el riesgo que mostró el hombre desde los orígenes de la historia, en sus intentos de realizar excavaciones; valiéndose inicialmente solo de sus propias manos y la fuerza bruta, paso a paso, fue confeccionando herramientas, rudimentarios martillos, picos y cinceles, si a esta precaria situación de falta de utensilios de trabajo, le añadimos los elementos que se emplean en la entibación y la ausencia de sistemas de ventilación, comprobamos que el laboreo de túneles y galerías, implicaba en la antigüedad una enorme, formidable y sacrificada labor.

Los logros obtenidos, pese a las carencias y dificultades, muestran lo que el género humano es capaz de lograr cuando su mente está dispuesta a ello. No ha de ignorarse que la utilización masiva de esclavos, sometidos a condiciones inhumanas y cuya supervivencia no importaba, fue una de las claves en el laboreo de excavaciones en la antigüedad.

La utilización de los espacios subterráneos tiene sus inicios con el propio surgimiento del hombre, cuando este de manera consciente comenzó a utilizar las cuevas y cavernas como refugios, para protegerse de las lluvias, tormentas y de los animales, luego las utilizó como viviendas. Durante el proceso de utilización de estos espacios el hombre sintió la necesidad de cambiar sus condiciones naturales (forma y dimensiones) todo esto lo fue llevando de manera paulatina a que él mismo fuera perfeccionando las herramientas y métodos de arranque de las rocas, comenzando con el empleo de los instrumentos más rudimentarios hasta llegar a la utilización de equipos de alta productividad.

El desarrollo actual y el uso cada vez más frecuente de las excavaciones subterráneas por parte del hombre, para la extracción de recursos minerales, para el paso de vehículos, para redes ferroviarias, para el abastecimiento de agua, como almacenes, para la protección de las personas y otros fines, hace que este se dedique de manera consciente e integral a mejorar los parámetros que caracterizan a estas obras, conjuntamente con los índices técnico – económicos que influyen de una forma u otra en el desarrollo eficiente de dicha actividad.

El primer método de laboreo de galerías de minas y luego de túneles, fue la técnica del fuego; la cual fue introducida por primera vez por los antiguos egipcios, los que además de la fuerza bruta aplicaron la ciencia, con la perspectiva de mejorar la eficiencia en la

perforación de las rocas. Este método consiste en provocar un incendio en el frente de trabajo y luego sofocarlo bruscamente con agua fría, (el uso del vinagre no deja de pertenecer al dominio del mito), produciendo un brusco gradiente térmico que da lugar al resquebrajamiento de la roca. Pero esta técnica también provoca, como no es difícil imaginar, una atmósfera viciada, irrespirable, generando a menudo gases venenosos, lo que convierte al trabajo del minero en una trampa mortal, a la que solo unos pocos afortunados sobreviven.

La construcción de excavaciones subterráneas se divide en dos ramas: Las laboreadas en rocas fuertes y las hechas en rocas débiles. El principal objetivo del laboreo en rocas fuertes es horadar el macizo rocoso mediante su fractura, tradicionalmente en la construcción de túneles y obras subterráneas, en este tipo de rocas, el principal problema a resolver por el ingeniero era el arranque, porque en la mayoría de los casos la excavación no precisaba de ningún tipo de sostenimiento.

En nuestro país existe un gran número de obras subterráneas, las cuales han sido laboreadas sin llevar a cabo la correcta elección del método de arranque de las rocas, y más aún sin un previo conocimiento de los principales factores que influyen en este proceso, ni de las características reales del macizo rocoso, haciéndose “a priori” el arranque de las rocas con trabajos de voladura.

El presente trabajo tuvo como punto de partida el estudio efectuado por el autor en su tesis de maestría, en opción al título de “Master en Construcción Subterránea”, así como las informaciones obtenidas durante la revisión bibliográfica y el análisis de la situación actual del tema en nuestro país.

En este trabajo se estudian varias obras subterráneas, las cuales pertenecen a diferentes empresas o entidades. Independientemente a que estas obras se ubican en la región Oriental de Cuba, no todas se construyen en macizos rocosos con iguales características.

La información obtenida es amplia, debido a que muchos de estos macizos han sido estudiados por otros investigadores de la rama, los que han enfocado el análisis desde el punto de vista ingeniero – geológico y geomecánico; a estos estudios han contribuido significativamente los trabajos realizados por el grupo de construcciones subterráneas del departamento de minería al que pertenece el autor de esta investigación y por otros

compañeros que investigan sobre esta problemática. Independientemente de esto, es necesario señalar, que en la bibliografía consultada no se encontraron referencias en las que se desarrollen investigaciones para llevar a cabo la elección del método de arranque de la roca.

Objeto de estudio.

Diferentes obras subterráneas de la región Oriental del país, ubicadas en macizos con diferentes características geomecánicas y que fueron laboreadas sin una previa o insuficiente fundamentación del método elegido de arranque de las rocas.

De manera general se puede decir que de una forma u otra todos los trabajos e investigaciones que tratan esta problemática a nivel mundial tienen una base en común, que no es más que realizar una valoración geomecánica del macizo rocoso, donde se realizarán los trabajos.

En nuestro país cada entidad que se dedica a la proyección de obras subterráneas, en el mejor de los casos, realiza un estudio ingeniero-geológico del macizo y hace la evaluación de su estabilidad, utilizando las comúnmente denominadas "clasificaciones geomecánicas", pero esto resulta insuficiente para realizar una correcta elección del método de arranque lo que provoca, en muchos casos, mayores costos o condiciones más difíciles de trabajo.

La tecnología de arranque de las rocas para el laboreo de excavaciones subterráneas se ha desarrollado en los últimos tiempos, pero esta ha adolecido de una estrategia para su aplicación y explotación, que permita lograr un incremento en la productividad del trabajo durante la construcción de estas obras; además, habitualmente a priori se eligen los trabajos de voladura para el arranque de la roca, lo que en muchos casos, resulta inadecuado, afectando la eficiencia del trabajo y el costo de la obra.

Es por ello que se requiere que cuando se vaya a proyectar una obra subterránea, se defina, con el suficiente rigor científico-técnico la forma en que se realizará el arranque de la roca.

Problema: Necesidad de realizar la elección del método de arranque de la roca, durante el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales, con la adecuada fundamentación científico – técnica.

Hipótesis: Si se realiza una valoración de las características geomecánicas y estructurales del macizo, que influyen en el arranque de la roca y de las clasificaciones de excavabilidad actualmente empleadas, se puede obtener un sistema de indicaciones metodológicas que permiten elegir correctamente y con la fundamentación científica necesaria, el método de arranque de la roca a emplear.

Objetivo general: Obtener un sistema de indicaciones metodológicas que permitan elegir, con el rigor científico – técnico necesario, el método más adecuado de arranque de las rocas, teniendo en cuenta las características y el estado del macizo rocoso.

Objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar geomecánicamente a los macizos rocosos.
- ✓ Determinar la bloquicidad de los macizos rocosos.
- ✓ Evaluar las condiciones de estabilidad de los macizos rocosos, definiendo para cada tipo de macizo, cuál de los métodos de evaluación empleados es el más adecuado.

Aportes de la tesis:

- Se evalúa la bloquicidad del macizo, analizándose diferentes métodos existentes y definiéndose para cada caso estudiado, cuál es el adecuado a partir de las características mecánico - estructurales del macizo.
- Se realiza un análisis de las insuficiencias que presenta cada clasificación de excavabilidad y se define para cada tipo de macizo y obra, cuáles de ellas se pueden emplear para obtener criterios preliminares en la elección del método de arranque.
- Se propone un sistema de indicaciones metodológicas, que permite, con la suficiente fundamentación, elegir el método adecuado de arranque de las rocas.

Los resultados de este trabajo han sido presentados en los siguientes eventos:

- ✓ II Taller de Túneles populares y construcción subterránea, Moa. Julio 1995.
- ✓ Primer Evento “La Geología y la Minería aplicada a la construcción”, Moa. Octubre de 1997.

- ✓ XII Forum de Ciencia y Técnica, en el XXI aniversario del ISMM, Moa. Noviembre de 1997. Ponencia: Criterios para la elección del método de avance en las excavaciones subterráneas.
- ✓ Primer Evento Científico – Técnico del municipio de Moa. Diciembre 1997.
- ✓ Tercer Congreso Cubano de Geología y Minería. Habana. Marzo 1998. Ponencia: Elección del método de arranque más eficiente para el laboreo de excavaciones subterráneas en la región Oriental.
- ✓ Evento Regional de Geomecánica y la Geodesia aplicada a las construcciones, Bayamo 1998. Ponencia: Determinación del método de arranque de las rocas más eficiente para el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales en la región Oriental.
- ✓ II Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales, CINAREN 2000. Moa. Ponencia: Influencia de los parámetros geomecánicos en la elección del método de arranque de las rocas.
- ✓ II taller “La Geología y la minería aplicada a la construcción”, Moa. Abril 2001. Ponencia: Análisis de la bloquicidad y el grado de deterioro de las rocas en los macizos rocosos de los yacimientos de cromo.
- ✓ Primer taller “La Geociencia y su desarrollo”, Moa. Octubre 2001.
- ✓ XIV Forum de Ciencia y Técnica del ISMM de Moa. Septiembre del 2001.
- ✓ III Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales, CINAREN 2002. Moa. Mayo 2002. Ponencia: Impacto Socio – Económico y Ambiental provocado por el laboreo de excavaciones subterráneas, teniendo en cuenta la elección del método de arranque de las rocas.
- ✓ XV Forum de Ciencia y Técnica del ISMM, Moa. julio del 2003. Ponencia: Propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de la roca durante el laboreo de excavaciones de pequeña y mediana sección.

Publicaciones realizadas:

- Elección del método de arranque más eficiente para el laboreo de excavaciones subterráneas en la región Oriental. Libro de Memorias. III Congreso Cubano de Geología y Minería, La Habana, 1998.
- Influencia de los parámetros geomecánicos en la elección del método de arranque de las rocas. Libro de memorias. II Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales, CINAREN 2000. Moa.
- Impacto Socio – Económico y Ambiental provocado por el laboreo de excavaciones subterráneas, teniendo en cuenta la elección del método de arranque de las rocas. Libro de memorias. III Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales, CINAREN 2002. Moa. Mayo 2002.
- Criterios para la elección del método de avance en las excavaciones subterráneas horizontales. Revista Geología y Minería, XIX NO – 3-4 de 2003.
- Análisis del grado de fracturación y deterioro del macizo rocoso de las minas Las Merceditas y Amores. Revista Geología y Minería, XX No – 1 de 2004.

Capítulo I

CAPITULO I. SITUACIÓN ACTUAL DEL TEMA Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Estado actual de esta problemática en el mundo

En la actualidad, las nuevas tecnologías abren inmensas posibilidades a la construcción de túneles y obras subterráneas; la robótica, por ejemplo, aplicada a todo el sistema de trabajo de laboreo de túneles, sin duda alguna ya está abriendo una nueva y revolucionaria página en el arte de la construcción de obras subterráneas. Esta realidad en nuestros días se proyecta hacia el futuro, con una tendencia que apunta hacia mejoras en los rendimientos, en la seguridad, en la precisión y transformando la organización del trabajo.

A partir de conocer los avances que se han experimentado en el proceso de construcción de excavaciones subterráneas y teniendo en cuenta, que la base para llevar a cabo este proceso lo representa la geomecánica; aún se ponen de manifiesto algunos problemas en este aspecto; relacionados con la caracterización geomecánica de los macizos rocosos y la cuantificación de los parámetros de resistencia y de deformación; que gobiernan su comportamiento tenso – deformacional.

Sin duda alguna un macizo rocoso es un medio heterogéneo y discontinuo, cuyas características deformacionales no pueden ser medidas directamente en el laboratorio, existiendo una diferencia muy apreciable entre los valores obtenidos mediante ensayos de laboratorio y los que se obtienen en condiciones in situ; a esta diferencia se le conoce como efecto de escala. (Pinto Da Cunha, 1990 y 1993).

Con el surgimiento de la Geomecánica como ciencia, a finales de la década del cuarenta del pasado siglo, es donde se recomienda el estudio de los macizos rocosos con el objetivo de obtener, con un determinado grado de detalles, aquellos parámetros que influyen en el proceso de arranque de la roca.

Aún cuando la literatura especializada en esta materia se ha hecho más prolífera e incrementado en todo el mundo, con el empleo de revistas especializadas, con el surgimiento de nuevas técnicas y tecnologías computarizadas, el nivel actual del conocimiento en mecánica de rocas, así como la definición y obtención de parámetros y adopción de modelos que representen el comportamiento real del macizo rocoso, se encuentra en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de la ingeniería, lo que puede

estar dado por la menor antigüedad de esta o por una mayor complejidad frente a la simulación del problema real del macizo. (López Jimeno, 1997).

La geomecánica está dando a la construcción de obras subterráneas un creciente soporte científico y técnico, que ha encontrado su máximo exponente en el último cuarto del pasado siglo, hasta el punto de que hoy en día, la mayoría de los túneles se construyen bajo la supervisión de un experto en geotecnia, siendo uno de los objetivos, caracterizar geomecánicamente los macizos rocosos, constituyendo esto el estudio integral del macizo en cuestión, lo que incluye tanto el modelo geológico como el geomecánico. Esto permite abarcar aspectos tales como estructura del macizo, contactos y distribución de litologías, geomorfologías, estudio hidrogeológico, análisis de discontinuidades, ensayos in situ y a escala de laboratorio, clasificaciones geomecánicas entre otros. Convirtiéndose la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en una herramienta indispensable para pronosticar su comportamiento.

Una parte importante de la caracterización de los macizos rocosos, sin duda lo constituyen las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos de forma integrada. Las mismas son un método de ingeniería que permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel. (Palmström, 1998, 1999).

La primera clasificación geomecánica de los macizos rocosos, fue propuesta por Terzaghi en 1946 (González de Vallejo, 1998. Moreno, 1998). El método, basado en trabajos experimentales tenía el objetivo de facilitar el cálculo del sostenimiento en túneles, Terzaghi parte del criterio de que en el macizo se forma una zona de rocas destruidas por el techo de la excavación, considerando la disposición de la estratificación respecto al eje del túnel. El método propuesto por Terzaghi, carece de un índice cuantitativo mediante el cual se pueda obtener un criterio acertado del comportamiento de las rocas.

En el año 1964 Deere propone una clasificación del macizo (Blanco, 1981, 1998, González de Vallejo, 1998 y López Jimeno, 1999). La cual está basada en la recuperación de testigos de perforación, denominada como el sistema RQD (*Rock Quality Designation*), índice de calidad de las rocas. Este índice se continúa utilizando en la actualidad como parte de muchas de las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos. A modo de

apreciación, este índice tiene el inconveniente de que su valor se puede afectar, si no se realiza correctamente el sondeo del testigo, ya que durante este proceso pueden ocurrir fracturas y confundirse estas con las inicialmente existentes en las rocas. Los valores de este índice, también se pueden estimar con el empleo de la expresión propuesta por Palmström en 1974 (Moreno, 1998), la cual parte del análisis del número de grietas por metro cúbico.

En esta etapa surgieron también los trabajos de T. Hagerman en 1966, el cual establece la diferencia de cinco tipos de macizos, según su estabilidad, para llegar a esta definición el autor parte de la valoración del grado de debilitamiento estructural de los macizos, desde macizos totalmente estables (macizos homogéneos e isotropos) hasta macizos muy inestables, que presentan un gran número de discontinuidades. En este caso la metodología propuesta no cuenta con una valoración cuantitativa de las discontinuidades o grietas, ni se hace una valoración de las orientaciones de las principales superficies de debilitamiento.

En 1972, surge un nuevo método para llevar a cabo una clasificación geomecánica de las rocas, la misma fue propuesta por Wickham, Tiendemain y Skinner (Blanco 1998), esta clasificación surge con el nombre de RSR (*Rock structure rating*). Para la introducción de esta nueva clasificación se analizaron más de 100 casos de túneles construidos, a partir de estos se estableció una correlación entre el RSR y el espacio con el cual deben colocarse los elementos de fortificación.

En la misma década Bieniawski, propone su clasificación, la cual surgió en 1973, (su modificación fue concluida en el año 1979), esta metodología fue utilizada ampliamente en la zona de Escandinavia para su posterior divulgación y en ella se establece una cuantificación de la calidad del macizo rocoso, mediante el índice RMR. En esta metodología se propone un gráfico para seleccionar el sostenimiento de los túneles en función de los valores RMR (Blanco, 1998 y López Jimeno, 1997, 1999).

En el año 1974 fue propuesto un sistema para valorar la calidad del macizo, por el Instituto Geotécnico Noruego (Barton, Lien y Lunde, 1974), el cual se fundamenta en la determinación de un índice denominado como Q. Para la determinación de este índice se parte del empleo del RQD de Deere, conjuntamente con la utilización de otros parámetros del macizo rocoso. A partir de observaciones realizadas en 211 túneles de los países escandinavos, los autores establecieron una correlación entre la calidad del macizo y el

sostenimiento necesario, dependiendo este también de las dimensiones equivalentes de la excavación (Ramírez y Huerta, 1994; Moreno, 1998; Gonzáles de Vallejo, 1998).

Estas clasificaciones fueron creadas y comprobadas en macizos constituidos en su gran mayoría por granitos, cuyas características son bastante diferentes a las que se presentan en nuestra región de estudio, por lo que tanto los valores obtenidos de los parámetros estudiados, como el de los resultados finales obtenidos con el empleo de estas clasificaciones se han de ajustar a nuestras condiciones concretas.

Bulichev en la década de los 70 del pasado siglo, desarrolló un método para valorar la estabilidad de los macizos dado por el índice de calidad de las rocas (S) (Bulichev, 1982. Martínez, 1999), esta clasificación es bastante completa, en la misma se incorporan nuevos parámetros, como la fortaleza de las rocas. Este criterio podría ser más completo si en vez de utilizar el parámetro n , el que define el módulo de agrietamiento lineal del macizo, se empleara el módulo volumétrico, debido a que con el parámetro n no se puede precisar el volumen de los bloques.

Conjuntamente con esta metodología de clasificación del macizo rocoso, surgen otros criterios, como el de Franklin, 1970 – 1975 y los de Louis en 1974 (Moreno, 1998. Gonzáles de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998), estos métodos han tenido menos seguidores.

En la década del 80 del siglo pasado surgieron nuevas clasificaciones, como el R_{Mi} (*Rock Mass Index*), propuesto por Palmstrom en 1996, a partir de la resistencia a la compresión simple de las rocas. Este índice permite caracterizar a los macizos rocosos y calcular el sostenimiento en las excavaciones subterráneas. (López Jimeno, 1999).

En 1985, Vallejo propone una clasificación geomecánica, basada en la determinación del SRC (*Surface Rock Classification*), esta ha alcanzado gran popularidad en España, en ella el autor trata de integrar determinados factores que otras clasificaciones no incluyen o que su valoración no es suficiente, como es la geología, la tectónica, el estado tensional, la sísmica y las condiciones constructivas, pero no logra establecer con claridad la influencia de las tensiones sobre las excavaciones.

Todas estas clasificaciones logran en un mayor o menor grado, una caracterización cuantitativa de los macizos rocosos, lo que permite proponer el tipo de sostenimiento a emplear en las excavaciones.

Independientemente de que estas clasificaciones geomecánicas han brindado un aporte significativo en el conocimiento de los macizos rocosos, su comportamiento mecánico-estructural y permiten, en algunos casos, proponer el tipo de sostenimiento, ninguna de ellas propone realizar un análisis de los diferentes parámetros del macizo, de forma tal que permita elegir el método de arranque de la roca.

La primera clasificación de los macizos rocosos respecto a la excavabilidad, fue propuesta por Franklin en 1971, esta se basa en el espaciamiento entre fracturas y la resistencia a la compresión simple de las rocas, estos parámetros son obtenidos de los testigos del sondeo. En este caso el índice de espaciamiento entre fracturas 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, pero no hay una clasificación sobre el tipo de maquinaria de arranque a utilizar ni sus capacidades.

Esta clasificación ha sido ampliamente difundida (Navy, 1986) y aún se menciona en los países anglosajones. Realmente esta clasificación es muy conservadora, ya que exige voladuras para rocas masivas (con RQD de 90 a 100), a partir de una resistencia a la compresión simple muy baja.

Louis en 1974 presentó una clasificación basada en el RQD y la resistencia a la compresión simple de las rocas, a partir de un trabajo realizado para el centro de la villa de Marsella, excavado en calizas urgonianas. Este criterio no se puede utilizar en la actualidad a causa del bajo límite asignado a la excavación mecánica, pero en todo caso el concepto en que se basa es correcto.

En 1977 Atkinson propuso unas zonas de aplicación para cada tipo de maquinaria para el arranque de la roca, en función exclusivamente de la resistencia a compresión simple de la roca, en este caso 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 este que tiene una gran influencia en el proceso de excavación, ya que en las rocas duras, más que un corte de estas, lo que se realiza es un arranque aprovechando los planos de debilitamiento estructural o las diaclasas abiertas.

Basándose en la clasificación de Louis, Romana Ruiz en 1981 presentó una nueva clasificación, la cual estaba más adaptada a las capacidades tecnológicas de la maquinaria de excavación, en 1993 esta clasificación fue presentada en su versión más actualizada, con la cual se logró una mayor difusión del método, (Romana, 1981, 1994). Según Romana se propone una 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. Según su autor esta clasificación es indicativa y debe usarse en la fase de estudios previos o anteproyectos de obras.

Uno de los estudios que se hizo sobre ripabilidad de las rocas, realizados por Kirsten en 1982, afirmaba que la velocidad sísmica no era un parámetro que reflejara la facilidad de arranque de los macizos rocosos fielmente, ya que tal operación estaba muy influenciada por diversas características de los materiales.

En este caso Kirsten propone un sistema de clasificación para la excavación de los macizos rocosos, basado en la determinación de un índice de excavabilidad de estos, el que se basa en la utilización de varios parámetros que caracterizan a los macizos. Al igual que otras clasificaciones, en esta no se tiene en cuenta la dirección de ataque de la roca con respecto a la dirección de manifestación de las diaclasas.

Abdullatif y Crudden, en 1983 en una investigación llevada a cabo en 23 proyectos, donde se realizaba el arranque de las rocas con medios mecánicos y voladuras, estimaron que la excavación es posible hasta un RMR de 30 y ripable hasta 60. Los macizos clasificados como de calidad buena o mejores por el sistema RMR deben ser objeto de perforación y voladura.

Estos autores 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 ripados. Este hecho puede ser debido a la mala adecuación del sistema de clasificación de Q a las operaciones de arranque.

En 1984 aparece un nuevo índice de excavabilidad (IE), el cual fue propuesto por Scoble y Muftuoglu, esta clasificación consiste en la combinación de cuatro parámetros geomecánicos: resistencia a la compresión simple, extensión de la meteorización, distancia entre grietas y planos de estratificación.

En esta clasificación se tiene en cuenta el efecto reductor de la resistencia de las discontinuidades, o incluso de la matriz rocosa, lo que se obtiene a partir de la meteorización, también se hace una valoración del tamaño medio de los bloques, siendo este uno de los parámetros que mayor influencia tiene en la excavación. (Scoble y Muftuoglu, 1984).

Otra clasificación de excavabilidad o método empírico, fue propuesta en 1988, por Hadjigeorgiou y Scoble, la que se basa al igual que la clasificación anterior en la obtención de un índice de excavabilidad (IE). Estos autores proponen la combinación de varios parámetros geomecánicos, dentro de los que se encuentran: resistencia bajo carga puntual, tamaño de bloque, alteración y disposición estructural relativa. (Hadjigeorgiou y Scoble, 1990).

En estas dos últimas clasificaciones los autores tienen en cuenta dos factores que juegan un rol muy importante en el proceso de laboreo, ya que estos condicionan la propagación de la rotura a través del material, la resistencia de la roca y el tamaño de los bloques, los cuales constituyen el núcleo o estructura básica del sistema de clasificación, pero no se tiene en cuenta al igual que en otras clasificaciones, el coeficiente de abrasividad y otros elementos geomecánicos que también influyen en el proceso de arranque.

Singh, R.N. y otros investigadores en 1989, definieron un nuevo índice de arranque de las rocas IR, este consistía en la determinación de cuatro parámetros geomecánicos para la clasificación de los macizos; estos parámetros son: Espaciamiento entre discontinuidades, resistencia a la tracción, estimado a partir del índice de carga puntual o con ensayo Brasiliano, 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 a los macizos rocosos en cinco grupos de acuerdo a la facilidad de arranque mecánico de la roca. (López Jimeno, 1997).

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.

I. 2 Situación actual del tema en nuestro país

En los últimos tiempos el proceso de excavación de las obras subterráneas ha alcanzado un desarrollo considerable principalmente en el arranque de las rocas, pero todavía no se han logrado los resultados deseados, fundamentalmente en el proceso de elección del método de arranque más eficiente.

En relación con esta problemática y conforme al acelerado auge que se está alcanzando a nivel mundial en este aspecto; en nuestro país 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.

Hasta la fecha no se conoce de ningún trabajo precedente en nuestro país que trate la problemática relacionada con la elección del método de arranque de las rocas, a no ser aquellos trabajos dirigidos o ejecutados por parte del autor de esta investigación y que se recogen en la misma.

En cuanto a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, se puede decir que en los últimos años su realización se ha incrementado notablemente. Este incremento en los estudios geomecánicos de los macizos rocosos, está dado, entre otras causas porque a partir del año 1994, se comienza a impartir en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, dos maestrías, la de Geomecánica y la de Construcciones Subterráneas y los cursantes de estas maestrías, conjuntamente con el grupo de construcción subterránea del departamento de minería, se trazan como objetivo la realización de la caracterización geomecánica de diferentes macizos rocosos de nuestro país.

Los resultados alcanzados en esos trabajos constituyen la base de esta investigación, dentro de ellos tenemos: Elección del método de arranque a partir de la clasificación geomecánica del macizo (Noa, 1996); Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la mina Las Merceditas (Cartaya, 1996), Mecanismo de acción de la presión minera en mina Las Merceditas (Mondejar, 1998), La geometría del agrietamiento de la mina Las Merceditas y su estabilidad (Falero, 1996), así como otras investigaciones. (Blanco, 1997 y 2000. Cartaya, 1999 y 2000. Mondejar, 2000).

El Centro de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos y la Empresa Constructora Militar número 2, ambas en Holguín, desarrollaron un importante trabajo en cuanto al análisis de

las condiciones ingeniero - geológicas y geomecánicas, en los macizos rocosos, en las zonas donde se construye el trasvase Este - Oeste, en este caso para la evaluación de la estabilidad del macizo fue empleada la metodología de Bieniawski, modificada por Federico Torres 1989, además se utilizaron también las metodologías de Barton y la de Deere, así como otros métodos novedosos para el estudio del macizo, tal es el caso del procesamiento de imágenes por teledetección y métodos geofísicos (Colectivo, 1991. Colectivo, 1992. Hidalgo, 1991. Pérez, 1991).

En el año 2000 se realiza un análisis de los trabajos de campo utilizados en la evaluación de los macizos rocosos, con el empleo de métodos no tradicionales utilizados en nuestro país, este análisis fue realizado por el ingeniero Alfaro, J.M., con el trabajo titulado "Aplicación de nuevas técnicas en el estudio ingeniero - geológico de los macizos rocosos". En el mismo se hace un análisis del agrietamiento de varios túneles de la provincia de Gramma y Santiago de Cuba. Aquí fueron empleadas las metodologías de Barton, Bieniawski y el SMR de Romana. También fueron determinadas las propiedades físico - mecánicas de las rocas, el análisis cinemático de los bloques y la medición de las deformaciones en el interior de las excavaciones.

En el trabajo sobre la determinación de los principales índices técnico - económicos de los túneles de la ciudad de Holguín (Acosta, 1996) se hace una valoración de los diferentes parámetros del agrietamiento, los que permitieron conjuntamente con otros elementos llevar a cabo la determinación de la estabilidad en estos macizos.

Como se puede apreciar, en nuestro país existe una serie de trabajos relacionados con la clasificación geomecánica de los macizos rocosos, estos trabajos tienen en cuenta como aspecto más importante, las condiciones ingeniero - geológicas y a partir de estas proponen realizar la evaluación de la estabilidad y la propuesta del sostenimiento. Sin embargo ninguna de estas investigaciones han enfocado el problema o los análisis con el objetivo de mejorar el proceso de arranque de las rocas, a partir de la correcta elección del método.

1.3 Elección y justificación de las obras a estudiar

En la región oriental de Cuba existen decenas de kilómetros de excavaciones subterráneas que han sido laboreadas sin una fundamentación adecuada de la elección del método de arranque de las rocas.

Para llevar a cabo este trabajo se seleccionaron excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección transversal, las cuales son de interés económico o están destinadas para la protección de la población, las mismas se encuentran ubicadas en las provincias de Holguín, Santiago de Cuba, Guantánamo y Las Tunas. Estas excavaciones se laborean en macizos rocosos con diferentes características ingeniero - geológicas, lo que hace posible que el arranque de la roca se pueda realizar por diferentes métodos.

Las obras seleccionadas para su estudio fueron:

- La mina de cromo “Las Merceditas” ubicada cerca del poblado La Melba al suroeste de la ciudad de Moa en la provincia Holguín.
- La mina de cobre “El Cobre” que se ubica en el poblado El Cobre, al oeste de la ciudad de Santiago de Cuba.
- Túneles del trasvase de Mayarí, ubicados en la región montañosa de este municipio perteneciente a la provincia Holguín.
- Túneles populares ubicados en la zona montañosa de la ciudad de Holguín, provincia Holguín.
- Túnel hidrotécnico ubicado en la ciudad de Las Tunas, provincia Las Tunas.
- Túneles populares ubicados en la zona montañosa de la provincia de Guantánamo.
- Túneles populares diseminados en la ciudad de Moa perteneciente a la provincia Holguín.
- La mina de cromo “Amores” ubicada cerca del poblado de Cayogüin en el municipio de Baracoa en la provincia Guantánamo.

Teniendo en cuenta que las obras analizadas se encuentran ubicadas en diferentes macizos rocosos de la región Oriental, es necesario hacer un análisis de las características ingeniero

– geológicas de cada una de ellas. Se estudiaron macizos donde aparecían rocas del grupo de las ofiolitas, rocas sedimentarias y rocas tobaceas entre otras, valorando que cada una de ellas tenían características muy variadas, las cuales se ubicaban en diferentes formaciones o macizos rocosos.

1.4 Planeación de la investigación

Para darle cumplimiento a los objetivos propuestos en este trabajo, se estableció una metodología integral de investigación, en la que se utilizan varios métodos científicos de investigación, como son:

- ✓ Revisión bibliográfica y procesamiento de datos.
- ✓ Muestreo.
- ✓ Modelación matemática.
- ✓ Recopilación y síntesis.
- ✓ Observación.
- ✓ Experimentación.

Esta metodología de investigación cuenta con varias etapas (ver figura 1), dentro de las que tenemos:

- Revisión bibliográfica, recopilación y procesamiento de la información.
- Definición del objeto de estudio y las tareas de investigación a realizar para cumplir los objetivos propuestos.
- Evaluación de las condiciones ingeniero – geológicas del macizo rocoso.
- Evaluación de la bloquicidad del macizo rocoso.
- Evaluación de la estabilidad del macizo rocoso.
- Análisis de las clasificaciones de excavabilidad actualmente utilizados en la elección del método de arranque.
- Definición de las clasificaciones de excavabilidad que se pueden emplear en cada tipo de macizo y obra.
- Propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas, para la elección del método de arranque de la roca.

Descripción de las diferentes etapas.

Revisión bibliográfica, recopilación y procesamiento de la información: Se realizó el estudio y procesamiento de gran cantidad de materiales, dentro de los que tenemos los diferentes textos en los que se aborda esta problemática, los artículos publicados en diferentes revistas del mundo, varias tesis de maestrías y doctorados, así como varios trabajos de diplomas. También fueron consultados algunos trabajos presentados en eventos nacionales o internacionales, se hizo búsqueda en Internet, se revisaron los informes geológicos y de propiedades físico – mecánicas de las rocas de diferentes entidades y de algunos centros de investigación, así como otros materiales. Todas estas informaciones fueron analizadas desde un punto de vista crítico para poder discernir el marco teórico y antecedentes de esta investigación.

En la bibliografía solamente se consignan los materiales más actualizados y los que tuvieron una intervención directa en el trabajo. Una vez obtenida toda la información posible, se realizó un análisis para valorar los antecedentes y la situación actual del tema.

Definición del objeto de estudio y las tareas de investigación a realizar para cumplir los objetivos propuestos: En esta etapa se establecieron las áreas o zonas de investigación, lo que estuvo condicionado, en todos los casos, a la existencia de excavaciones subterráneas y diferentes características ingeniero – geológicas de los macizos rocosos.

Evaluación de las condiciones ingeniero - geológicas del macizo rocoso: En esta etapa se realizó un análisis detallado de cada macizo rocoso, teniendo en cuenta los aspectos que tienen una incidencia directa en el proceso de determinación del método de arranque de las rocas, como son:

- ✓ Estudio de las condiciones geológicas e hidrogeológicas.
- ✓ Análisis de las características tectónicas de cada región de estudio.
- ✓ Estudio de las propiedades físico – mecánicas de las rocas.
- ✓ Valoración del agrietamiento del macizo rocoso.
- ✓ Análisis del deterioro del macizo rocoso.

Durante el estudio de las propiedades físico-mecánicas de las rocas, cuando se utilizaron resultados existentes de trabajos de laboratorio, se tuvo en cuenta que en todos los casos el error reportado estuviese por debajo del 10 por ciento y la confiabilidad por encima del 85 por ciento. En los casos en que se realizó la determinación de las propiedades, para la toma de muestra siempre se utilizaron criterios aleatorios y se determinó el número de muestras a ensayar a partir del coeficiente de variación y el coeficiente de Student.

Para la caracterización del agrietamiento se utilizó el método geológico (Blanco, 1998) para lo cual se dividieron las excavaciones en tramos con características litológicas similares en todas las obras analizadas. En todos los casos el muestreo se realizó de forma aleatoria y garantizando la representatividad. Para garantizar un muestreo correcto se combinaron varios métodos de toma de muestra; se utilizó la combinación del estratigráfico, el grupal y el intencional.

Para determinar el grado de deterioro del macizo, se realizó un estudio mediante observaciones visuales, para valorar el cambio de algunas propiedades de las rocas como el color y la desintegración física, se realizaron también trabajos experimentales para determinar la variación de la resistencia y otras propiedades de las rocas, por la acción de la meteorización, el agua, la atmósfera subterránea y otros factores.

Evaluación de la bloquicidad del macizo rocoso: Para la valoración de la bloquicidad se utilizaron varios métodos, los que se basan en las características del agrietamiento, a partir de este análisis se determinó cuál de ellos es el más adecuado para cada tipo de macizo, teniendo en cuenta el estudio de la correspondencia entre los resultados obtenidos por cada método y los obtenidos por el estudio del macizo en condiciones in situ, la observación visual de estos y la evaluación de las condiciones geo - estructurales que presenta cada macizo.

Evaluación de la estabilidad del macizo rocoso: La evaluación de la estabilidad se realizó por cuatro de las clasificaciones más utilizadas en la actualidad, (Deere basada en los valores del RQD, Bieniawski, basada en los valores del RMR, la del Instituto Noruego de Geotecnia, basada en el cálculo de la Q de Barton y la clasificación propuesta por Bulichev, basada en los valores del índice S).

Para establecer cuál método es el más confiable en cada macizo, primero se utilizó el test de la F de Fisher, para saber si existen diferencias significativas entre los resultados

obtenidos, con un nivel de significación de 0,05. Por último para determinar el grado de confianza de los diferentes métodos se determinó la correspondencia entre los resultados obtenidos con su empleo y los obtenidos del estudio del historial del comportamiento de la estabilidad de las excavaciones y de la observación visual de estas.

Análisis de las clasificaciones de excavabilidad más utilizadas en la actualidad para la elección del método de arranque de la roca: Se hace el estudio de varias clasificaciones de excavabilidad (métodos empíricos) que actualmente se utilizan para obtener criterios sobre el método de arranque de la roca que se debe utilizar. Se analizan las deficiencias e insuficiencias de estas clasificaciones que limitan su empleo por sí sola, a la hora de hacer una elección fundamentada del método de arranque.

Valoración de la aplicabilidad, de las clasificaciones de excavabilidad en cada tipo de macizo y obra estudiada: Se define cuáles de las clasificaciones de excavabilidad analizada se puede usar para cada tipo de macizo y obra, con vista a obtener un criterio preliminar sobre el método de arranque que se debe de emplear.

Propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas, para la elección del método de arranque de la roca: A partir del estudio realizado y de los resultados obtenidos, se propone un sistema de indicaciones metodológicas, que permite realizar la correcta y fundamentada elección del método de arranque de la roca, a emplear en las condiciones de estudio.

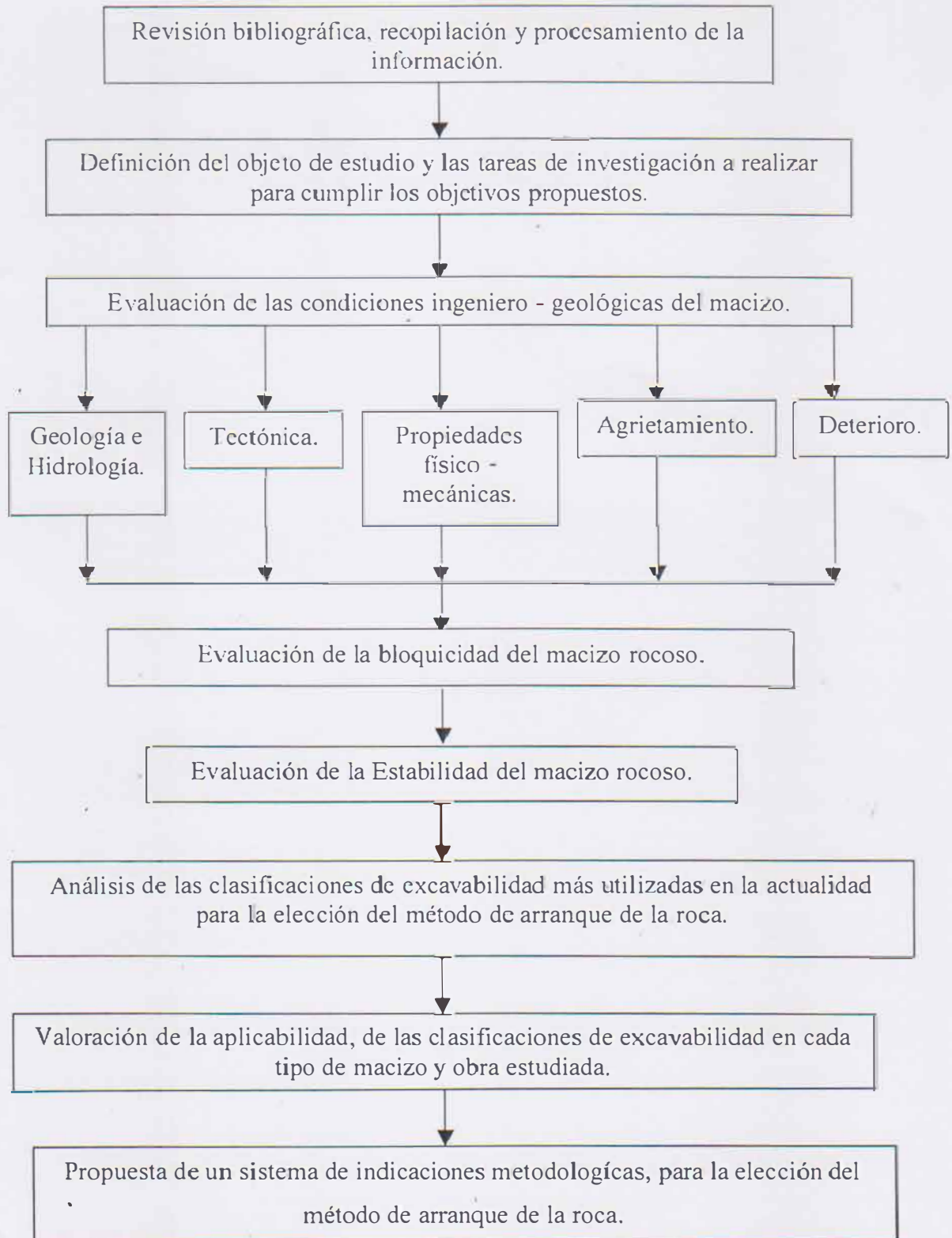


Figura 1. Metodología de investigación.

Capítulo II

CAPITULO II: EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS DE LOS MACIZOS ESTUDIADOS.

II.1 Ubicación geográfica de las zonas estudiadas y Características técnicas de las obras

Mina Las Merceditas.

La mina Las Merceditas se encuentra ubicada en la parte Noreste de la provincia Holguín a 240 Km de la capital provincial, a 46 km de la ciudad de Moa, al Sur – Este de la misma. Este yacimiento se encuentra ubicado en el macizo montañoso de Sagua - Baracoa, cerca de las márgenes del río Jaragua.

Las vías de comunicación del yacimiento con el poblado de Punta Gorda, la ciudad de Moa y otros yacimientos como Cayo Guan, Potosí y Amores entre otros, es mediante terraplenes y carreteras.

El clima de la región es subtropical, los periodos de lluvias se acentúan en los meses de Octubre y Noviembre, el régimen de temperatura es estable para casi todo el año. El relieve de la región donde se encuentra el yacimiento es montañoso, la cota de mayor altura alcanza los 800m, predominando alturas entre 500 y 600 m.

La vegetación es tropical y muy densa (dependiendo de la capa vegetal y la orografía), predominando una gran variedad de helechos y grandes recursos de árboles maderables, los que son explotados por las empresas forestales del territorio.

El desarrollo socioeconómico de la región está centrado en la industria minera; por una parte la empresa Cromo – Moa que radica en el poblado de Punta Gorda y que se encarga de la extracción y beneficio del Cromo y por la otra los yacimientos de lateritas niquelíferas que se encuentran al Sur del municipio de Moa, las cuales son explotadas por las Empresas Comandante Ernesto Che Guevara y Comandante Pedro Soto Alba.

Para el desarrollo de los trabajos mineros en la mina Las Merceditas se laborea un gran número de excavaciones subterráneas, las cuales se dividen en: horizontales, inclinadas y verticales, estas excavaciones por sus características técnicas tienen diversos fines dentro de los que se destacan: el tránsito del personal, la ventilación, para la extracción, el transporte del mineral y otros materiales y para el desagüe, etc.

Los trabajos de investigación fueron realizados en todo el sector de la mina, eligiéndose para el mismo las excavaciones horizontales que se consideraron más representativas, entre las que se incluyen el socavón principal, la galería número 4 (de transporte), las galerías de ventilación entre otras. Estas excavaciones tienen una longitud variable, las cuales sobrepasan los 100m para todos los casos, generalmente su sección transversal es de paredes rectas con techo abovedado, con un ancho entre 2 y 2,30m y una altura de 2,10 a 2,30m, la profundidad de ubicación es variable llegando en algunos casos hasta los 600m. Estas excavaciones tienen una dirección variable y están laboreadas por diferentes tipos de rocas, tales como: el gabro, la peridotita y la dunita, ver figuras 1 y 2 del anexo I.

En algunas de estas excavaciones aparecen tramos donde la afluencia de agua es muy elevada y otros donde el macizo es totalmente seco. También se observa que algunos tramos de varias galerías se encuentran fortificados con cuadros de metal espaciados a una distancia de 1 – 1,5m, en los cuales se utilizó un encamado de madera; para lograr el contacto macizo – fortificación y proteger la excavación de posibles caídas de pedazos de rocas.

Estas excavaciones se laborean, con el empleo de perforación y explosivos utilizando perforadoras manuales, solo en el caso de las excavaciones verticales para su laboreo, se emplea la plataforma trepadora Alimak, la cual es utilizada en función de la longitud de la excavación.

Mina El Cobre.

La mina El Cobre se ubica en las estribaciones Norte del macizo montañoso de la Sierra Maestra, en la parte Sur de la provincia de Santiago de Cuba, a 13 km y al oeste de esta ciudad.

Para la comunicación, la región cuenta con un conjunto de carreteras, las cuales enlazan esta zona con la capital provincial y el resto del país.

El clima de la región es tropical y húmedo, la temperatura promedio es de 26 - 27 °C. Los niveles alcanzados por las precipitaciones atmosféricas son de 1000 – 1700mm anuales. El periodo de sequía es en los meses de Noviembre – Abril, con un nivel medio mensual de precipitaciones que oscila entre 25 – 27 mm y en el periodo de lluvia, que es en los meses de Mayo – Octubre, la media mensual de precipitaciones es de 80 – 250 mm.

El relieve de la región es complejo y muy accidentado, las cotas absolutas de las elevaciones oscilan entre 300 y 400m, alcanzando los 800 m el pico El Cobre, el cual se encuentra cerca del yacimiento. En esta zona abundan los valles profundos y las estribaciones montañosas de la dirección meridional, con pendientes suaves hacia la zona del mar Caribe.

La vegetación es tropical y está representada por arbustos y matorrales entrelazados por plantas urticantes con espinas.

El desarrollo socioeconómico de la región, donde se ubica la mina El Cobre está representado fundamentalmente por la industria minera y en menor escala por la agricultura, la región se abastece de energía eléctrica de la red nacional.

En la mina El Cobre hay un gran número de excavaciones horizontales, inclinadas y verticales, con determinadas funciones, donde existen trabajos de apertura, preparación y explotación. El trabajo se realizó en todo el sector de la mina, escogiéndose para el estudio las excavaciones horizontales que fuesen más representativas para todo el sector de la mina.

Estas excavaciones se laborean en rocas del tipo tobáceas de color gris verdoso, con una fortaleza de 4-5 según la escala de M.M. Protodiakonov; las mismas tienen intercalaciones de basalto, porfinitas andesíticas y tobas brechosas. Generalmente estas excavaciones tienen un ancho que oscila entre 2,2 y 2,3m y un alto entre 2,3 y 2,5m, la forma de la sección transversal es de paredes rectas con techo abovedado y se encuentran generalmente a una profundidad de 200 a 400m. En algunos casos estas excavaciones se encuentran fortificadas, ver figura 3 del anexo I.

En esta mina la afluencia de agua es insignificante, aunque en el nivel inferior donde el flujo de agua es mayor el desagüe se realiza por la galería principal donde se encuentran dos colectores que se unen al final de la red, la cual llega hasta la estación de bombas situada al comienzo de la estación del pozo 4.

Para el laboreo de las excavaciones el arranque de las rocas se realizó con trabajos de perforación y voladura, encontrándose en algunos casos excavaciones viejas que fueron construidas durante el primer periodo de explotación de la mina, hecho este que afectó considerablemente las condiciones de estabilidad de las excavaciones laboreadas.

Túneles del trasvase de Mayarí.

Las obras estudiadas del municipio Mayarí, se encuentran situadas al Sur – Oeste del mismo, distribuidas en el macizo montañoso de la sierra cristal, estas obras se encuentran ubicadas cerca de varios poblados como son: Arroyo del Medio, Seboruco, Arroyo Seco y otros.

El clima de esta región es tropical, los periodos de lluvias son abundantes y se manifiestan durante casi todo el año, las precipitaciones alcanzan niveles muy altos, fundamentalmente en los meses de Abril – Mayo y Octubre –Diciembre. Las temperaturas durante el año no varían considerablemente, registrándose valores en invierno de 20 – 23⁰C y en verano de 25 – 28⁰C.

El relieve en esta región es montañoso compuesto por elevaciones de pendiente muy abrupta. La vegetación es muy variada, representada fundamentalmente por una gran variedad de árboles maderables, pinos y otros arbustos que se encuentran formando matorrales con plantas enredadoras (Lianas).

La región tiene un desarrollo económico significativo, en la agricultura y en la minería del níquel, encontrándose dentro de este último la mina de Pinares de Mayarí, cuyo mineral es procesado por la planta metalúrgica de la Empresa René Ramos Latour. Otro renglón importante está representado por la Empresa Forestal y la Industria Azucarera. El municipio cuenta con una termoeléctrica, la cual se encuentra conectada a la red nacional.

El trasvase de Mayarí está constituido por un gran número de tramos de excavaciones subterráneas horizontales y por tramos de canales. Para la realización de este trabajo fueron analizados varios tramos de excavaciones subterráneas.

En este caso los túneles son considerados como excavaciones de mediana sección, con un área de 30 a 35m², los mismos tienen una longitud variada, las que dependen de las dimensiones de la elevación donde esté situado el mismo. Estos túneles tienen una forma de la sección transversal de paredes rectas con techo abovedado o semicircular, su ancho es de 4 a 5m y tienen una altura de 5 a 6m, los mismos se encuentran ubicados a una profundidad de 200 a 450m y se laborean con el método de perforación y voladura. Estos túneles se fortifican con hormigón armado, ver figuras 4, 5 y 6 del anexo I.

Para el laboreo de estos túneles se emplearon equipos de una elevada productividad, como: las perforadoras de dos brazos llamadas VBCHA y los camiones Toros. Estos túneles están laboreados por rocas de diferentes tipos como son: serpentinas, calizas, margas, conglomerados y brechas basálticas entre otras.

Para realizar la fortificación de hormigón armado in situ se emplearon máquinas de lanzar hormigón las cuales fueron muy efectivas durante el proceso de fortificación.

Túneles populares de Holguín.

Las obras estudiadas se encuentran ubicadas en el extremo occidental de la provincia Holguín, en el propio municipio cabecera.

Esta región tiene comunicación directa mediante carreteras y terraplenes con los municipios de Gibara, Rafael Freyre, Calixto García, Cacocún, Cueto y Urbano Noris.

El clima de la región es tropical de sabana, relativamente húmedo, en el período de lluvia en los meses de (Mayo - Junio), la temperatura promedio está en el rango de 24 – 27°C. La vegetación predominante la constituyen las malezas compactas con espinas, algunos pastos intercalados, bosques jóvenes y algunos cultivos de caña de azúcar. El relieve es montañoso, donde predominan elevaciones de mediana y pequeña altura.

La región de estudio, donde se ubican estas obras tiene un elevado desarrollo económico, por ser este el municipio cabecera cuenta con varias industrias y sectores importantes que influyen en el desarrollo del resto de la provincia y del país. El nivel cultural es alto, el mismo tiene importantes centros de educación superior, cuenta con un aeropuerto que facilita la comunicación con todo el país y el exterior. La energía eléctrica de donde se abastece la región es de la red nacional.

Para el estudio del macizo de Holguín, fueron analizadas varias excavaciones o túneles, los cuales se laboreaban por diferentes tipos de rocas, las que pertenecen al grupo de las serpentinas. Estos túneles tienen una longitud muy variada, así como su profundidad, la cual depende del lugar de ubicación de los mismos y oscila entre 200 y 300m, la forma de la sección transversal es de paredes rectas con techo abovedado, el ancho de estas excavaciones es de 2 a 2,5 m y la altura es de 2,30 a 2,50m, ver figuras 7 y 8 del anexo I.

Para el arranque de las rocas durante el laboreo de estos túneles se emplearon los trabajos de perforación y voladura, algunos tramos de excavaciones se fortificaban con hormigón armado prefabricado o elementos metálicos.

La afluencia de agua es nula y en algunos casos se manifiesta en forma de goteo, solamente en las épocas de lluvias se manifestaba con mayor abundancia.

Túnel hidrotécnico de Las Tunas.

El túnel estudiado en la provincia de Las Tunas se localiza en el municipio cabecera de esta provincia. El mismo fue construido en el macizo ofiolítico de la región Oriental del país.

En esta región el clima es tropical con un régimen de lluvia definido regularmente entre los meses de Mayo – Junio, las temperaturas promedios están en el rango de los 25 – 27°C.

El relieve de esta región es llano aunque pueden aparecer algunas elevaciones de pequeña altura con pendientes muy suaves; la vegetación de esta región es muy variada, la misma está representada fundamentalmente por pequeños arbustos y matorrales.

Por ser este el municipio cabecera cuenta con un marcado desarrollo económico en varias esferas, dentro de las que se destacan la Metalurgia, la Agricultura y la Industria Cerámica entre otras, las que constituyen las principales fuentes de empleo de este territorio, el nivel cultural del territorio es adecuado, en el municipio hay varios centros de educación superior que permiten alcanzar un mayor desarrollo en cuanto a la cultura en general. Cerca de la zona donde se encuentra la obra estudiada pasa la carretera central que permite la comunicación de la región con el resto del país.

Este túnel hidrotécnico, el cual está destinado al mejoramiento de las condiciones hidráulicas de esta provincia, fue dividido para su construcción en dos tramos o sectores, de forma tal, que se pudiese garantizar 4 frentes de trabajo, el mismo tiene una forma de la sección transversal de paredes rectas con techo abovedado, una longitud aproximada de 500m, la profundidad a la que se encuentra esta excavación es de 30 a 50 m, esta tiene un ancho de 2,20 a 2,40m y una altura de 2,30 a 2,50m, ver figura 9 del anexo I.

Para el arranque de las rocas, en cada uno de los frentes de trabajo, fue empleado el mismo pasaporte de perforación y voladura en el cual se establecía la realización de 12 barrenos con una longitud de 1.5m aproximadamente y se obtenía un contorno bastante regular.

Durante el proceso de construcción de estas excavaciones las mismas no se estaban fortificando. Para la creación de estos 4 frentes de trabajo se realizaron 2 pozos verticales a través de los cuales subía y bajaba el personal, los materiales, y era eliminada el agua de las excavaciones.

Túneles populares de Guantánamo.

Los túneles estudiados de la provincia de Guantánamo, se encuentran ubicados en el macizo de rocas sedimentarias de esta provincia.

En esta región el clima es tropical, con un régimen de lluvia definido regularmente entre los meses de Mayo – Junio, las temperaturas durante la época de invierno es de 19 – 27°C y en verano de 27 – 32°C.

El relieve de esta región es montañoso, con un predominio de elevaciones con una altura de 100 – 150m, las mismas tienen pendientes con ángulos entre 10- 70°C, aquí existen zonas elevadas y menos elevadas que forman un grupo de montañas con cima en forma de mesetas, picos y laderas abruptas.

La vegetación en esta región es muy variada, representada fundamentalmente por una gran variedad de árboles maderables y en algunos casos por pequeños arbustos y matorrales.

La región, donde se ubican estas obras presenta un marcado desarrollo económico en cuanto a la agricultura y otras esferas, las cuales constituyen las principales fuentes de empleo de este territorio.

Para el estudio de este macizo fueron analizados varios túneles, los cuales en su gran mayoría se estaban construyendo con el empleo de métodos manuales (Pico y Pala). La longitud de estas excavaciones es muy variada y la misma depende de las características del macizo rocoso. Gran parte de estos túneles no se estaban fortificando y solamente en algunos tramos con peligro de derrumbe se fortificaba con elementos prefabricados.

La forma de la sección transversal de estas excavaciones es de paredes rectas con techo abovedado, con un ancho de 2,3 a 2,4m y una altura de 2,3 a 2,5m, las mismas se

encuentran a una profundidad de 150 a 300m, la afluencia de agua en estas excavaciones es muy poca y solamente en las épocas de lluvias se manifiesta con mayor abundancia, ver figura 10 del anexo I.

Túneles populares de Moa.

Los túneles estudiados se ubican en las cercanías de la ciudad de Moa, perteneciente al municipio de igual nombre en la provincia de Holguín.

En esta región el clima es tropical, con un régimen de lluvia definido regularmente entre los meses de Abril – Junio y Noviembre - Diciembre, las temperaturas promedio están en el rango de los 24 – 28°C.

El relieve donde se encuentran ubicadas estas excavaciones es típico de montañas, en el cual predominan las elevaciones entre 100 – 200m de altura, las mismas tienen pendientes con ángulos entre abruptos y suaves, predominando las que tienen un ángulo entre 20° – 40°, aquí existen zonas elevadas y menos elevadas que forman un grupo de montañas con cima en forma de picos y laderas abruptas.

Para el estudio del macizo rocoso donde se ubican los túneles de la ciudad de Moa, fueron analizadas varias excavaciones, las que se laborean por rocas perteneciente al grupo de las serpentinias. Estos túneles tienen una longitud muy variada, en tanto que su profundidad de ubicación depende del lugar donde se encuentra la obra y oscila entre 100 y 150m.

La forma de la sección transversal de estas excavaciones es de paredes rectas con techo abovedado con un ancho de 2,3 a 2,4m y una altura de 2,4 a 2,5m. Para el arranque de las rocas se emplean los trabajos de perforación y voladura. En algunos casos estas excavaciones se fortificaban con elementos de hormigón armado prefabricado o elementos metálicos, ver figuras 11 del anexo I.

La afluencia de agua en la mayoría de los casos es nula y solamente en algunos sectores, debido a las características del agrietamiento, se manifiesta en forma de goteo constante.

Mina Amores.

La mina Amores está ubicada en el municipio Baracoa, a 50 km de la planta de beneficio de los minerales de cromo, la cual se encuentra cerca del poblado de punta Gorda en el municipio de Moa.

El área de estudio comprende una extensión de aproximadamente 0.25 km², localizada en la hoja topográfica 5277-11 "Cayo Güín". (colectivo, 1997).

En la zona de los trabajos, el sistema de comunicación está compuesto por la carretera que pasa al Norte del yacimiento y que une a los municipios de Moa y Baracoa, y el terraplén que se desprende de la misma, desde el poblado de Báez hasta la mina, el cual se encuentra en condiciones regulares, este camino está construido en el curso superior del río Báez, en el margen derecho del mismo.

El clima de la región es subtropical húmedo, en esta región es característica la división corriente existente en toda Cuba de épocas de secas y de lluvias; la época lluviosa tiene dos periodos fundamentales; de intensas lluvias en los meses de Abril – Mayo y Septiembre – Octubre, en estos periodos las precipitaciones alcanzan valores de 800 - 1000 mm; las temperaturas oscilan entre 20 y 27⁰C, con una diferencia respecto al invierno de 8⁰C aproximadamente, la temperatura media anual es de 26⁰C. El relieve donde se encuentra ubicado este macizo rocoso es típico de montañas, en el que predominan las elevaciones entre 100 – 500 m de altura, las mismas tienen pendientes con ángulos entre 10- 70⁰.

La vegetación de la región es tropical y está constituida fundamentalmente por árboles maderables, entre los que tenemos: Pino, Majagua, Ocuje y otros cultivos.

La región donde se encuentra el Yacimiento presenta un gran atraso económico, partiendo de que su base fundamental es la agricultura no mecanizada y la pesca en pequeñas embarcaciones, lo que impide la modernización del proceso, hay un predominio de los cultivos de café, cacao, coco y en menor escala están los cultivos de frutas menores .

La zona más cercana a la región de los trabajos con un determinado desarrollo minero es el municipio de Moa, donde se explotan los Yacimientos Ferroniquelíferos.

La única fuente de abastecimiento de agua existente en la región donde se encuentra el yacimiento es el río Báez, el cual es aprovechado para el consumo humano y otros fines; en cuanto a la energía eléctrica la misma se obtiene, mediante el represado de una parte del río para lograr el funcionamiento de una mini hidroeléctrica, la cual es la encargada de la generación de la energía eléctrica que se emplea en todos los procesos que se desarrollan en dicho complejo minero.

Para llevar a cabo el proceso de extracción del mineral en esta mina, existe un socavón, el que constituye la única excavación que reúne las condiciones necesarias para los análisis realizados, lo que está dado por sus condiciones de estabilidad. Para el laboreo de las excavaciones que integran esta mina fue empleado el método de perforación y voladura utilizando para ello perforadoras manuales, esta excavación tiene una forma de la sección transversal de paredes rectas con techo abovedado, con un ancho entre 2,2 y 2,5m y una altura entre 2,3 y 2,8m, la misma se encuentra a una profundidad de 200 a 350m aproximadamente, ver figura 12 del anexo I.

En esta mina, algunos tramos de las excavaciones que la integran están fortificados con el empleo de madera y solamente en el caso de la boca del socavón fueron empleados elementos metálicos de forma arqueada y elementos prefabricados. La afluencia de agua es considerable en casi todas las excavaciones existentes, lo que afecta notablemente la estabilidad de estas.

En estos momentos esta mina está cerrada, para su reapertura se realizó un nuevo proyecto de explotación, el cual fue aprobado recientemente.

Para ilustrar de forma general la ubicación geográfica de los macizos estudiados se muestra la figura 2.



Figura 2. Ubicación geográfica de las zonas de estudio.

II.2 Geología e hidrogeología de los macizos rocosos estudiados

Mina Las Merceditas.

El macizo, donde se ubica la mina Merceditas se encuentra ubicado dentro de los límites del gran macizo de ultrabásitas de Cuba Oriental. El mismo está formado por materiales serpentiniticos, los cuales son el producto resultante del proceso de metamorfismo de las rocas ultrabásicas.

Estas rocas ultrabásicas que están generalmente representadas por peridotitas serpentinizadas, raras veces por piroxenitas, gabros y olivinos normales, se encuentran

ampliamente distribuidas, formando una franja de aproximadamente 900 km de extensión a lo largo de toda la costa Norte de la isla.

Como se dijo anteriormente, la formación de estos materiales fue el producto del autometamorfismo de las rocas ultrabásicas. Este proceso es de gran importancia en el comportamiento de las rocas y es de fácil identificación. Cuando ocurre la serpentización, minerales como el olivino y el piroxeno se transforman en minerales del grupo de la serpentina.

La red hidrográfica está representada por el río Jaragua, afluente del río Jiguaní y algunas cañadas, las que drenan el agua en épocas de lluvias, permaneciendo secas en la época de escasas precipitaciones. Desde el punto de vista hidrogeológico, las condiciones del yacimiento son sencillas, ya que las rocas que se encuentran en el mismo son acuíferas y todos los pozos resultaron secos.

El área donde se realizaron los trabajos se encuentra alejada totalmente de la influencia del río, ya que la cota del mismo es inferior a la cota de la base de explotación, sin embargo, en el interior de la mina se pudieron encontrar áreas de intenso agrietamiento por donde fluye abundante agua en época de lluvia, no siendo así en época de seca.

La presencia de agua en las zonas de trabajo se debe a manantiales presentes en las zonas fracturadas y las filtraciones a través de las grietas. Las aguas presentes en la mina son de baja mineralización, con un pH ligeramente básico entre 7,5 – 7,8, según la clasificación de Kunlov. (colectivo, 1996. Proenza, 1997. Iturralde, 1978, 1990) estas son aguas hidrocarbonatadas magnesianas e hidrocarbonatadas cloruradas.

Mina El cobre.

Geográficamente el campo metalífero El Cobre, está situado en la Sierra Maestra, el cual pertenece a una zona de tensiones tectónicas, que se encuentra entre la plataforma de las Bahamas al Norte y las grandes fosas del mar Caribe al Sur. Múltiples manifestaciones de cobre junto con el yacimiento El Cobre se relacionan con el producto de la actividad postmagmática de la instrucción de la Sierra Maestra.(Barrabí,1994).

Dentro de la composición de este macizo rocoso, encontramos las rocas vulcanógenas, así como las vulcanógenas – sedimentarias, atravesadas por numerosos cuerpos subvolcánicos, inclusiones de dioritas y diques de diabasas.

Los trabajos de investigación mas recientes, argumentan la vinculación de la Sierra Maestra al arco volcánico paleógeno, dentro del cual podemos ubicar el campo menífero El Cobre, con una gran estructura vulcanotectónica. Las rocas que caracterizan la región pertenecen a la secuencia Ermitaño que se compone de tobas aglomeradas, tobas brechosas, ignimbritas y tobas de cuerpos frecuentes de las lavas y brechas de lavas de composición andesítica.

El yacimiento El Cobre es de tipo hidrotermal en las zonas mineralizadas de trituración. Los procesos de mineralización se manifestaron en el período final de desarrollo del geosinclinal Cubano, en la etapa concluyente de la formación del complejo de rocas Vulcanoplutónicas del Paleoceno – Eoceno.(Barrabí, 1994. colectivo, 1996).

La red fluvial está representada por los Ríos El Cobre, Melgarejo y otros afluentes pequeños los cuales disminuyen considerablemente su caudal en época de sequía. El río El Cobre está ubicado cerca del límite septentrional del yacimiento y según las dimensiones lineales del embalse (ancho medio 50m, longitud 400m y profundidad de 2m), el agua acumulada por él, es aproximadamente de 4000m³; además de las aguas superficiales, en la anegación del yacimiento participan las aguas de los horizontes acuíferos de los depósitos aluviales, las aguas de la corteza de interperismo de las rocas efusivas – sedimentarias, y las aguas del horizonte de la zona tectónica.

Las aguas de los depósitos aluviales son hidrocarbonatadas – cálcicas con mineralización de 1,5 – 1,7 g/l y el pH de 6 – 7 y las aguas de la presa del río El Cobre son sulfatadas, hidrocarbonatadas – cálcicas con mineralización de 1,25 y pH de 7,8.

En el yacimiento, las aguas del horizonte acuífero antes mencionado se encuentran relacionadas, entre sí formando un complejo acuífero. En los lugares con tectonismo intrusivo las rocas tienen una alta capacidad acuífera, la cual está dada por sus propiedades de filtración.

Túneles del trasvase de Mayarí.

La región de estudio, está constituida por dos grandes complejos bien definidos: El complejo clástico – carbonatado y el complejo ultramáfico – serpentizado.

El primer complejo está constituido por calizas, margas, conglomerados y otros, este complejo se extiende hacia el Norte y el Oeste del área en las partes más elevadas y en contacto con el complejo ultramáfico, ocupa la parte superior, este contacto es tectónico.

El complejo de rocas ultramáficas serpentinizadas está representado por las serpentinitas brechosas y los gabroides. Este ocupa toda la porción sur de la región contactando tectónicamente con la secuencia terrígeno – carbonatada a través de la sutura marginal que divide los bloques del arco de esta y el de la plataforma marina.(colectivo, 1991, 1992; Pérez, 1991).

A causa del proceso de meteorización se han afectado todos los tipos litológicos presentes en el área en una mayor o menor intensidad, siendo este proceso de afectación mas intenso en las capas superficiales, disminuyendo gradualmente con la profundidad. Apareciendo a una profundidad de 30 – 40 m las rocas menos afectadas.(Hidalgo, 1991; Morales, 1990).

Las condiciones hidrogeológicas de esta región, permiten garantizar buenas condiciones de trabajo de las obras del trasvase que allí se construye, el macizo se encuentra vinculado a un relieve de montaña. lo que hace posible que las aguas producto de las precipitaciones se evacúen rápidamente.

La red hidrográfica de esta región está representada fundamentalmente por el río Mayarí, el cual tiene un caudal permanente durante todo el año, a este también llegan algunos arroyos y afluentes los que tienen agua fundamentalmente en los meses de lluvia. Otra de las fuentes de suministro de agua es la presa Melones, la cual tiene una gran capacidad de almacenamiento de agua. (Lovaina, 2000).

Túneles populares de Holguín.

La región de estudio de Holguín se encuentra ubicada en la zona estructuro – Facial Auras, constituida por sedimentos vulcanógenos – sedimentarios y rocas que pertenecen al complejo ofiolítico. Por lo general estas rocas constituyen un melange de forma alargada, cóncava hacia el norte con buzamiento hacia el Sur; su borde septentrional es la falla de Holguín.

Estas rocas pertenecientes al complejo ofiolítico ocupan la mayor parte del área (más del 85%) predominando dentro de ellas las ultramafitas serpentinizadas las cuales aparecen en forma de escamas, y los gabroides que ocupan la mayor extensión. en este macizo rocoso

existen diferentes procesos y fenómenos físico – geológicos los cuales se han desarrollado considerablemente provocando alteraciones de las rocas existentes que son: calizas compactas, areniscas y margas, tobas ácidas, conglomerados cementados, serpentinitas, serpentinitas esquistosas, gabro microgabros.(Rosales, 1996).

Las características hidrogeológicas de la región de estudio de Holguín, están muy relacionadas con las precipitaciones atmosféricas. Esta región se encuentra enmarcada en un relieve llano, la red hidrográfica de la región está bastante desarrollada, formada por varios ríos como son: río Yareyal, Matamoros, Marañón, y Mayabe, los cuales corren con una dirección aproximada de Norte – Sur, en esta zona aparece una gran cantidad de cañadas las cuales dependen del caudal de los ríos. En algunos lugares se observa que los ríos se unen formando entre si ángulos rectos, lo cual evidencia la presencia de alineaciones tectónicas.

Túnel hidrotécnico de Las Tunas.

El macizo rocoso de la provincia Las Tunas, donde se realizaron los trabajos está constituido por andesita y peridotita y se encuentra ubicado en una zona donde se manifiestan tensiones tectónicas. En este macizo, debido a sus características geológicas, existe un proceso de formación de grietas, las que se comienzan a registrar a poca profundidad.

Durante la construcción de este túnel, la afluencia de agua en algunos tramos era constante, lo que hacía necesario la realización de un bombeo permanente de la misma. En esta zona no se manifiesta la influencia de ningún río afluente, por lo que se confirma que el agua que llega a los frentes, a través de las grietas, se debe a que la cota de la zona es muy baja y gran parte del agua que cae durante la época de lluvia se acumula en ella. Otra de las causas de la aparición de agua es, que en esta zona se comunican algunas zanjas y tuberías del sistema de alcantarillado de la ciudad, lo que provoca que esto sea un terreno húmedo.(Noa, 1996).

Túneles populares de Guantánamo.

Estos túneles se encuentran ubicados en rocas sedimentarias, además, el macizo está conformado por otros tipos de rocas, arena, ceniza volcánica y determinadas sustancias

carbonosas, las cuales son el resultado de los procesos bioquímicos que ocurren por la meteorización del macizo.

En los macizos rocosos de este tipo, se han reportado los siguientes tipos de rocas sedimentarias:

- Caliza tobácea: esta roca se encuentra moderadamente recrystalizada, la misma está compuesta por calcita, minerales arcillosos y vidrio volcánico.
- Marga: a ésta la podemos clasificar como una roca arcillosa – carbonatada, la cual está constituida por calcita, minerales arcillosos e inclusiones de pequeños fragmentos de rocas.
- Tufita: se encuentra algo cristalizada, constituida por vidrio volcánico y calcita.
- Areniscas de granos finos: están intercaladas con calco – arenitas y margas, la misma está constituida por material terrígeno (plagioclasas, anfíboles, piroxeno) y calcita muy poco consistente.
- Ópalo: se considera como una variedad del sílice – amorfa.

Algunas de estas rocas depositadas en el macizo en forma de estratos, son productos de la deposición en cuencas sedimentarias marinas, que se ubican a distintas profundidades, donde además existe una fuente de suministro, que aporta el material volcánico.

En la zona, donde se encuentran los túneles estudiados el macizo es montañoso; lo que ocasiona que durante la época de lluvia se formen algunos arroyos o cañadas que solo permanecen con un caudal durante ese periodo.

Debido a las características higroscópicas de las rocas, gran cantidad de agua es almacenada en ellas, esto hace que la atmósfera que se desarrolla es muy húmeda y que en algunos tramos de excavación se manifiesten algunos puntos de goteo de agua. (Noa, 1996).

Túneles populares de Moa.

Los túneles que fueron objetos de estudio se conocen por el nombre de las empresas que los ejecutan: túnel de la “Empresa Mecánica del Níquel (bocas 1 y 2), túnel de la “Empresa Mantenimiento Constructivo”, túnel de la “Empresa de Comercio”, túnel de la “Empresa Pedro Sotto Alba” (bocas 1 y 2), túnel de la “Empresa Portuaria” (bocas 1 y 2) y túnel de la Empresa “Las Camariocas” (bocas 1 y 2).

El área se caracteriza, fundamentalmente por la intensidad con que actúan los procesos de meteorización, destacándose en gran medida el intemperismo de tipo químico y como resultado del mismo la formación de una típica corteza laterítica dando lugar al yacimiento de tipo residual de Ni, Fe, y Co.

Estos túneles se encuentran ubicados en una zona montañosa; lo que ocasiona que durante la época de lluvia se formen algunos arroyos o cañadas que solo permanecen con su caudal durante ese periodo. Debido a las características de este macizo, esta agua, producto de las precipitaciones, se evacúan rápidamente y solo una pequeña porción, se infiltra hacia el interior del macizo a través de las grietas, lo que provoca que en algunos sectores de las excavaciones se produzca un goteo constante o se humedezcan las paredes de estas.

Mina Amores.

En la región donde se ubica el yacimiento Amores, aparecen bien definidos varios complejos aunque muy complicados por la tectónica y sin conductividad espacial.

Dentro de los complejos que aparecen en esta región tenemos: el Hazburgita Metamorfizado, de menor desarrollo y perteneciente a la parte inferior de dicha asociación, el complejo perteneciente a los cúmulos ultramáficos, ampliamente desarrollado y que corresponde al horizonte productivo del corte ofiolítico de esta zona, otro complejo está representado por el cumulativo Máfico o Gabroide y por último se observa el complejo superior Diabásico Basáltico, que aflora a 2 km del yacimiento.(Larosi, 1997).

Una de las características geológicas que marca la cercanía de la transición entre los complejos mencionados anteriormente es la aparición de numerosos diques de 5 a 20cm de espesor, generalmente concordantes con las capas de ultramafitas. La composición de los diques corresponde a gabros, troctolitas y anortositas, ellas pueden ser estudiadas en el río Báez y en la región Norte del yacimiento.

La zona del macizo rocoso donde se encuentra la mina Amores está atravesada por el río Báez y sus afluentes, esto provoca que esta sea una zona donde abundan las aguas subterráneas principalmente a nivel del río.

Las rocas con mayores capacidades para almacenar agua están representadas por las peridotitas, que por presentar un alto grado de agrietamiento sirven como colectoras de las aguas provenientes de las precipitaciones atmosféricas.

En las partes bajas de las pendientes y en pequeños valles se pueden apreciar arroyos que corren fundamentalmente en épocas de lluvia, esta agua presenta una mineralización muy baja de 0.1 g/L, por lo general son transparentes, insípidas e incoloras y su principal fuente son las precipitaciones atmosféricas.

En el yacimiento se detectó la presencia de un horizonte acuífero, donde los niveles del agua varían en dependencia de las precipitaciones, las rocas que conforman este horizonte son peridotitas serpentinizadas, dunitas y cromitas.

Por su composición química las aguas que drenan este yacimiento son carbonatadas – magnesianas – cálcicas, pueden variar hasta magnesianas sódicas. En estas aguas se determinó que el pH es superior a 8.

II.3 Análisis de la tectónica de los macizos estudiados

Mina Las Merceditas.

La tectónica de la región donde se ubica esta mina es compleja y en ella como en otras zonas del país se ponen de manifiesto varios fenómenos tectónicos, originados en diferentes períodos, lo que provocó que el sistema de mantos tectónicos y el intenso plegamiento, que caracteriza la estructura geológica de las secuencias más antiguas que surgieron en un ambiente de compresión máxima, desarrollarán fallas que dividieron la zona en una serie de bloques horsticos y grabens, enmarcando así las estructuras más antiguas.

Las dislocaciones de plegamiento, que presenta la región son muy complejas y en las secuencias más antiguas se hace imposible el desciframiento de las mesoestructuras plegadas, dada la monotonía litológica que presenta; no obstante los estudios realizados permiten afirmar que en las secuencias antiguas (rocas metamórficas y volcánicas) existen tres direcciones principales de plegamiento:

- Oeste – Sureste.
- Noroeste – Sureste.
- Sureste – Noreste.

El yacimiento Las Merceditas se encuentra en una zona de gran actividad tectónica postmineral y las dislocaciones están representadas por zonas de fragmentación y agrietamiento abierto, tanto en las rocas encajantes, como en el cuerpo mineral.

Mina El Cobre.

El yacimiento está relacionado con la falla regional El Cobre, la cual se extiende en dirección latitudinal y se limita al sur y norte por dos fajas de fracturación de rocas. El yacimiento también está atravesado por fallas de segundo orden y dirección submeridional, que desarrollan complementariamente la estructura de una serie de bloques. El propio macizo encajante tiene una serie de fallas pequeñas, producto de las cuales, en él se forma una red de grietas y pliegues con direcciones caóticas.

La tectónica juega un papel importante en el campo menífero, en la fase inicial como controlador de la mineralización y en la fase posterior como elemento disyuntivo de esta, indicada en la fase de diques de intrusiones subvolcánicas.

El yacimiento está ubicado en un núcleo o intersección de fallas de diferentes direcciones y edades respecto al evento mineralizante. La falla El Cobre, que se extiende al este de la zona de Gitanilla, con división latitudinal atravesando todo el yacimiento. Otro sistema importante, son las fallas secundarias que se pueden identificar como fallas preminerales, con direcciones bien definidas (de 55 - 65 grados) al norte del yacimiento. El tercer sistema, son las fallas transversales al nordeste que presenta buzamiento abrupto de 60 a 70 grados, que afectan y deforman las estructuras minerales. Estos sistemas están muy desarrollados en todo el yacimiento, lo mismo en Gitanilla que hacia la zona de la cantera.

Túneles del trasvase de Mayarí.

Estas obras se encuentran asociadas a una zona con una gran actividad tectónica, donde predominan las fracturas con dirección Norte - Sur, en este macizo aparecen representados varios sistemas de fallas, las cuales abarcan un área de varios cientos de metros.

La tectónica de la región es compleja y muy variada respondiendo en primer lugar a la gran variedad de litología del macizo, y a los diferentes procesos de movimiento ocurridos en la corteza terrestre. En esta zona se pone de manifiesto la superposición de fenómenos tectónicos originados en condiciones geodinámicas contrastantes y en diferentes períodos, lo que provoca un intenso plegamiento, el cual permite caracterizar la estructura geológica.

En esta región tuvieron lugar diferentes manifestaciones tectónicas, las cuales están fundamentadas en la acción de los diferentes esfuerzos de tracción de la corteza terrestre, desarrollándose en ella los diferentes sistemas de fallas, que dividieron la zona en bloques de diferentes dimensiones y variadas formas.

Túneles populares de Holguín.

Esta zona es sumamente compleja desde el punto de vista tectónico. Al fallamiento complejo, producido por el emplazamiento de los mantos serpentiniticos, se superpuso un fallamiento reticular NS, no menos complejo y que complica un poco más el cuadro tectónico.

Vestigios del fallamiento por el emplazamiento del complejo ofiolítico de los Arcos de Islas Cretácico y Paleógeno se observan en los límites tectónicos de las diferentes litologías en la fracturación rellena de silicitas, así como el filtrado direccional realizado a las isobasitas de orden 2 y 3. Por su parte el procesamiento de imágenes realizado a las fotos cósmicas, a la interpretación de fotos aéreas y a los morfométricos del relieve han dado como resultado un cuadro tectónico, donde predominan las fracturas NS, siendo observada la facturación primaria muy tenuemente, con excepción de la EO que queda mejor marcada.

La región de estudio pertenece al megabloque Camagüey –Maniabón, cuyo límite sur – sureste es la falla Holguín, que pasa muy próxima a la cortina de la presa Güirabo y paralela a esta. El límite norte – noroeste de este megabloque es la sutura Gibara – Recreo – Velasco – Chaparra, que pone en contacto el manto tectónico de la llamada zona Auras con la zona Remedios.

Las principales estructuras que limitan a los diferentes bloques dentro del área de estudio son: falla Fraile, falla Marañón, falla Loma de la Cruz, falla la Gloria – Cienfuegos y la falla Mayabe.

Túnel hidrotécnico de Las Tunas.

La tectónica en esta zona es sumamente compleja. Al sistema de fallas producido por el emplazamiento de los diferentes mantos de rocas, se superpuso otro fallamiento, no menos complejo lo que hace un poco difícil las características tectónicas de la región.

Esta región de estudio al igual que otras zonas de la región oriental de Cuba, pertenece al megabloque Camagüey – Maniabón. El límite norte – noroeste de este megabloque es la sutura Gibara – Recreo – Velasco – Chaparra, que pone en contacto el manto tectónico de la llamada Zona Auras con la Zona Remedios. (Noa, 1996).

Túneles populares de Guantánamo.

La estructura de este macizo montañoso se presenta en forma de bloques dislocados por diferentes sistemas de fallas internas, con direcciones predominantes de Sur – Oeste y Nor – Este. Este macizo también está atravesado por fallas de segundo orden y un conjunto de pequeñas grietas, producto de las cuales en él se forma una red de pequeños bloques cuyos pliegues presentan direcciones caóticas. (Noa, 1996).

Túneles populares de Moa.

En la zona de estudio existen fallas que complican la tectónica del área, las que se pueden catalogar de complejas, manifestándose la superposición de fenómenos tectónicos originados en condiciones geológicas contrastantes, muestra de ello es el intenso plegamiento y la existencia de mantos tectónicos, que caracteriza la estructura geológica de la región. (Campo, 1989).

Las dislocaciones de plegamientos que presenta la zona son sumamente complejas, siendo muy difícil, en las secuencias más antiguas el desciframiento de las mesoestructuras plegadas, dada la monotonía litológica que presentan; no obstante, los estudios realizados permiten afirmar que en las secuencias más antiguas (vulcanógenas y metamórficas) existen tres direcciones del plegamiento fundamentales: noreste-sudeste, noroeste-sudoeste y norte-sur: También la tectónica disyuntiva es sumamente compleja. (Riverón, 1996).

Según los trabajos realizados por Rodríguez Infante, 1999, fueron cartografiados cuatro sistemas de estructuras disyuntivas que corresponden a cada uno de los períodos de la evolución geotectónica.

El sistema más antiguo para la región tiene su origen asociado al cese de la subducción e inicio del proceso de compresión de sur a norte del arco volcánico cretácico y que culminó con la presumible colisión entre el arco insular y la margen pasiva de la plataforma de las Bahamas, el segundo sistema, está constituido por fallas de dos direcciones: Noreste y Norte – Noreste que se desplazan mutuamente y se cortan a los sesenta y ochenta grados,

el tercer sistema de estructuras está constituido por dos familias de deslizamiento por el rumbo – *Strike-Slip* – determinadas en recientes investigaciones y que no habían sido reportadas con anterioridad, las cuales se denominaron Cananova y El Medio y el cuarto sistema de fracturas que aparece desarrollado en el territorio corresponde a estructuras sublongitudinales que aparecen en toda el área, pero tienen su máxima expresión en las zonas periféricas de los sectores de máximo levantamiento.

Mina Amores.

La zona donde se realizan los trabajos mineros, presenta poco grado de actividad tectónica, el cual se manifiesta en las características del agrietamiento y en el grado de fragmentación de las rocas y de los cuerpos minerales.

El máximo exponente de la tectónica posmineral lo constituyen las diferentes fallas, las cuales se manifiestan a lo largo del contacto ultramáfico con gabros. Con estas fallas está relacionada la formación de una amplia zona de fracturas la cual llega a tener cientos de metros, siendo esta una dislocación tectónica posmineral de grandes dimensiones.

Dentro de los límites del yacimiento se observan dislocaciones tectónicas que provocan desplazamiento de las menas y rocas encajantes, lo que provoca la división del yacimiento en bloques.

II.4 Propiedades físico – mecánicas de las rocas

Por la importancia que tiene el conocimiento de las propiedades físico – mecánicas de las rocas, en este trabajo se hace el procesamiento de la información existente y se realiza la determinación de algunas propiedades insuficientemente o no evaluadas, que influyen en el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo.

Los resultados de las propiedades que se utilizan en este trabajo fueron tomadas de informes de [Colectivo,1996], Tesis Doctorales [Cartaya, 2001] o de otros trabajos [Riverón, 1996; Rosales 1996; Acosta, 1996; Mondéjar, 2001; Falero, 1996; Cuesta 1997; Ugalde, 2000; Noa, 1996.] los cuales a su vez se auxiliaron en los informes de los laboratorios de Santiago de Cuba, del CIPIM en La Habana y del ISMMANJ. En todos los casos en estos informes, se señala que la confiabilidad de los resultados esta por encima del 85%.

Diferentes propiedades fueron determinadas por el propio autor, con el objetivo de ampliar o mejorar la información existente, sobre algunas de las propiedades ya determinadas y para obtener información, de otras que no habían sido determinadas y que se consideran importante en la investigación.

En aquellos casos donde las propiedades fueron determinadas por el autor se realizó el muestreo siguiendo un criterio aleatorio y cuidando que las muestras fuesen representativas. Para la determinación de la cantidad de muestras a ensayar, en cada caso, se utilizaron métodos estadísticos de planificación de experimentos.

Para la determinación de estas propiedades se realizaron ensayos de laboratorio con la utilización de muestras de cada sector estudiado y también se realizaron ensayos en condiciones naturales.

Las propiedades másicas que se determinaron fueron:

- ✓ Masa volumétrica: Para su determinación se utilizó el método de la pesada hidrostática; matemáticamente se expresa según la siguiente ecuación:

$$\gamma_v = \frac{G}{V}; \text{ Kg/cm}^3$$

Donde: G - Masa de la muestra.

V - Volumen de la muestra ensayada.

- ✓ Densidad: Para su determinación se utilizó el método picnométrico; matemáticamente se expresa:

$$\rho = \frac{G}{V_s}; \text{ Kg/cm}^3$$

Donde: Vs - Volumen que ocupan las partes sólidas de las muestras.

- ✓ Porosidad: Cuantitativamente, la porosidad puede determinarse a partir de la densidad y la masa volumétrica por la expresión siguiente.

$$P = (\rho - \gamma_v) / \rho * 100; \quad \%$$

- ✓ Humedad: Se puede determinar a través de la siguiente expresión:

Tabla 1. Resultados de los parámetros que caracterizan el agrietamiento de los macizos rocosos estudiados.

Obras Estudiadas.		Parámetros o índices.				
		Espacios entre grietas (m)	Sistemas de grietas	Rugosidad de las grietas	Alteración de las grietas	Humedad de las grietas
Mina Las Mercedes	Socavón - 1	0,1 - 0,5	3	Rugosas	Ligera alteración	Nula
	Galería - 4	0,16 - 0,5	3	Rugosas	Ligera alteración	Nula
	Galería - 6	0,25 - 0,3	3	Rugosas	Ligera alteración	Nula
	Galería - 13	0,12 - 0,25	3	Rugosas	Alteradas	Medias
	Galería - 15	0,1 - 0,35	3	Rugosas	Alteradas	Baja
Mina El Cobre	Galería principal	0,3 - 0,5	2	Rugosas	Moderada	Nula
	Galería de subnivel	0,2 - 0,4	3	Rugosas	Moderada	Nula
	Galería de ventilación	0,22 - 0,27	3	Rugosas	Moderada	Medias
Túneles del trasvase de Mayuri.	Túnel Seboruquito - Esperanza	0,2 - 0,24	3	Lisas	Ligera alteración	Nula
	Túnel Enmedio - Quirabo	0,15 - 0,3	3	Rugosas	Ligera alteración	Baja
	Túnel Quirabo - Pontezuelo	0,1 - 0,25	3	Lisas	Ligera alteración	Baja
	Túnel Guaro - Manacal	0,2 - 0,3	3	Rugosas	Ligera alteración	Nulo - Baja
Túneles populares de Holguín.	Túnel de ciencias médicas	0,15 - 0,2	2	Lisas	Ligera alteración	Nula
	Túnel de Caguayo	0,12 - 0,2	3	Rugosas	Ligera alteración	Baja
	Túnel de Pandición	0,1 - 0,5	3	Lisas	Ligera alteración	Bajas
Túnel hidroeléctrico de Las Tunas.	Tramo - 1	0,1 - 0,2	3	Rugosas	Ligera alteración	Medias
	Tramo - 2	0,15 - 0,3	3	Rugosas	Ligera alteración	Medias
Túneles populares de Guantánamo.	Túnel - 1	0,1 - 0,3	2	Lisas	Alteradas	Nula
	Túnel - 2	0,15 - 0,5	1	Lisas	Alteradas	Nula
	Túnel - 3	0,2 - 0,3	2	Lisas	Alteradas	Nula
Túneles populares de Moa.	Túnel del CAME	0,15 - 0,5	3	Lisas	Ligera alteración	Baja
	Túnel de Mantenimiento Constructivo	0,1 - 0,35	4	Rugosas	Ligera alteración	Baja
	Túnel Emp. Cde. E. Che Guevara	0,1 - 0,5	3	Rugosas	Ligera alteración	Baja
	Túnel Emp. Mecánica del Níquel.	0,15 - 0,25	4	Rugosas	Ligera alteración	Nula
Mina Ameca.	Tramo - 1	0,22 - 0,25	4	Rugosas	Ligera alteración	Nula
	Tramo - 2	0,25 - 0,3	4	Rugosas - Lisas	Ligera alteración	Baja
	Tramo - 3	0,2 - 0,3	3 - 4	Lisas	Ligera alteración	Baja

$$W = \frac{P_1 - P_2}{P_2} * 100\%$$

Donde: P_1 - Peso de la muestra antes de secarse, (g).

P_2 - Peso de la muestra después de secarse, (g).

Las propiedades de resistencia de las rocas que se determinaron son:

- ✓ Resistencia a la compresión: Para este ensayo se emplearon varios métodos:

El método estándar de laboratorio con el empleo de testigos de 36 mm de diámetro y 40 a 50 mm de altura. La resistencia a la compresión lineal se obtiene por la expresión

$$R_c = P_{\text{máx}} / F; \text{ Mpa}$$

Donde: $P_{\text{máx}}$ – Carga máxima de rotura en el momento de su destrucción.

F – Área transversal inicial de la muestra.

El método con el empleo de muestras irregulares, el cual en algunos casos se realizó "in situ" con el empleo de una prensa manual y en otras ocasiones en el laboratorio. Para este ensayo según los análisis estadísticos se realizaron de 18 a 25 determinaciones paralelas para lograr una confiabilidad del 85%.

El índice de resistencia se obtiene con el empleo de la siguiente expresión:

$$R_c = P_{\text{máx}}(\gamma_v / G)^{2/3}; \text{ Mpa}$$

- ✓ Resistencia a la tracción: Este índice se determinó con el empleo del método Brasiliano. Matemáticamente se puede expresar:

$$R_t = 2P / \pi d L; \text{ Mpa.}$$

Donde: P – Esfuerzo de destrucción.

d - Diámetro de la muestra.

L – Longitud de la muestra.

- ✓ Dureza: Este índice fue determinado, en condiciones "in situ", con el empleo del esclerómetro.

- ✓ Abrasividad: Este índice fue determinado a partir de la valoración del coeficiente de desgaste de una varilla de acero sometida a fricción sobre las rocas.
- ✓ Fortaleza: Esta propiedad de las rocas fue determinada con el empleo de la torre de ensayo, matemáticamente se puede expresar de la siguiente forma:

$$F = 20 N / L$$

Donde: N – Número de golpes que se le aplican a la muestra.

L - Longitud de la columna de polvo en el volúmetro.

Los resultados obtenidos se muestran en el anexo II, en las tablas de la 1 a 16 donde se muestra el resultado obtenido, para las diferentes propiedades de las rocas en cada obra estudiada y la variación posible de los resultados, obtenidos del diseño de la investigación.

El análisis estadístico realizado, teniendo en cuenta el número de muestras tomadas y considerando un error máximo permisible del 10% (igual al reportado en los informes analizados), muestra que en todos los casos la confiabilidad de los resultados obtenidos esta por encima del 85%.

Los principales parámetros usados para determinar la confiabilidad fueron:

Desviación muestral.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Donde: X_i - Valor de la muestra i.

$\bar{X}$ - Valor medio de las muestras.

n - número de muestras.

$$V = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad \%$$

La confiabilidad se determina a través de:

$$\text{Confiabilidad} = (1 - \alpha) * 100\%$$

$$(1 - \alpha) = 1 - 2P(t \geq \alpha / 2)$$

Donde: $\alpha/2$ - estadígrafo de Studen y se obtiene de tabla (Blaisdell E, 1992; Freud J.y Simony G., 1992).

II.5 Evaluación del agrietamiento de los macizos estudiados

El macizo rocoso es un medio físico de alta complejidad, condicionado esto por su estado mecánico-estructural (presencia de superficies de debilitamiento estructural, heterogeneidad, campo tensional existente y otros).

El macizo rocoso en muchos casos, se encuentra afectado por planos de fractura o grietas los que se producen debido a una serie de procesos, a causa de los cuales el macizo se puede romper en bloques, que pueden adoptar diferentes formas como: cúbica, esférica, columnar, etc; quedando, estos, delimitados por los planos de las discontinuidades.

Valoración del agrietamiento.

En el estudio ingeniero – geológico del macizo rocoso es importante la valoración detallada de su agrietamiento, esto se debe a que a partir de él se puede determinar, su comportamiento mecánico - estructural, su estabilidad y la deformación de la roca en su interacción con la obra. El agrietamiento, conjuntamente con otras dislocaciones tectónicas (fallas) caracteriza la estructura del macizo rocoso que influye en la anisotropía de sus propiedades y en su heterogeneidad.

El agrietamiento en los macizos rocosos estudiados constituye el factor más importante y a la vez el más difícil de evaluar en su estudio geomecánico debido a que se presenta con una irregularidad notable, tanto por su tipología y génesis, como por sus características y manifestaciones.

Para la valoración del agrietamiento en cada sector estudiado, se empleo el método geológico, el que consiste en hacer un análisis detallado de todos los parámetros que lo caracterizan, a partir de los que se pueden determinar algunos índices que influyen en la valoración de la estabilidad y comportamiento mecánico – estructural de los macizos rocosos. Los parámetros analizados fueron: número de sistemas de grietas, distancia entre las grietas, abertura de las grietas, características de las grietas (rugosidad, continuidad,

tipo de relleno, humedad, entre otras). En este acápite de una forma generalizada, se realiza una valoración del agrietamiento de cada macizo rocoso estudiado.

Para el análisis del agrietamiento en todas las obras estudiadas, se dividieron las excavaciones en tramos con características litológicas similares. Para garantizar un muestreo correcto se utilizaron varios métodos de toma de muestras; el estratigráfico, el grupal y el intencional.

Durante los estudios realizados se pudo observar el alto grado de afectación que presenta el macizo por este factor (agrietamiento) para la mayoría de los casos. A continuación se muestran los resultados obtenidos durante la valoración de este parámetro, para cada uno de los macizos estudiados.

Mina Las Merceditas.

Para la valoración del agrietamiento en esta mina se hizo un análisis de todas las excavaciones, en las cuales se midieron más de 1200 grietas en 157 estaciones de mediciones, también se utilizaron 1854 mediciones realizadas por otros autores (Cartaya, 1996, 2001; Falero, 1996; Mondejar, 2001; Ugalde, 2000; Gonzáles, 1995).

Durante los recorridos realizados en la mina, se pudo observar el alto grado de afectación que presenta el macizo por este factor (agrietamiento), y la existencia de grietas en todas las direcciones, no obstante, predominan las grietas con un rumbo N 0 –20 W y N 320 – 360 W

Dando una caracterización general del agrietamiento, se puede decir lo siguiente: El espaciamiento mínimo entre grietas y sistemas de grietas oscila entre 20 y 50 mm y el máximo varía desde 150 a 350 mm Las grietas presentan superficies ligeramente rugosas, con una abertura mayor de 1mm, las que en algunos casos pueden llegar hasta 5mm, generalmente son grietas limpias, variando desde discontinuas, onduladas y rugosas hasta planas y lisas. Regularmente estas grietas no están rellenas y cuando existe relleno es material de meteorización de la dunita, en muchos casos con carbonato de calcio con alto grado de consolidación. La presencia de agua en las grietas, por lo general es poca, logrando solo humedecer las paredes de estas, aumentando en época de lluvia, en la que se puede producir un goteo constante. Es conveniente significar que existen zonas, donde la

afluencia de agua es considerable, por ejemplo en algunos tramos de las galerías 13 y 15, según se constató en los recorridos realizados por estas excavaciones.

Análisis por galerías.

Socavón principal M – 1.

En esta excavación se definen tres sistemas de grietas bien definidos, más algunas grietas complementarias, estas grietas se caracterizan por ser limpias, regularmente continuas, onduladas y rugosas, con una ligera alteración, el relleno es carbonato de calcio, el espaciamiento entre las grietas es de 100 a 200 mm y las aberturas tienen un ancho de 2 a 5mm, la presencia de agua es poca, aunque en época de lluvias aumenta considerablemente en algunos tramos.

Galería GE – 4.

Se definen tres sistemas principales de grietas, estas son continuas, rugosas, onduladas, con ligera alteración, rellenas con carbonato de calcio. El espaciamiento entre las grietas es de 160 a 500 mm y las aberturas tienen un ancho de 2,5 a 5 mm la presencia de agua es poca.

Galería GE – 6.

También se definen tres sistemas principales de grietas, las que se pueden valorar como onduladas, rugosas y discontinuas, rellenas con carbonato de calcio. El espaciamiento entre las grietas es de 250 a 300 mm y las aberturas tienen un ancho de 1 a 5 mm. La presencia de agua es baja.

Galería GE – 13.

Aparecen tres sistemas de grietas principales con los cuales se encuentran asociados algunas grietas complementarias, las grietas son rugosas, están entre continuas y discontinuas, rellenas con carbonato de calcio, la afluencia de agua es poca, el espaciamiento entre las grietas es de 0,12 a 0,25m y las aberturas tienen un ancho de 0,1 a 0,23mm.

Galería GE – 15.

En esta galería aparecen tres sistemas de grietas más algunas grietas complementarias, las mismas son rugosas, varían entre continuas y discontinuas igual que en la galería anterior, con ligeras alteraciones, rellenas de carbonato de calcio y material de meteorización. La afluencia de agua es poca; excepto en algunos tramos afectados por la tectónica. El espaciamiento entre las grietas es de 100 a 350 mm y las aberturas tienen un ancho de 2 a 5mm.

Mina El Cobre.

Para el análisis de este macizo rocoso fue estudiado todo el sector de la mina El Cobre, donde se midieron 786 grietas en 42 estaciones de mediciones, se usaron también 466 mediciones realizadas por otros autores (Joao, 1998; Cartaya, 2000; Mondejar); en el trabajo se muestran los resultados de algunas de las excavaciones analizadas.

Galería principal.

En esta galería aparecen dos sistemas de grietas principales, más algunas grietas aleatorias o complementarias. La distancia promedio entre las grietas y sistemas de grietas es de 300 a 500 mm, las grietas son continuas, planas y rugosas y su grado de alteración es moderado, la abertura de las grietas está en el rango de 2 a 5 mm y las mismas están rellenas con material arcilloso poco consolidado, la humedad es baja y sólo se logra humedecer las paredes, aunque en algunos tramos aislados se manifiesta en forma de goteo constante.

Galería de subnivel.

En esta galería se pueden encontrar tres sistemas de grietas principales, así como algunas grietas aleatorias o complementarias, la distancia promedio entre las grietas es de 200 a 400mm. Las grietas se clasifican como continuas, planas y rugosas, el espacio de las mismas está relleno con material arcilloso, y tienen un ancho de 2,5 a 4,3mm. El grado de alteración de las grietas es moderado y la humedad es baja o casi nula y solo en las épocas de lluvias se convierte en un flujo constante.

Galería de ventilación.

Esta excavación está caracterizada por presentar tres sistemas de grietas bien definidos, la distancia promedio entre las grietas es de 200 a 300 mm, las mismas se clasifican como grietas continuas, planas y rugosas, el tipo de relleno que presentan estas grietas es carbonato de calcio y material arcilloso bien consolidado, el ancho de la abertura en ellas no sobrepasa los 5mm, la humedad solamente es considerada en algunos tramos de la galería, siendo en el resto casi nula produciéndose solamente el humedecimiento de las paredes de la excavación.

Túneles del trasvase de Mayarí.

Teniendo en cuenta la gran extensión que tienen estas obras y la gran variedad de tipos de rocas, por las que los túneles fueron laboreados, se hizo un análisis por separado en cada tramo o túnel que se laborea en este macizo rocoso. Se midieron 978 grietas en 42 estaciones, también se utilizaron 739 mediciones realizadas por otros autores (Cartaya, 2000; Lovaina, 2000).

Túnel de Seboruquito – Esperanza.

En este túnel aparecen tres sistemas de grietas, entre las mismas hay una distancia promedio de 200 a 250 mm, las grietas son continuas, lisas y en algunos casos aparecen fallas, las mismas tienen determinado grado de alteración en sus paredes, la humedad es nula y solamente en algunos casos puede alcanzar valores medios, provocada fundamentalmente por la infiltración del agua que proviene de las precipitaciones, las aberturas tienen un ancho no mayor de 5mm.

Túnel Enmedio – Guayabo.

En este túnel podemos apreciar la existencia de tres sistemas de grietas, más algunas grietas aleatorias, la distancia entre estas grietas es de 150 a 300m como promedio, las mismas se clasifican en grietas continuas, onduladas y rugosas, estas grietas están rellenas con partículas arcillosas consolidadas, la afluencia de agua es muy baja, excepto en algunos tramos donde el caudal es elevado, las aberturas tienen un ancho de 2 a 5mm

Túnel Guayabo – Ponte Suelo.

En este túnel aparecen tres sistemas de grietas, la distancia promedio entre las mismas es de 100 a 250 mm, estas grietas están rellenas con algunos carbonatos, las paredes de las mismas están ligeramente alteradas, estas tienen una abertura de 2,5 a 6,0 mm, generalmente se clasifican como grietas continuas, planas y lisas, al igual que en el caso anterior la humedad es muy baja y solo en época de lluvia aparecen en algunos tramos en forma de goteo constante.

Túnel Guaro – Manacal.

En este túnel aparecen tres sistemas de grietas más algunas grietas complementarias, la distancia promedio entre las grietas es de 200 a 300 mm, con una abertura de 2 a 5 mm las grietas son discontinuas, onduladas y rugosas, el relleno es de carbonato de calcio ligeramente consolidado. La presencia de agua es nula y en algunos tramos puede manifestarse humedeciendo ligeramente las paredes de la excavación.

Túneles populares de Holguín.

Para abordar este acápite, en este macizo rocoso fueron estudiados varios túneles, los cuales se construyen en rocas del grupo de las serpentinas. Dentro de los túneles estudiados se encuentra: túnel de ciencias médicas, túnel de Caguayo y el túnel de Fundición, en los cuales se siguió el mismo procedimiento, que en los macizos analizados anteriormente. En estos se realizaron 1349 mediciones de grietas en 153 estaciones de mediciones, utilizando también 879 mediciones realizadas por otros autores (Acosta, 1996; Cuesta, 1996; Mondejar, 2001).

Túnel de ciencias médicas.

En este túnel aparecen dos sistemas de grietas más algunas grietas aleatorias, entre las mismas hay una distancia de 150 a 200 mm, las grietas son continuas, lisas y en algunos casos aparecen espejos de fallas, las mismas tienen las paredes ligeramente alteradas. La humedad es nula y solamente en algunos casos se manifiesta con determinado grado de intensidad, provocada fundamentalmente por el agua que proviene de las precipitaciones, las aberturas tienen un ancho de 0,3 a 6,5 mm.

Túnel de Caguayo.

En este túnel se pueden encontrar tres sistemas de grietas principales, así como algunas grietas complementarias, la distancia promedio entre las grietas es de 120 a 200 mm, las grietas se clasifican como continuas, planas y rugosas y las mismas tienen una abertura de 1,30 a 4,5 mm estando rellenas con material arcilloso, el grado de alteración es moderado y el de humedad es bajo o casi nulo y solo en las épocas de lluvias se convierte en un flujo constante.

Túnel de Fundición.

En este túnel aparecen tres sistemas de grietas, la distancia promedio entre las mismas es de 100 a 500 mm, estas grietas están rellenas con algunos carbonatos, las paredes de las mismas están ligeramente alteradas, tienen una abertura de 2,30 a 3,2 mm, las mismas se clasifican generalmente como grietas continuas, planas y lisas. Al igual que en el caso anterior la humedad es muy baja y solo en épocas de lluvias aparecen en algunos tramos en forma de goteo constante.

Túnel hidrotécnico de Las Tunas.

Para hacer una valoración lo más detallada posible de cada uno de los parámetros o índices que caracterizan el agrietamiento en este macizo, se realizaron las mediciones en los dos tramos que forman este túnel. Aquí se midieron 689 grietas en 78 estaciones de medición.

Para este macizo, debido a la cercanía de los tramos y la similitud que existe entre ellos, atendiendo a todos los parámetros que lo caracterizan, se hace un análisis general del macizo rocoso.

Este macizo se caracteriza por tener bien definido tres sistemas de grietas. La distancia promedio que existe entre ellas está en el rango de 150 a 300 mm, las mismas se caracterizan por ser continuas, planas y rugosas, las aberturas de las grietas son menores de 5 mm y están rellenas con material arcilloso, sus paredes son blandas y en cuanto a la humedad podemos decir que esta es media y se manifiesta en forma de goteo constante. Esta última característica se debe fundamentalmente, a que esta zona es muy baja y gran cantidad de agua proveniente de las precipitaciones es acumulada en esta zona, llegando hasta las excavaciones a través de las grietas y cavidades del macizo.

Túneles populares de Guantánamo.

En este macizo rocoso fueron analizados varios túneles, los cuales durante sus análisis presentaban características muy similares, en cuanto al agrietamiento y otros factores que lo caracterizan. Para estos túneles se realizaron 1367 mediciones en 126 estaciones de medición.

De manera general podemos decir, que en estos macizos se pueden apreciar dos sistemas de grietas bien definidos, con los cuales se encuentran asociadas algunas grietas aleatorias o complementarias. El espacio entre las grietas es de aproximadamente 200 a 300 mm, las mismas son continuas, planas y lisas y en algunos casos onduladas y lisas. La abertura de las grietas es de 0,2 a 5mm, estas aberturas están rellenas con material desintegrado o poco consolidado, como el talco, yeso, arcilla entre otros, la humedad es muy baja y en algunos casos llega a ser nula.

Túneles populares de Moa.

Los túneles de Moa se encuentran ubicados en el macizo ofiolítico de la Región oriental de nuestro país, en estos se midieron 2174 grietas en 104 estaciones de medición.

Para abordar el problema del agrietamiento en este macizo rocoso, se analizaron varias obras subterráneas, las cuales se caracterizan por tener laboreadas varias galerías, dividiendo estas en tramos con características litológicas similares.

Túnel del CAME.

En este túnel se manifiestan tres sistemas de grietas principales, apareciendo en algunos casos grietas complementarias, la distancia entre grietas es de 150 a 500 mm, estas están ligeramente alteradas y rellenas con carbonato de calcio. la abertura promedio es de 3 a 5 mm, estas grietas pueden clasificarse como continuas, onduladas y lisas, la afluencia de agua es muy baja.

Túnel de Mantenimiento Constructivo.

En este túnel aparecen cuatro sistemas de grietas, con un espaciamiento que varía de 100 a 350 mm, las grietas son discontinuas, con una ligera rugosidad, la abertura está en el rango de 0,8 a 1,5mm. Estas aberturas están rellenas generalmente con material arcilloso. La humedad es muy baja y solo en algunos tramos aparece en forma de goteo.

De esta misma forma se comporta el agrietamiento en otros túneles como son: túnel de comercio, túnel Pedro Soto Alba y túnel del Puerto.

Túnel de la empresa Comandante Che Guevara.

En este túnel aparecen tres sistemas de grietas y algunas grietas aleatorias, aunque en algunos tramos aparece un agrietamiento caótico con intercalaciones de milonitas, el espaciamiento entre las grietas varía de 100 a 500 mm, las mismas son discontinuas, con una ligera rugosidad, la abertura está en el rango de 0,8 a 5mm. Estas aberturas están rellenas con material arcilloso. La humedad es muy baja y solo en algunos tramos aparece en forma de goteo.

Túnel de la empresa Mecánica del Níquel.

En este túnel aparecen cuatro sistemas de grietas y en algunos tramos hay tres sistemas más algunas grietas aleatorias, la distancia entre las grietas es de 150 a 250 mm, las grietas son discontinuas, con las paredes rugosas, el ancho de la abertura es de 1,2 a 5mm. Las mismas están rellenas con material desintegrado. En cuanto a la humedad esta es nula y solo en algunos tramos aparece en forma de goteo.

Mina Amores.

En los recorridos hechos por las excavaciones de estudio se pudo observar que el grado de afectación del macizo está en correspondencia con el periodo de explotación de esta mina y se encuentra estrechamente vinculado a los diferentes factores de interperismo (meteorización, temperatura, humedad y la propia atmósfera minera).

Para el análisis de este macizo rocoso se dividió el socavón en tres tramos, donde se midieron 351 grietas en 23 estaciones de mediciones, en estos tramos se hizo una valoración de cada uno de los parámetros que caracterizan el agrietamiento, la bloquicidad y el grado de afectación.

Tramo I.

En este tramo se definen cuatro sistemas de grietas más algunas grietas complementarias, el espaciamiento entre las grietas está en el rango de 220 a 250 mm. En este tramo las grietas son continuas, onduladas y rugosas, el relleno es de material arcilloso, el espacio de las aberturas de las grietas es menor de 5mm y la humedad o flujo de agua es nulo.

Tramo II.

En este tramo se definen cuatro sistemas de grietas principales, en estas familias las grietas están a una distancia promedio de 250 a 300 mm, y son discontinuas, onduladas y de rugosas a lisas, el relleno es de material arcilloso sedimentado, el ancho de las aberturas de las grietas es de 0,12 a 0,45mm y la humedad es baja.

Tramo III.

En este tramo aparecen tres sistemas de grietas, la distancia promedio entre las grietas es aproximadamente de 200 a 300 mm, y discontinuas, onduladas y lisas. El relleno es de carbonato de calcio, el ancho de las aberturas de las grietas es de 0,2 a 0,5mm. La humedad es baja y en algunos tramos fundamentalmente en época de lluvia puede convertirse en goteo constante.

Los resultados obtenidos del estudio del agrietamiento para los diferentes macizos rocosos, se muestran en el trabajo en la tabla 1, donde se señala el valor promedio de cada parámetro determinado. El análisis estadístico se realizó a partir del criterio de lograr una confiabilidad en los resultados obtenidos por encima del 85% y en las figuras de la 1 a la 8 del anexo III, se muestra el diagrama de roquetas de cada obra estudiada, construidos con la ayuda del programa georient y en los cuales se puede obtener las principales direcciones de los sistemas de diaclasas.

II. 6 Determinación de la bloquicidad en los macizos estudiados

Para la determinación de la bloquicidad en cada macizo rocoso estudiado, se parte del análisis del agrietamiento, de la existencia de fallas, de los planos de estratificación y de otros defectos estructurales, que influyen de una forma u otra en la valoración del tamaño, forma y disposición espacial de los bloques, al igual que en el comportamiento del macizo. Palmstrøm, 1986 y 1995. Hoek and Brawn, 1980, 1995 y 1999.

Para llevar a cabo este proceso, se utilizaron varios métodos, los cuales están basados en diferentes factores, que caracterizan al macizo y que se analizan a continuación.

Método para determinar el volumen del bloque a partir de la frecuencia de las grietas (Na).

$$Na = 1 \frac{1}{\sqrt{A}} * \sum (nai * Li) + naj$$

Donde: A – Área de la superficie de observación.

naj – Número de grietas más largas que la longitud del área de observación.

nai – Grieta i de longitud Li más corta que la longitud del área de observación.

Para la determinación del volumen de los bloques a partir de la frecuencia entre grietas (Na) y la cantidad de grietas por m³ (Jv) se emplea la figura 3.

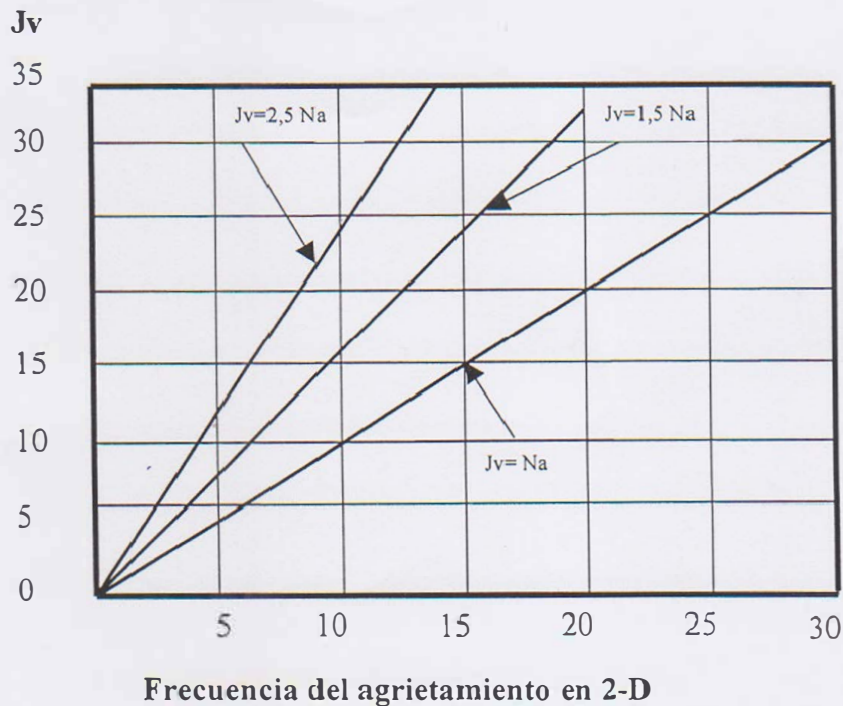


Figura 3. Determinación del volumen de los bloques a partir de Na y Jv.

Método para determinar el volumen del bloque a partir del número de grietas por m³.

$$Jv = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + Nr/5$$

Donde: Si – Distancia entre las grietas de cada familia.

Nr – Número de grietas aleatorias.

Conociendo los valores de J_v y utilizando la tabla 2, se puede determinar el tamaño de los bloques. Palmström, 1986 y 1995.

Tabla 2. Determinación del tamaño de los bloques a partir de la cantidad de grietas por m^3 .

Descripción	Numero de grietas(J_v)
Bloques muy grandes	Menor de 1
Bloques grandes	1 - 3
Bloques medios	3 - 10
Bloques pequeños	10 - 30
Bloques muy pequeños	Mayor de 30

Método para determinar el tipo y forma de los bloques

Para la determinación del tipo y forma de los bloques se utilizó la figura 4, la cual esta basada en los valores de la distancia entre las grietas.

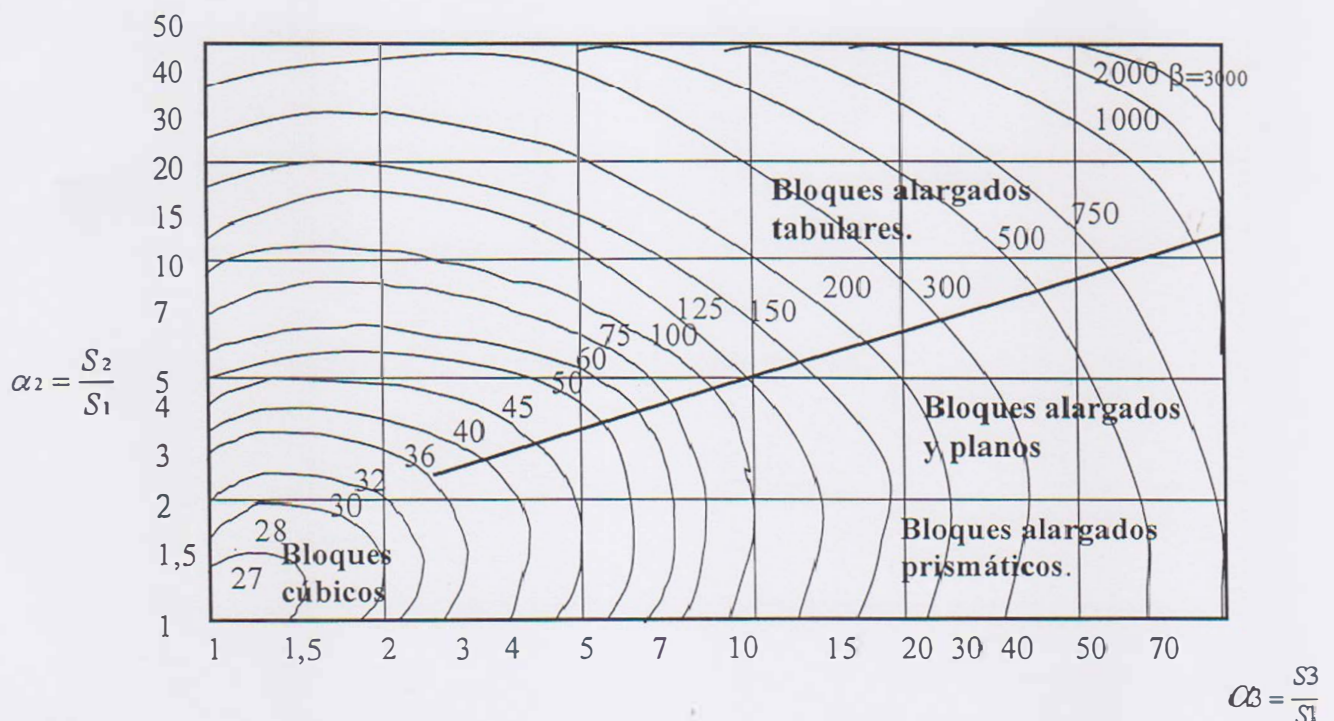


Figura 4. Determinación de la forma de los bloques a partir de la distancia entre las grietas.

Donde: S_1 – Espacio más pequeño entre las grietas.

S_2 - Espacio medio entre las grietas.

S_3 - Espacio más grande entre las grietas.

Método para la clasificación del volumen de los bloques relacionado con el tamaño de la partícula.

Según Palmstrom se determinó el volumen de los bloques teniendo en cuenta el tamaño de las partículas, para lo cual fue empleada la tabla 3, la que mostramos a continuación.

Tabla 3. Método de Palmstrøm.

Densidad de las grietas	Tamaño del bloque	Volumen del bloque	Partículas del suelo	Volumen de la partícula
Extremadamente alta	Extremadamente pequeño	Menor de 10 cm ³	Arena gruesa	0,1 – 5 mm ³
Muy alta	Muy pequeño	10 – 200 cm ³	Gravas finas	5 – 100 mm ³
Alta	Pequeño	0,2 – 10 dm ³	Gravas medias	0,1 – 5 cm ³
Moderada	Medio	10 – 200 dm ³	Gravas gruesas	5 – 100 cm ³
Baja	Grande	0,2 – 10 m ³	Canto rodado	0,1 – 5 dm ³
Muy baja	Muy grande	10 – 200 m ³	Fragmento de gran tamaño	5 – 100 dm ³
Extremadamente baja	Extremadamente alta	Mayor de 200 m ³	Bloques	Mayor de 0,1 m ³

Para determinar el tamaño y forma de los bloques en cada macizo, según los análisis estadísticos se realizaron de 15 a 25 determinaciones para lograr una confiabilidad mayor del 85%.

Los resultados de la valoración de la bloquicidad, para las obras estudiadas se muestran en la tabla 4. En ella se señala el valor promedio de los resultados obtenidos por cada método y su variación.

A partir de los resultados determinados para cada obra, teniendo en cuenta; que la correspondencia de estos, con los valores obtenidos en la práctica sea mayor que el 85%, el análisis del historial durante 5 años del comportamiento de este parámetro, observaciones visuales y el análisis de las características estructurales del macizo, se determinó cuales de los métodos estudiados son los que más se adecuan a cada tipo de macizo.

Según las características estructurales de los macizos ofiolíticos estudiados, estos se caracterizan, por presentar determinado grado de fracturación, en ellos aparecen bien definidos los diferentes sistemas de grietas principales, así como la distancia entre ellas. En estos macizos conjuntamente con estos sistemas, aparecen grietas complementarias o aleatorias, aspecto este que influye considerablemente en el comportamiento del mismo y que en muchos casos no es tenido en cuenta por algunos de los métodos empleados en este

Tabla 4. Resultado de la valoración de la bloquicidad para los mineros reconocidos estudiados

Obras Estudiadas.		Resultados.						Forma de los bloques a partir de la distancia entre grietas
		Volumen de los bloques a partir de la frecuencia de grietas	A, %	Volumen de los bloques a partir del número de grietas	A, %	Volumen de los bloques a partir del tamaño de las partículas	A, %	
Mina Las Mercedes	Socavón - 1	0,39 - 0,96 m ³	20,7	0,2 - 1,03 m ³	25,31	0,22 - 1,18 m ³	19	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Galera - 4	0,31 - 0,96 m ³	18	0,4 - 0,8 m ³	18,01	0,31 - 0,78 m ³	20,13	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Galera - 6	0,30 - 0,46 m ³	21	0,27 - 0,63 m ³	22,4	0,39 - 0,5 m ³	19,09	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Galera - 13	0,31 - 0,55 m ³	19,77	0,29 - 0,63 m ³	19,3	0,3 - 0,58 m ³	23,06	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Galera - 15	0,29 - 0,66 m ³	19,8	0,28 - 0,4 m ³	27,43	0,27 - 0,33 m ³	18,54	Bloques Cúbicos Equidimensionales
Mina El Cobre	Galera principal	0,26 - 0,66 m ³	27,4	0,46 - 0,67 m ³	16,4	0,37 - 0,58 m ³	25,01	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Galera de subnivel	0,4 - 0,13 m ³	26	0,36 - 0,57 m ³	17,03	0,3 - 0,47 m ³	26,4	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Galera de ventilación	0,5 - 0,58 m ³	19,9	0,3 - 0,61 m ³	21,8	0,3 - 0,45 m ³	20,18	Bloques Cúbicos Equidimensionales
Túneles del trasvase de Mayari	Túnel Seborunquito - Esperanza	0,39 - 0,89 m ³	29,5	0,4 - 1,05 m ³	32,1	0,4 - 1,33 m ³	23,6	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel Esmeralda - Cayabo	0,31 - 0,80 m ³	23,05	0,27 - 0,98 m ³	20,3	0,33 - 0,953 m ³	17	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel Cayabo - Pontecuelo	0,3 - 0,73 m ³	19,88	0,24 - 0,89 m ³	19,09	0,3 - 0,95 m ³	16,33	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel Gomo - Mimaral	0,26 - 0,75	29,33	0,33 - 0,80 m ³	21,24	0,31 - 0,78	19,7	Bloques Cúbicos Equidimensionales
Túneles populares de Higuera	Túnel de curación médica	0,5 - 0,96 m ³	25,03	0,66 - 1,05 m ³	21,4	0,42 - 0,67 m ³	19	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel de Caguayo	0,4 - 0,84 m ³	31,19	0,31 - 0,97 m ³	23,03	0,4 - 0,77 m ³	23,5	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel de Puallición	0,34 - 0,96 m ³	14,3	0,26 - 0,89 m ³	16,2	0,34 - 0,87 m ³	19,03	Bloques Cúbicos Equidimensionales
Túnel hidroeléctrico de Las Tunas	Túnel - 1	0,3 - 0,83 m ³	26	0,34 - 0,79 m ³	24,01	0,35 - 0,68 m ³	27	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel - 2	0,29 - 0,68 m ³	19,88	0,30 - 0,67 m ³	27,6	0,27 - 0,55 m ³	21,4	Bloques Cúbicos Equidimensionales
Túneles populares de Guanabacoa	Túnel - 1	0,3 - 0,87 m ³	17,5	0,18 - 1,01 m ³	18,99	0,32 - 1,01 m ³	18,9	Bloques Aburgados prismáticos
	Túnel - 2	0,43 - 1,07 m ³	23,43	0,4 - 1,33 m ³	26,2	0,39 - 1,35 m ³	18,4	Bloques Aburgados planos
	Túnel - 3	0,31 - 0,9 m ³	27,05	0,38 - 1,05 m ³	24,92	0,34 - 1,01 m ³	21,53	Bloques Aburgados prismáticos
Túneles populares de Mon	Túnel del CAMPE	0,34 - 0,89 m ³	29,03	0,32 - 0,9 m ³	19,2	0,3 - 1,0 m ³	17,04	Bloques Cúbicos
	Túnel de Mantenimiento Constructivo	0,23 - 0,62 m ³	18,35	0,2 - 0,5 m ³	21,45	0,2 - 0,5 m ³	20,63	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel Emp. Cda. E. Cda. Clavero	0,14 - 0,59 m ³	20,66	0,36 - 0,59 m ³	28,07	0,27 - 0,48 m ³	27,12	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel Emp. Mecánica del Niquel	0,2 - 0,34 m ³	23,19	0,22 - 0,4 m ³	21,3	0,3 - 0,4 m ³	27,73	Bloques Cúbicos Equidimensionales
Mina Amores	Túnel - 1	0,30 - 0,87 m ³	19,5	0,33 - 0,86 m ³	16,88	0,33 - 0,89 m ³	17,91	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel - 2	0,43 - 0,87 m ³	23,43	0,3 - 0,76 m ³	23,7	0,39 - 0,85 m ³	23,04	Bloques Cúbicos Equidimensionales
	Túnel - 3	0,31 - 0,9 m ³	21,05	0,45 - 0,897 m ³	20,06	0,37 - 0,97 m ³	21,31	Bloques Cúbicos Equidimensionales

análisis. Los bloques aparecen bien definidos, lo que permite valorar su distribución, forma y dimensiones en condiciones naturales, haciendo posible que se establezca una comparación entre estos resultados y los obtenidos por los métodos empleados.

Por el análisis realizado anteriormente, se obtiene que en los macizos ofiolíticos, para la determinación del volumen de los bloques se debe utilizar el método a partir del número de grietas, en tanto que para la determinación de la forma y dimensiones de los bloques, se debe emplear el método que se basa en la relación de la distancia entre las grietas.

En el macizo de la formación El Cobre, el agrietamiento se caracteriza por presentar varios sistemas de grietas principales y en algunos tramos, se pueden encontrar grietas complementarias lo que no es representativo para todo el sector, esto hace que no se pueda determinar la longitud de las grietas, ni su intensidad. Durante los análisis se pudo observar que en algunos tramos o galerías no existían grietas, comportándose el macizo como una masa compacta, de aquí que se dificulte, en determinada medida la valoración del tamaño y forma de los bloques. Todo esto hace que no se tenga en cuenta el grado de convergencia de los valores obtenidos en la práctica y los obtenidos por los métodos.

De estos resultados se obtiene, que para el macizo de la formación El cobre, el método que se debe de utilizar es la determinación del volumen de los bloques a partir del número de grietas.

Para el macizo de rocas sedimentarias a partir del estudio de las características estructurales, se obtiene que el mismo se encuentra estratificado, lo que permite que se puedan definir, con claridad, los diferentes sistemas de grietas, así como la distancia entre ellas, también existen grietas complementarias, que en muchos casos no se tienen en cuenta y que provocan un aumento en la fracturación del macizo y se rompa la continuidad de las grietas principales. Todo esto conlleva a que el estado tensional se altere. En cuanto a los bloques estos se encuentran bien definidos, pudiéndose, sin dificultad, valorar su distribución, forma y dimensiones en condiciones naturales, lo que posibilita establecer una comparación entre los resultados de la práctica y los obtenidos por los métodos empleados.

Por el análisis realizado anteriormente, se obtiene que en los macizos de rocas sedimentarias, para la determinación del volumen de los bloques se debe utilizar el método a partir del número de grietas, en tanto que para la determinación de la forma y

dimensiones de los bloques, se debe emplear el método que se basa en la relación de la distancia entre las grietas.

En los macizos estudiados existen parámetros, que no se pueden valorar en todos los casos, debido a las características de los mismos, lo que dificulta la aplicación de otros métodos. Esto está dado porque la valoración del agrietamiento, no siempre se realiza mediante el establecimiento de un área de observación, sino que se efectúa mediante testigos de sondeo y la longitud de las grietas en la mayoría de los casos no se puede definir.

II.7 Análisis del grado de deterioro de los macizos rocosos

Durante el proceso de laboreo, construcción y explotación de las excavaciones subterráneas, el macizo al estar denudado lo que puede ocurrir incluso, después de fortificada la excavación se ve afectado por muchos factores, los cuales hacen que el mismo cambie sus condiciones de estabilidad, su estado tensional, sus características constructivas y muchas de sus propiedades Físico – Mecánicas.

Para la valoración del grado de deterioro de los macizos rocosos son empleados numerosos criterios, los que se basan en diferentes parámetros; como por ejemplo: grado de decoloración, grado de descomposición química y física, en la relación roca – suelo (los que pueden ser obtenidos mediante observaciones visuales), pérdida de resistencia de la roca, disminución de su módulo de elasticidad, incremento de la porosidad, humedad y variación del índice de calidad de las rocas RQD; (los que son obtenidos por la realización de trabajos experimentales). (Barton N. 1985, Kilic R. 1995, Bieniawski. 1967. Almaguer, 2001).

Para el estudio del proceso de deterioro del macizo rocoso en primer término se realizaron observaciones visuales que permitieron realizar la descripción del macizo rocoso, así como de las características de las rocas que rodean las excavaciones, esto se realizó a partir del reconocimiento visual. A continuación se analizan los parámetros que fueron estudiados en nuestro trabajo:

Grado de decoloración: Para la valoración de este parámetro en los diferentes macizos rocosos estudiados se realizaron numerosas observaciones visuales, con el objetivo de comparar como se comportaba el color de la roca fresca y el de la roca deteriorada debido

al proceso de meteorización; comprobando que estas últimas manifestaban cambio de coloración, lo que nos brinda elementos que permiten valorar su grado de deterioro. Un ejemplo lo constituyen las rocas de los macizos ofiolíticos, las que en función del tiempo de exposición a los efectos de los agentes de interperismo y al medio subterráneo experimentan una pérdida de color, el cual varía, desde colores oscuros a colores más claros. Un comportamiento similar se pudo apreciar en varias rocas del macizo sedimentario estudiado y en la formación El Cobre.

Grado de desintegración física: Para analizar este parámetro se tomaron muestras de rocas en cada uno de los macizos que fueron objeto de estudio, comprobando que en función del grado de deterioro, las rocas más deterioradas experimentaban un mayor grado de microfracturación, los granos se encontraban abiertos y se apreciaban en la estructura externa e interna de las rocas cambios significativos a diferencia de las rocas más frescas que presentaban características totalmente diferentes. Este parámetro se comprobó en cada uno de los macizos rocosos estudiados, donde todas las rocas en función del tiempo de denudamiento presentaban un mayor grado de deterioro el cual se manifiesta a partir de ser más dedesnable.

Además del reconocimiento visual que nos permitió la determinación de las características, antes mencionadas del deterioro del macizo rocoso, se emplearon algunos métodos experimentales para la determinación de la pérdida de resistencia de los macizos deteriorados y saturados, para evaluar la variación de su calidad, para definir su capacidad de hinchamiento y otros.

Pérdida de Resistencia de la roca: La resistencia de la roca en las excavaciones subterráneas disminuye a causa de la meteorización y acción de la atmósfera subterránea. Para evaluar este parámetro se utilizó un índice de resistencia (K_t), que nos da la relación entre la resistencia de una roca deteriorada y la de una roca en buen estado. (Blanco, 1998).

Índice de espaciamiento de las fracturas e índice de calidad de la roca (RQD): El espaciamiento de la fractura generalmente decrece con el incremento de la meteorización. Por lo tanto el índice de espaciamiento de las fracturas puede ser un indicador del grado de meteorización de las rocas. (Bieniawski, 1967).

Pérdida de resistencia por la acción del agua: Para la valoración del reblandecimiento de las rocas las muestras fueron colocadas dentro del agua y se fueron ensayando para

diferentes periodos de tiempo. Para ello se determinó la resistencia de cada muestra antes de ser sumergida en agua (R_c^i) y posteriormente se determinó la resistencia de estas muestras cada 7 días, hasta los 42 días en que se obtuvo el valor de la resistencia de cada roca saturada (R_c^f).

El coeficiente de reblandecimiento (K_t) se obtiene por la relación entre la resistencia de la roca saturada y su resistencia antes de ser sumergida en el agua.

Los resultados obtenidos de la valoración del grado de deterioro de las rocas, en los diferentes macizos, se muestran en las tablas 1 a la 8 del anexo IV, donde se señala el valor promedio y la variación de los resultados.

II.8 Análisis de las condiciones de estabilidad en los macizos rocosos estudiados

Por estabilidad de las excavaciones subterráneas, según Blanco, 1998 se entiende la capacidad que ellas poseen de conservar la forma y dimensiones requeridas de su sección transversal durante el tiempo previsto de explotación.

La estabilidad del macizo rocoso depende de un gran número de factores, entre ellos los más importantes son (Blanco, 1998; Moreno, 1998 y Romana, 1997):

- Propiedades físico mecánicas de las rocas.
- Grado de agrietamiento del macizo y unido a esto el número de sistemas de grietas existentes, su orientación respecto a la dirección de la excavación y el material del que estén rellenas las grietas entre otros aspectos.
- Tensión actuante en el macizo (antes y después de laboreada la excavación).
- Forma y dimensiones de la sección transversal de la excavación.
- Método de laboreo de la excavación y su lugar de ubicación en el macizo.
- Cantidad y presión del agua existente en el macizo.

Sobre la base de los estudios realizados al respecto, se diferencian tres formas características de pérdida de estabilidad: (Bulichev, 1982)

- Desprendimiento de sectores de rocas fracturadas a causa de su propio peso: es característico de los macizos rocosos afectados (estratificación, agrietamiento,

planos de clivaje, entre otros). El mecanismo es bastante simple de explicar. El peso de la roca que yace sobre la excavación es mayor que la resistencia al cortante de las rocas, por lo que este se separa del macizo y cae. Su pronóstico es bastante difícil, debido a la gran cantidad de causas que pueden incidir.

- Desplazamiento, deformación y destrucción de las rocas en la zona de concentración de tensiones: En este caso la pérdida de estabilidad se produce cuando las tensiones actuantes en el contorno de la excavación sobrepasan el valor de la resistencia de la roca.
- Desplazamiento significativo de las rocas desnudas sin que se produzca en ella destrucción apreciable: En este caso el macizo se considera como un medio elástico – plástico homogéneo, en el que se van a producir desplazamientos y deformaciones significativas en la roca del contorno de la excavación sin su destrucción.

En la actualidad, de los métodos existentes para evaluar la estabilidad, los que mayor difusión han alcanzado en nuestro país son las llamadas Clasificaciones Geomecánicas.

Las Clasificaciones Geomecánicas, según Moreno, 1998, son sistemas específicos donde se obtienen distintos parámetros geológicos y propiedades mecánicas para evaluar y definir el comportamiento del macizo rocoso con su empleo. Mediante descripciones cualitativas y una valoración de los parámetros de los índices de calidad, se llegan a establecer determinadas características que describen el comportamiento de los macizos al que se le pueden asociar ciertas propiedades e incluso correlación con parámetros de diseño y elementos de sostenimiento, partiendo siempre de criterios empíricos.

Los principios generales de las Clasificaciones Geomecánicas, según Ramírez y Huerta, 1994 son:

- Relaciones empíricas.
- Parámetros de fácil identificación.
- Sencillos y fáciles de aplicar.

Estas clasificaciones desarrolladas principalmente a partir de la década del 70 han alcanzando gran aceptación, no obstante para su empleo deben tenerse en cuenta las

limitaciones que ellas presentan en cuanto a las características de los macizos y obras donde se prevé su utilización.

Para la evaluación de la estabilidad de las excavaciones de las obras objeto de estudio se emplearon cuatro de las clasificaciones más difundidas en el mundo y en nuestro país:

1. **Clasificación de Deere**, que se basa en la determinación de un índice de calidad de las rocas el RQD. Las tablas necesarias para la aplicación de esta metodología aparecen en el anexo V, tabla 1.
2. **Clasificación que se basa en el RMR (Rock Mass Rating)** propuesto por Bieniawski (versión corregida de 1979) (Bieniawski, 1979; Moreno, 1998). Las tablas necesarias para la aplicación de esta metodología aparecen en el anexo V, tablas 2 a la 5.
3. **Clasificación del Instituto Noruego de Geotecnia**, que se basa en el sistema Q de Barton, Lien y Lunde de 1974 y está basada en seis parámetros (Barton N, Lien R, Lunde, J, 1974 y Vallejo, 1998). Las tablas necesarias para la aplicación de esta metodología aparecen en el anexo V, tablas 6 a la 11.
4. **Clasificación basada en el índice S propuesto por Bulichev** (Blanco 1998; Martínez Silva, 2000). Las tablas necesarias para la aplicación de esta metodología aparecen en el anexo V, tablas 12 a la 15.

Al analizar diferentes trabajos de evaluación de la estabilidad realizados en algunos de los macizos de la Región Oriental de nuestro país por otros investigadores (Falero, 1997; Cartaya, 1996, 2000, 2001; Ugalde, 2000; Mondejar, 2001) se obtuvo que: para los análisis fueron divididas las excavaciones en tramos con características litológicas similares, a partir de este criterio, se puede observar que en algunas zonas, no es posible dar un criterio de estabilidad debido a la variación de los resultados obtenidos por cada una de las metodologías mencionadas. Por ejemplo para la mina Las Merceditas la diferencia de los resultados del RMR y de Q varían de un extremo a otro, esto implica que no se pueda realizar una caracterización del comportamiento de la estabilidad del conjunto macizo excavación, ocurriendo así para otras obras (ver tablas de la 16 a la 53 del anexo V).

Utilizando algunos de los resultados de los trabajos mencionados anteriormente y otros obtenidos por el autor y usando una combinación de los métodos de muestreo

estratigráfico, grupal e intencional se dividieron las excavaciones según tramos litológicos y se evaluó la estabilidad para cada tramo por separado lo que permitió establecer un criterio de estabilidad de las excavaciones. Ver tablas 5, 6 y 7, que se muestran en el trabajo, donde se ofrecen los resultados promedios y la variación según análisis estadísticos.

Como la evaluación de la estabilidad se realizó por cuatro de las metodologías existentes se hace necesario conocer si los resultados obtenidos son diferentes estadísticamente, para esto se utilizó el test de la F de Fisher, para poder determinar si existen diferencias entre las medias obtenidas en los diferentes métodos con un nivel de significación de 0,05 (Bluman, 1995). El procesamiento de los datos arrojó que los resultados obtenidos de los métodos son diferentes estadísticamente en algunas de las obras estudiadas. El procesamiento estadístico se realizó con la ayuda del programa Microsoft Excel.

Para determinar si hay diferencia significativa en la clasificación de las rocas a través de los diferentes métodos, se le asignó un código a cada clasificación, para poder aplicar un análisis de varianza de clasificación doble que permita determinar si hay diferencias significativas entre las clasificaciones de las rocas.

Codificación usada:

Roca Muy Buena: 1

Roca Buena: 2

Roca Media: 3

Roca Mala: 4

Roca Muy Mala: 5

El resultado de la codificación de la calidad de las rocas a partir de los resultados de la estabilidad se muestran en las tablas 16, 22, 27, 33, 39, 45 y 51 del anexo V.

De los resultados del análisis de varianza realizado para las excavaciones laboreadas en macizos ofiolíticos se deduce que existen diferencias significativas en la clasificación de las rocas obtenidas por las diferentes metodologías y que la calidad de las rocas difieren significativamente tanto para las filas (metodologías) como para las columnas (tramos), las probabilidades son menores que el 5% (nivel de significación que se usa generalmente).

Al eliminar, del análisis, los resultados obtenidos por los métodos de Barton y Bulichev y aplicar nuevamente el análisis de varianza (tablas de la 17 a 21, 28 a 32, 34 a 38, 46 a 50 y

Tabla 5. Resultados de la evaluación de la estabilidad para los diferentes tamaños como estimación, a partir de la clasificación de Biondini.

Categorías Estudiadas.		Resultados.							
		Según Regio	Porcentaje entre series	Características de las gráficas	Existencia de ruido	Ajuste	HADR	A ₉₅	Clasificación
Mitos Las Mesquitas	Cornisa	11	8	14	10	-2	49	0,75	Medio
	Frontón	17	10	10	10	-2	45	1,1	Medio
	Alcornoque	13	8	10	7	-2	56	2,16	Mala
	Peridótila	20	10	20	15	-3	63	0,17	Buena
	Peridótila superornamentada	17	8	10	10	-2	45	0,95	Medio
Mitos El Chorro	Tobos de diferentes geometrías	17	10	20	15	-2	60	0,70	Buena
	Peristilo neoclásico	20	10	20	15	-2	63	1,58	Buena
	Tobos de grutas medievales	20	10	10	15	-2	53	1,29	Medio
	Tobos arquitectónicos	17	10	10	10	-2	45	1,52	Medio
Talleres del trayecto de Mayari.	Colinas Auxiliares	17	10	20	15	-2	60	0,13	Medio
	Distribución, formación Bóris	20	10	20	15	-2	63	0,12	Buena
	Complejo Monumental	20	10	20	10	-2	58	0,09	Medio
	Decoración de Clavos	17	10	10	10	-2	45	1,01	Medio
Talleres populares de Huelga.	Serpentina de color verde grisáceo decorada	17	8	20	15	-2	50	1,05	Medio
	Serpentina de color verde oscuro	17	10	20	15	-2	60	0,17	Medio
	Peridótila superornamentada	17	8	20	15	-2	50	0,06	Medio
Taller hidrocentra de Los Tumbos.	Ambrosia	20	10	20	15	-2	63	0,09	Buena
	Peridótila	20	8	20	15	-2	61	0,13	Buena
Talleres populares de Guantánamo.	Maya	20	10	10	15	-2	53	3,18	Medio
	Tufos	17	10	10	15	-2	50	1,02	Medio
	Colinas	13	10	10	15	-2	46	0,08	Medio
	Tobos	13	10	10	15	-2	46	2,22	Medio
Talleres populares de Misa.	Serpentina de color verde grisáceo decorada	13	10	20	10	-2	51	0,32	Medio
	Serpentina de color verde oscuro o claro	13	10	25	15	-2	61	0,71	Buena
Mitos Amores.	Hieraburgos	20	10	20	15	-2	63	0,97	Buena
	Frontón	20	10	20	15	-2	63	1,03	Buena
	Quilón	17	10	10	10	-2	45	0,18	Medio

Tabla 6. Resultados de la evaluación de la estabilidad para los diferentes macizos rocosos estudiados, a partir de la clasificación de Barton.

Obras Estudiadas		Resultados								Clasificación
		RQD	J _n	J _a	J _r	J _w	SRP	Q	A ₃₄	
Mina Las Mercedes	Crocoíta	71	12	2	4	1	2,5	4,72	0,89	Media
	Dumita	86	12	2	3	1	2,5	4,32	2,23	Media
	Microgabra	69	12	4	3	1	2,5	1,62	1,06	Mala
	Peridotita	98	9	2	4	1	5	100	0,21	Buena
	Peridotita serpentizada	81	12	4	3	1	2,5	2,02	1,63	Mala
Mina El Cobre	Tobas de diferentes granulometría	99,1	4	2	3	1	2,5	14,8	1,34	Buena
	Porfiritas andesíticas	97,7	4	2	3	1	2,5	14,6	1,28	Buena
	Tobas de granos finos	93,67	4	1	1	1	2,5	9,36	0,91	Medio
	Tobas andesíticas	88,57	4	1	1	0,66	2,5	5,64	0,65	Medio
	Calizas Arcillosas Extrusivas, formación Bitel	92,1	12	2	2	0,66	2,5	2,03	1,17	Mala
Túneles del tranvía de Mayari	Formación Comarca	99,3	4	2	4	1	5	9,92	0,63	Medio
	Complejo Ultrabásico	97,71	4	2	3	1	5	7,32	0,19	Medio
	Brucias de Ombre	82	6	2	2	0,66	2,5	3,43	1,24	Mala
	Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada	65	15	4	3	1	2,5	1,29	0,65	Mala
Túneles populares de Higuay	Serpentinita de color verde oscuro	86	12	2	4	1	2,5	5,72	0,98	Medio
	Peridotita serpentizada fresca de color verde oscuro	65	12	2	3	1	2,5	3,25	2,6	Mala
	Andesitas	98,5	12	8	1,5	1	5	0,30	0,9	Mala
Túnel hidroeléctrico de las Tumbas	Peridotitas	91,22	15	8	1,5	1	5	0,232	1,33	Mala
	Margas	91	3	4	2	1	5	3	0,34	Mala
Túneles populares de Guantánamo	Tufitas	86	2	4	2	1	5	4,3	0,98	Mala
	Calizas	75	2	4	1,5	1	5	2,77	0,34	Mala
	Tobáceas	67	3	4	2	1	2,5	2,23	1,05	Mala
	Arenas de grano fino	67	3	4	2	1	2,5	2,23	1,05	Mala
Túneles populares de Moa	Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada	75	15	4	3	1	5	0,75	0,56	Muy Mala
	Serpentinita de color verde oscuro fresca	71	12	2	3	1	2,5	2,6	0,09	Mala
	Andesitas	98,5	9	2	3	1	5	3	0,23	Mala
Mina Amorós	Crocoíta	99,1	12	2	2	1	2,5	3,3	0,35	Mala
	Dumita	92,7	15	4	2	1	2,5	1,23	0,64	Mala

Tabla 7. Resultados de la evaluación de la estabilidad por los diferentes métodos y sus respectivas estadísticas, y por la clasificación de estabilidad.

Categorías		Estadísticas										Clasificación
		K_n	F_n	S_n	K_d	F_d	S_d	K_m	F_m	S_m	A_n	
Mina Los Molinos	Calizas	7,8	11	1	1	4	2	1	6,8	7	0,35	Medio
	Dolomita	7,8	11	1	1	2	2	1	7	6,2	0,31	Buena
	Microgabes	7,3	13	1	1	3	4	1	7,71	1,13	1,16	Medio
	Peridotita	6,5	9	1	1	5	2	1	8	10,04	0,97	Buena
	Peridotita serpentizada	6	12	1	1	3	4	1	6,2	3	1,05	Medio
Mina El Cuervo	Tobos de diferentes granulometría	9,1	8	1	1	3	2	1	9,2	16,56	1,01	Buena
	Pacifitas andesíticas	8,66	1	1	3	2	2	1	6,34	9,38	1,08	Buena
	Tobos de grama media	4	9	3	1	2	2	1	6,05	2,01	0,59	Medio
	Tobos andesíticos	4,9	10	1,5	1	2	3	1	5,65	1,13	0,56	Medio
	Calizas Arcillosas Estratificadas, (Caracasolito Baril)	9	12	1	0,66	2	2	1	3,1	1,534	0,57	Medio
Túnel del cruce de Mayar	Formación Canchón	3,3	4	1	1	4	2	1	3,2	11,52	0,66	Buena
	Concreto	8,1	4	1	1	3	2	1	2	6,875	1,19	Buena
	Formación Páramo de Páramo	5,1	6	2	0,66	2	2	1	1,7	8,86	1,04	Medio
	Serpentina de color verde grisáceo meteorizada	7,6	15	2	1	1	4	1	1,5	9,3	0,91	Medio
Túnel popular de Higuera	Serpentina de color verde oscuro	8,3	12	1	1	4	2	1	5,56	7,68	0,77	Buena
	Peridotita serpentizada fresca de color verde oscuro	7,9	12	1	1	3	2	1	7,1	7	1,62	Buena
	Andesitas	8,3	12	1	1	1,5	8	1	1,3	8,15	0,67	Medio
Túnel hidroeléctrico de Las Tunas	Peridotitas	9	15	1	1	1,5	8	1	1,3	8,145	0,51	Medio
Túnel populares de Guantánamo	Margas	8,3	3	1	1	2	4	2	1,3	8,9	0,23	Medio
	Tufitas	7,35	2	1	1	2	4	2	2,5	2,3	0,75	Medio
	Calizas	8,3	2	1	1	1,5	4	2	1,33	1,35	2,07	Medio
	Toloceros	7	3	1	1	2	4	1,5	2,3	1,8	1,93	Medio
Túnel populares de Moa	Armisco de grama fina	7	3	1	1	2	4	1,5	2,3	1,8	1,93	Medio
	Serpentina de color verde grisáceo meteorizada	8,1	15	1	1	3	4	1	3,2	1,3	0,44	Medio
	Serpentina de color verde oscuro fresca	9	12	1	1	3	2	1	4,1	4,5	0,69	Medio
Mina Amore	Harzburgitas	9,1	9	1	1	3	2	1	4,27	6,5	0,43	Estable
	Gneiss	9	12	1	1	2	2	1	6	4,5	0,23	Mediana
	Dunitas	7,5	13	2	1	2	4	1	6,1	9,78	0,61	Inestable

de la 52 a 53 del anexo V), nos percatamos que ya no existían diferencias significativas entre las metodologías restantes. Para determinar qué método se puede utilizar con un elevado nivel de confianza se determinó la correspondencia entre los resultados obtenidos por las clasificaciones y los obtenidos por el estudio del historial del comportamiento de la estabilidad de las excavaciones durante los últimos 5 años y por observación visual. De estos análisis, se recomienda que para evaluar la estabilidad de estas obras se puede utilizar la clasificación de Bieniawski.

De los resultados del análisis de varianza (tablas de la 23 a la 26 del anexo V) realizado para las excavaciones laboreadas en el macizo donde se ubica la mina El Cobre, se deduce que existen diferencias significativas en la clasificación de las rocas obtenida por las diferentes metodologías y que la calidad de las rocas difieren significativamente tanto para las filas (metodologías) como para las columnas (tramos), al igual que en el caso anterior las probabilidades son menores que el 5%. En este caso para determinar qué método se puede utilizar con un elevado nivel de confianza se determinó la correspondencia entre los resultados obtenidos por las clasificaciones y los obtenidos por el estudio del historial del comportamiento de la estabilidad de las excavaciones durante los últimos 5 años y de la observación visual de estas, de estos análisis para estas obras se recomienda que se puede utilizar cualquiera de las clasificaciones propuestas.

Para los túneles populares laboreados en el macizo de rocas sedimentarias de la provincia de Guantánamo, de los resultados del análisis de varianza realizado (tablas de la 40 a la 44 del anexo V), se deduce que existen diferencias significativas en la clasificación de las rocas obtenida por las diferentes metodologías y que la calidad de las rocas difieren significativamente para las filas (metodologías). Al igual que en el caso anterior para determinar qué método se puede utilizar con un elevado nivel de confianza se determinó la correspondencia entre los resultados obtenidos por las clasificaciones y los obtenidos por el estudio del historial del comportamiento de la estabilidad de las excavaciones durante los últimos 5 años y de la observación visual, de estos análisis para estas obras se recomienda que se puede utilizar cualquiera de las clasificaciones propuestas excepto la de Barton.

Para realizar la determinación de las clasificaciones que más se adecuan a los diferentes macizos, uno de los parámetros que se tuvo en cuenta fue que la correspondencia que existe entre los valores obtenidos por éstas y los resultados prácticos obtenidos del análisis del historial, estuviese por encima del 85%, en todos los casos.

II.9 Conclusiones

- ✓ Se hace un estudio detallado de las propiedades físico - mecánicas de las rocas, a partir de la recopilación y procesamiento de toda la información existente al respecto, teniendo en cuenta que se cumpla con el nivel de confiabilidad requerido y en los casos que se considera necesario se realiza por el autor, estudios adicionales de estas propiedades cumpliéndose con los requerimientos establecidos en el diseño de experimentos. Se determina en condiciones de laboratorios e in situ, algunas propiedades e índices que anteriormente no habían sido determinados en estos macizos (Dureza y Abrasividad).
- ✓ El estudio del agrietamiento de los macizos rocosos se debe realizar por tramos litológicos iguales, descritos en el presente trabajo, con una longitud de 9 a 25m y el método utilizado para el muestreo es la combinación del estratigráfico con el intencional y el grupal.
- ✓ Para la valoración de la bloquicidad en los macizos ofiolíticos y en el macizo de rocas sedimentarias se debe de emplear el método basado en el número de grietas y el método basado en la relación que existe entre la distancia de las grietas y para el macizo de la formación El Cobre se debe de emplear el método basado en el número de grietas.
- ✓ La valoración del grado de degradación del macizo, se realiza mediante observaciones visuales y trabajos experimentales, para valorar el comportamiento de varios parámetros que influyen en este proceso, de donde se obtiene que para los macizos ofiolíticos y el macizo de la formación el cobre deterioro se comporta entre bajo y moderado y para el macizo de rocas sedimentarias es alto.
- ✓ El comportamiento de la estabilidad para las excavaciones laboreadas en el complejo ofiolítico es de buena a mala, en correspondencia con el tramo que se analice. Por su parte las laboreadas en la formación El Cobre se clasifican de buenas cuando las rocas atravesadas sean las tobas andesíticas de color gris verdoso de grano medio y las porfiritas; en cambio cuando pasen a través de las tobas brechosas y las tobas de grano medio se clasifican de media. Para el macizo de rocas sedimentarias la estabilidad de las rocas se clasifica de media a mala.

Capítulo III

CAPITULO III. DETERMINACIÓN DEL MÉTODO MÁS ADECUADO DE ARRANQUE DE LA ROCA EN CADA MACIZO ESTUDIADO

III.1 Análisis de las clasificaciones de excavabilidad más utilizadas en la actualidad para la elección del método de arranque de la roca

Las clasificaciones de excavabilidad que más se emplean en la actualidad son: la clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden, la de Franklin, la de Kirsten, la de Romana Ruiz, la de Louis, la de Hadjigeorgiou y Scoble y la de Scoble y Muftuoglu. (Abdullatif y Crudden, 1983; Bell, 1987; Franklin, 1971, 1997; Kirsten, 1982; Louis, 1974; Romana, 1981, 1997, 1994; López, 1997, 1999).

- Clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden, basada en la utilización de los valores del índice (RMR) propuesto por Bieniawski y los valores del índice (Q) propuesto por Barton, ver figura 5.

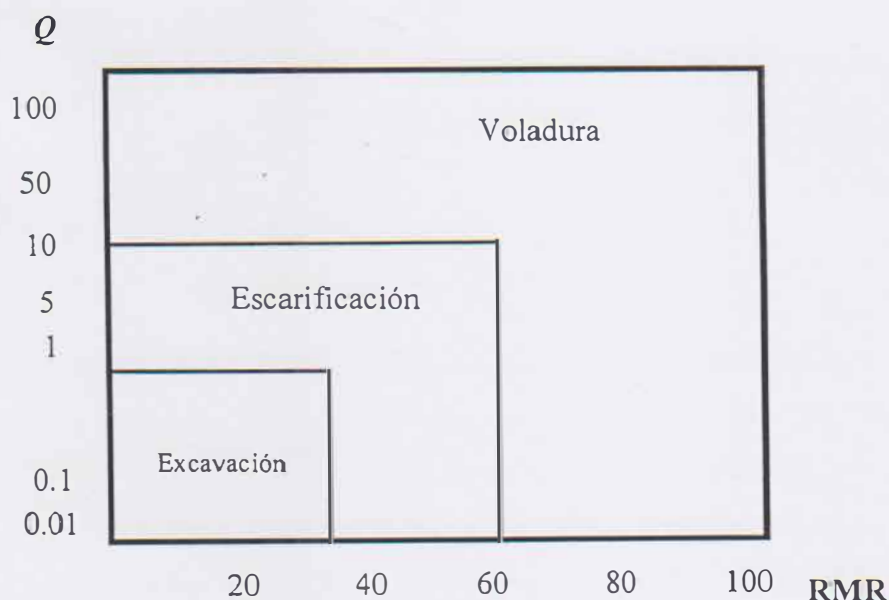


Figura 5. Clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden.

- Esta clasificación de excavabilidad independientemente que permite obtener un criterio sobre el método de arranque de la roca, tiene algunas limitaciones, las que impiden un uso más amplio en cuanto al campo de utilización: En esta clasificación se hace una valoración sobre valores estimados del RMR, para proponer el método de laboreo, no existe una correcta adecuación del sistema de

clasificación de Q a las operaciones de arranque y se propone voladura para rocas de calidad muy mala según los valores del RMR, no existiendo una correlación entre este parámetro y los valores de Q, a esto se le suma el hecho de que no se tiene en cuenta el valor de la resistencia del macizo, sino el valor de la resistencia lineal de las rocas, lo que es una limitante considerable para esta clasificación.

- Clasificación propuesta por Franklin, que se basa en los valores del espaciamiento entre las grietas (E_g) y los valores de la resistencia a la compresión simple de las rocas (R_c), ver figura 6.

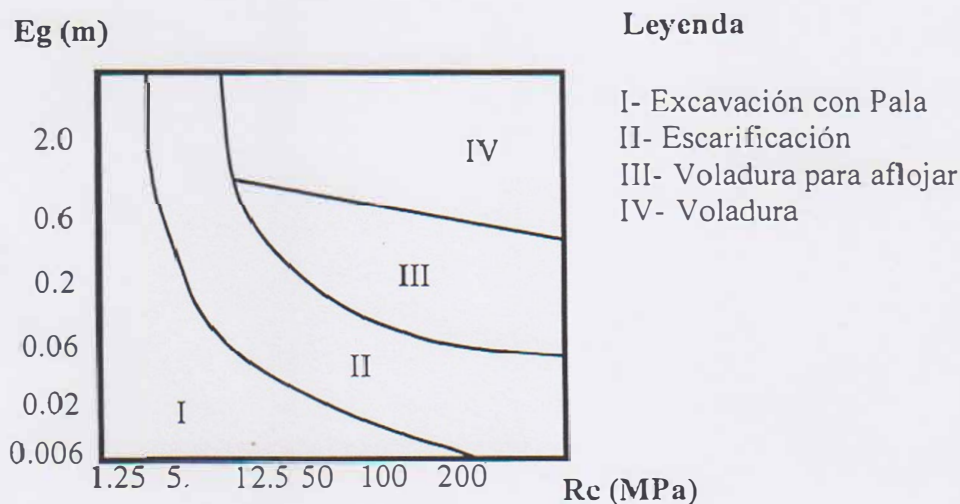


Figura 6. Clasificación propuesta por Franklin.

Esta clasificación de excavabilidad 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; Esta clasificación es muy conservadora, ya que exige voladura para rocas masivas (con RQD de 90 a 100), 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 el valor estimado de la resistencia del macizo que se ajusta más a lo real. Los valores del índice de espaciamiento entre fractura es un valor medio, que puede oscilar desde milímetros hasta metros, esto hace que los valores sean aproximados presentándose los mismos en forma de intervalos, como las escalas en ambos ejes son logarítmicas, un error de medida entre el 10 y el 20 % es prácticamente insignificante, por lo que los registros no precisan que sean muy exactos.

- Clasificación propuesta por Louis, basada en los valores del (RQD) propuesto por Deere y los valores de la resistencia a compresión simple de la roca (R_c) en (Mpa), ver figura 7.

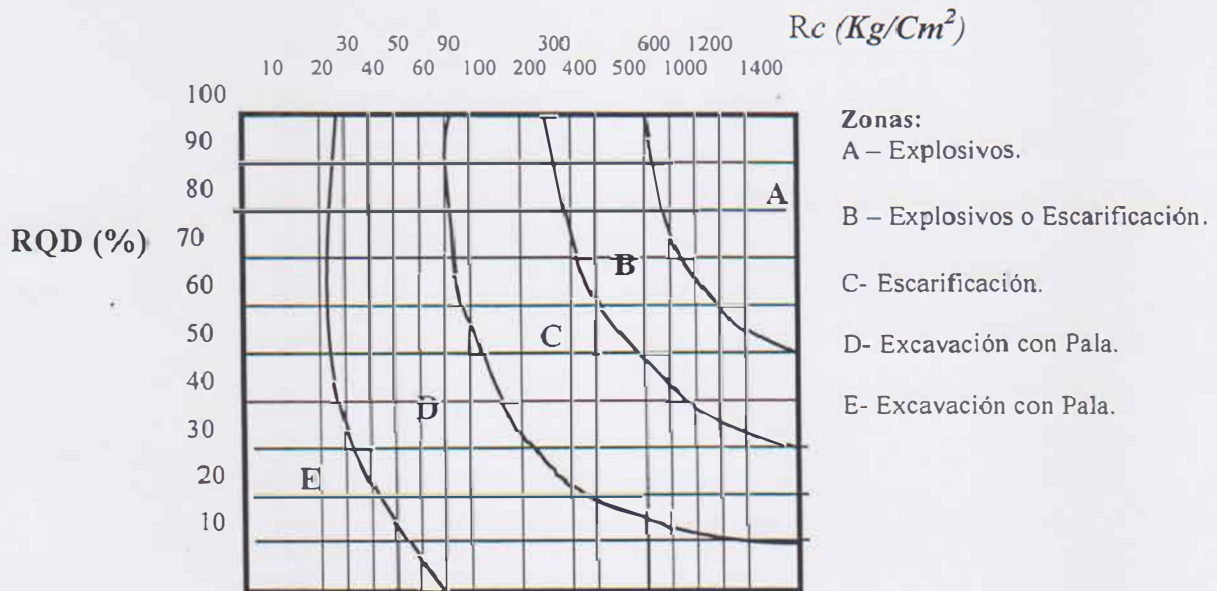


Figura 7. Clasificación propuesta por Louis.

Esta clasificación, independientemente de que el concepto en que se basa es correcto, en estos momentos su aplicación es limitada a causa del bajo límite asignado a la excavación mecánica, lo que provoca una limitación en la utilización de las capacidades tecnológicas de las maquinarias de excavación; al igual que en otras clasificaciones, se recomienda utilizar la resistencia a la compresión simple de las rocas, cuando lo correcto sería utilizar el valor de la resistencia estimada del macizo que se ajusta más a lo real, 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 valorar el campo de aplicación de estas.

- Clasificación propuesta por Kirsten, basada en la determinación de un índice de excavabilidad (N), el que se determina por la expresión que se muestra a continuación y la utilización de la tabla 8.

$$N = Rc \left(\frac{RQD}{jn} \right) \left(\frac{jr}{ja} \right) js$$

Donde: Rc - resistencia a la compresión de las rocas.

Jn - cantidad de sistemas de grietas.

Jr - rugosidad de las grietas.

Ja - grado de alteración de la roca.

Js - resistencia estructural del macizo.

Tabla 8. Clasificación propuesta por Kirsten.

Método de excavación	(N)
Escarificación fácil	1 – 10
Escarificación difícil	10 – 100
Escarificación muy difícil	100 – 1000
Prevoladura o voladura	1000 – 10 000
Voladura	> 10 000

Al igual que otras clasificaciones de excavabilidad, esta, independientemente que permite obtener un criterio sobre el método de arranque de la roca, tiene varias limitaciones: no se tiene en cuenta la dirección de ataque de la roca con respecto a la dirección de manifestación de las diaclasas, no se valora el grado de humedad de las rocas, factor este que juega un papel muy importante en el proceso de arranque y en la variación de la resistencia del macizo, fundamentalmente donde la misma se manifieste con gran intensidad, según el autor se establece que la velocidad sísmica no es un parámetro que reflejará fielmente la facilidad de arranque de las rocas, pero que sin embargo este factor permite valorar con determinado grado de exactitud las características estructurales del macizo, así como su comportamiento estructural durante el proceso de arranque.

- Clasificación propuesta por Romana Ruiz, la que se basa en los valores del (RQD) propuesto por Deere 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 8 y tabla 9.

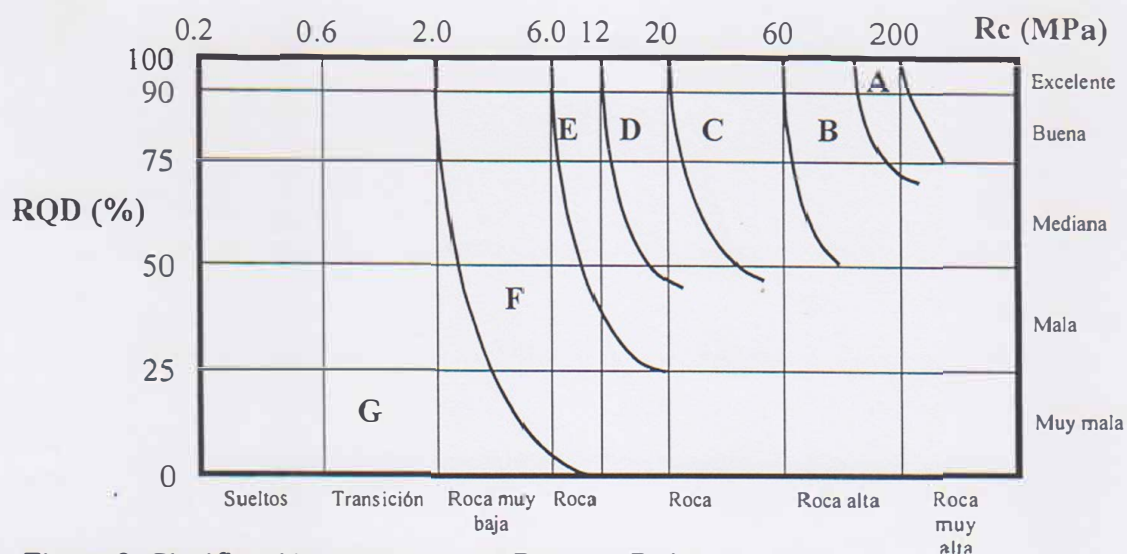


Figura 8. Clasificación propuesta por Romana Ruiz.

Tabla 9. Clasificación de los terrenos respecto a la excavabilidad.

Zonas	Topos		Rozadoras			Martillo escarificado r	Pala Trailla
	Fn > 25 tn	Fn < 25 tn	P > 80 tn	80 > P > 50 tn	50 > P > 30 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

Esta clasificación se deriva de la clasificación de Louis, y está más adaptada a las capacidades tecnológicas de las maquinarias de excavación, independientemente de esto se considera que esta clasificación tiene varios inconvenientes, los que impiden en determinado grado su empleo, para determinar por sí sola el método de arranque de la roca: Se considera que es indicativa por lo que hay que usarla con prudencia y solamente en la fase de estudios previos o anteproyectos de obras. Al igual que otras clasificaciones, esta propone utilizar los valores de la resistencia a compresión lineal de las rocas en vez del valor de la resistencia estimada del macizo que es mucho más real y no se tiene en cuenta la dirección de ataque de la roca con respecto a la dirección de manifestación de las diaclasas.

- Clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble, la que se basa en la determinación de un índice de excavabilidad del macizo rocoso, mediante la

utilización de la expresión que se muestra a continuación, el cual es utilizado en la tabla 10.

$$IE = (Is + Bs)W \times Js$$

Donde: Is - Resistencia bajo carga puntual.

Bs - Tamaño de bloque.

W - Grado de alteración del macizo rocoso.

Js - Índice de disposición estructural relativa.

Tabla 10. Valoración de la excavabilidad de los macizos rocosos en función de los valores del índice de excavabilidad propuesto por Hadjigeorgiou y Scoble.

Clases	Facilidad de excavación	Índice de excavabilidad
I	Muy fácil	Menor de 20
II	Fácil	20 – 30
III	Difícil	30 – 45
IV	Muy difícil	45 – 55
V	Voladura	Mayor de 55

Esta clasificación, se basa en la obtención de un índice de excavabilidad (IE), a partir de la combinación de cuatro parámetros geomecánicos: resistencia bajo carga puntual, tamaño de bloque, alteración y disposición estructural relativa. Al igual que las 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, no se realiza ninguna 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.

- Clasificación propuesta por Scoble y Muftuoglu, la que se basa en la determinación de un índice de excavabilidad del macizo rocoso, mediante la utilización de la expresión que se muestra a continuación, el cual es utilizado en la tabla 11.

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

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 11. Valoración de la excavabilidad de los macizos rocosos en función de los valores del índice de excavabilidad propuesto por Scoble y Muftuoglu.

Clase	Facilidad de excavación	Índice de excavabilidad
I	Muy fácil	Menor de 40
II	Fácil	40 – 50
III	Moderadamente difícil	50 – 60
IV	Difícil	60 – 70
V	Muy difícil	70 – 95
VI	Extremadamente difícil	95 – 100
VII	Marginal sin voladura	Mayor de 100

Esta clasificación, al igual que la anterior se basa en la obtención de un índice de excavabilidad (IE), a partir del análisis de cuatro parámetros que caracterizan al macizo rocoso, pero de la misma forma que las otras clasificaciones esta también tiene algunas limitaciones que dificultan su empleo: no se tiene en cuenta el coeficiente de abrasividad ni la dirección de laboreo de las excavaciones con respecto a la dirección de manifestación de las diaclasas. En el caso de rocas fuertes no se realiza ninguna propuesta del tipo de maquinaria a emplear, solamente se realiza un análisis para rocas con una facilidad de excavación moderada. Se recomienda el empleo de la resistencia a compresión lineal de las rocas y no el valor estimado del macizo que es más real y para la valoración del grado de deterioro de las rocas se recomienda realizar un estudio a partir del análisis de las paredes de las excavaciones realizadas anteriormente y en el caso de macizos vírgenes no se recomienda nada al respecto.

III. 2 Análisis de la aplicación de las clasificaciones de excavabilidad en los macizos estudiados

El empleo de las clasificaciones de excavabilidad, resulta en cualquier caso insuficiente para fundamentar la adecuada elección del método de arranque, aunque en ocasiones su empleo puede permitir obtener criterios preliminares al respecto.

A continuación se hace un análisis de los resultados obtenidos de la aplicación de estas clasificaciones en los macizos estudiados.

Macizos ofiolíticos.

Para valorar la aplicabilidad de las clasificaciones de excavabilidad se analizaron las características geo – estructurales de los macizos rocosos donde se ubican las obras objeto de estudio y que pertenecen a este tipo de macizo: mina Las Merceditas, túneles del trasvase de Mayarí, túneles populares de Holguín, túnel hidrotécnico de Las Tunas, túneles populares del municipio de Moa y la mina Amores, también se tuvo en cuenta los parámetros en los que se basa cada clasificación de excavabilidad.

- La clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden, basada en los valores de Q y del RMR, no es recomendable emplearla en este tipo de macizo rocoso, ya que una de sus limitaciones es que en esta clasificación los valores del RMR son estimados y no existe una adecuación correcta del sistema Q. Partiendo del hecho de que estos parámetros permiten en este tipo de macizo rocoso una mejor caracterización de su comportamiento geo - estructural, se considera que los valores obtenidos con esta clasificación no son valores exactos y no tienen una buena argumentación científico – técnica para este tipo de macizo, dado esto por la gran variabilidad que tienen los resultados obtenidos de estos parámetros, (lo que se debe a las características tan cambiantes de los mismos). A esto se le suma el hecho de que no se tiene en cuenta el valor estimado de la resistencia del macizo, si no el valor de la resistencia-lineal de las rocas, lo que es una limitante considerable para esta clasificación.
- Durante el análisis de la clasificación propuesta por Franklin, se obtiene que su aplicación en este macizo es muy limitada, debido a que en ella el autor propone

voladura para las rocas, a partir de valores del RQD alto y una resistencia muy baja y en este macizo estos parámetros no se comportan de esta forma, lo que se debe a que la resistencia no varía con facilidad, por el bajo índice de deterioro que presentan las rocas, además el agrietamiento, que en la mayoría de los casos es considerable, afecta los valores del RQD y se propone utilizar la resistencia de la roca, cuando lo correcto sería valorar la resistencia del macizo que es mucho más confiable.

- La clasificación propuesta por Louis, al igual que las otras clasificaciones no se puede utilizar por sí sola para determinar el método de arranque en estos macizos; En esta clasificación se propone utilizar los valores de la resistencia lineal de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados de la resistencia del macizo del macizo que son mucho más confiable y que en este caso permite valorar mejor el comportamiento real de estos durante el proceso de arranque, no se tiene en cuenta la humedad de las rocas la que en algunos sectores se manifiesta con bastante intensidad, por lo que este aspecto tiene un determinado grado de influencia en el proceso de arranque, en esta clasificación independientemente que se valora el agrietamiento del macizo, por la forma de manifestación de este y el rol que el mismo juega en el proceso se considera que el estudio realizado es insuficiente, no se realiza un análisis de las capacidades tecnológicas de las maquinarias, lo que impide en caso de que el método de arranque sea mecánico valorar el campo de aplicación de estas, y el límite para su aplicación asignado en esta clasificación es muy bajo lo que no está en correspondencia con la realidad de la tecnología ni de este macizo.
- La clasificación de excavabilidad propuesta por Kirsten tiene también algunas limitaciones que se relacionan con el comportamiento de este tipo de macizo durante el proceso de arranque de la roca y que no le permiten, por sí sola determinar con suficiente fundamentación científico – técnica, cual es el método más adecuado de arranque. Estos macizos generalmente se encuentran muy agrietados, por lo que este parámetro juega un papel muy importante en el proceso de laboreo de las excavaciones y en la determinación de la dirección de laboreo de estas, siendo este último un factor que en esta clasificación no se tiene en cuenta con un nivel de ponderación adecuado. Otro factor que limita la

aplicación de esta clasificación es que no se valora el grado de humedad de las rocas y que en algunos sectores de estos macizos la misma es considerable, además no 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 en algunos casos o sectores es posible. Independientemente de esto se considera que esta es una de las clasificaciones de excavabilidad que más se adecua a las condiciones y comportamiento de estos macizos.

- La clasificación de Romana, como ya se dijo anteriormente se deriva de la clasificación de Louis, lo que le permite estar más adaptada a las capacidades tecnológicas de las maquinarias de excavación, independientemente de esto, se considera que la misma no se puede aplicar por sí sola para elegir el método de arranque de la roca en estos macizos, por las siguientes causas: se propone utilizar los valores de resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados de la resistencia del macizo que es mucho más confiable y que permite valorar con mayor exactitud el comportamiento real de este, no se tiene en cuenta la humedad de las rocas la que en algunos sectores es considerable, por lo que va a tener determinado grado de influencia en el proceso de arranque, en esta clasificación independientemente que se valora el agrietamiento del macizo, por la forma de manifestación del mismo y el rol que este desempeña en el proceso se considera que el estudio es insuficiente. Esta clasificación se recomienda usar en la etapa previa de estudios.
- La clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble, no se puede aplicar con la suficiente confiabilidad debido a que: a pesar de tener en cuenta las características del agrietamiento en estos macizos, la que en la mayoría de los casos es muy compleja, se hace muy difícil establecer cual es la dirección correcta para el ataque de la roca, la valoración del grado de meteorización tampoco se manifiesta con claridad, lo que provoca una mayor dificultad en la valoración de este parámetro, se propone utilizar como uno de los factores básicos en esta clasificación los valores de la resistencia de las rocas bajo carga puntual, cuando lo correcto sería utilizar los valores estimados de la resistencia del macizo que son mucho más reales, en esta clasificación no se considera la capacidad tecnológica de la maquinaria que se emplea para el arranque de la roca,

que en estos momentos es muy amplia y que se puede adaptar con facilidad a estos macizos.

- La clasificación propuesta por Scoble y Muftuoglu, presenta limitaciones muy parecidas a la clasificación anterior, en este caso, teniendo en cuenta las características del macizo y los parámetros que sirven de base para su aplicación, se demuestra que esta no es aplicable a este tipo de macizo, para la determinación por sí sola del método de arranque de las rocas. En las diferentes zonas estudiadas el macizo no se manifiesta de forma estratificada, el grado de alteración se recomienda valorar en las paredes de las excavaciones, lo que en los casos analizados es muy difícil de analizar, por el hecho de que este proceso en estos macizos no se manifiesta con claridad o la magnitud con que este parámetro influye en el comportamiento de la roca es muy baja. En esta clasificación se utiliza el valor de la resistencia a la compresión simple de las rocas, sin embargo el comportamiento real en el macizo se obtiene a partir de valorar los resultados estimados de su resistencia, no se realiza una valoración detallada del agrietamiento ni de la bloquicidad, siendo estos otros de los parámetros que mayor influencia tienen en el comportamiento mecánico - estructural de este macizo.

Macizo de la formación El Cobre.

En el macizo de la formación El Cobre, para valorar la aplicabilidad de las clasificaciones de excavabilidad, se realizó un estudio en todo el sector de la mina El cobre con el objetivo de conocer su comportamiento mecánico – estructural y poder tener un criterio de valoración, que nos permitiese definir cómo se adecuan estas clasificaciones a este comportamiento.

- Durante el análisis de la clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden, basada en los valores de Q y del RMR, se obtiene que la misma presenta determinadas limitaciones por lo que no es recomendable emplearla en este tipo de macizo; Los valores de los parámetros en los que esta se basa son estimados y para este tipo de macizo estos factores varían considerablemente en correspondencia con las características del tramo analizado, por lo que se puede decir que no existe una

adecuación correcta del sistema Q, en este macizo, otros de los parámetros que mayor influencia tienen en el arranque es su resistencia y el agrietamiento y ninguno de los dos parámetros se tiene en cuenta, como cuestión básica en la clasificación, 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 geo – estructurales del macizo es evidente la posibilidad de su utilización.

- Según los análisis de la clasificación propuesta por Franklin, se obtiene que su aplicación en este macizo es muy limitada, debido a que en ella el autor propone voladura para las rocas, a partir de valores del RQD alto y una resistencia muy baja, lo que en este macizo no se comporta de esta forma, el agrietamiento en algunos sectores es muy intenso afectando considerablemente los valores del RQD, la resistencia no varía con facilidad, por el bajo índice de deterioro que presentan las rocas que lo integran, lo que implica que dichos valores se comporten entre medios y altos, en esta clasificación se utiliza el valor de la resistencia a la compresión simple de las rocas, sin embargo el comportamiento real en el macizo se obtiene a partir de valorar los resultados estimados de su resistencia.
- La clasificación propuesta por Louis tampoco se puede utilizar por si sola para determinar el método de arranque en este macizo; En ella se propone utilizar los valores de la resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados del macizo que es mucho más confiable y que en este caso permite valorar mejor el comportamiento real de este durante el proceso de arranque, no se tiene en cuenta la humedad de las rocas, la que en algunos sectores se manifiesta con bastante intensidad afectando de esta forma la resistencia del macizo, siendo este otro de los parámetros que mayor influencia tiene en el proceso de arranque de la roca, 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 valorar el campo de aplicación de estas, independientemente que el límite para su aplicación asignado en esta clasificación es muy bajo lo que no está en correspondencia con la realidad de la tecnología ni las características del macizo.

- La clasificación de excavabilidad propuesta por Kirsten tiene también algunas limitaciones, que se relacionan con el comportamiento geo – estructural de este macizo y que no le permiten, por sí sola determinar con la suficiente confiabilidad cuál es el método más adecuado de arranque. El agrietamiento en este macizo se comporta con determinado grado de intensidad en algunos sectores lo que provoca que el mismo esté muy fragmentado, esto hace que el relleno de estas grietas influya considerablemente en el proceso de arranque y en esta clasificación esto no se tiene en cuenta. Otro factor que limita la aplicación de esta clasificación es que no se valora el grado de humedad de las rocas siendo este otro de los parámetros de este macizo que mayor influencia tiene en el proceso.
- La clasificación de Romana, también presenta algunas limitaciones, lo que implica que no se pueda aplicar por sí sola para elegir el método de arranque de la roca en este macizo. Esta clasificación es indicativa y se debe usar solamente en la etapa de estudios previos, en ella se propone utilizar los valores de resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados de la resistencia del macizo que en este caso es mucho más confiable y que permite valorar con mayor exactitud el comportamiento real del macizo durante el arranque, no se tiene en cuenta la humedad de las rocas la que en algunos sectores es considerable, lo que provoca que la resistencia varíe en determinada magnitud.
- La clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble, también presenta algunas limitaciones que le impiden determinar por sí sola, con el suficiente grado de confiabilidad el método de arranque de la roca. En este macizo teniendo en cuenta las características del agrietamiento, el que se comporta con intensidad en algunos sectores y en otros no, lo que provoca que la bloquicidad sea uno de los parámetros básicos de esta clasificación y que mayor influencia tiene en el proceso de arranque, varíe considerablemente lo que atenta contra la efectividad del proceso, se propone utilizar como otro de los factores básicos en esta clasificación los valores de la resistencia de las rocas bajo carga puntual, cuando lo correcto sería utilizar los valores estimados del macizo que son mucho más reales y permiten establecer el comportamiento de este durante el arranque, por lo que se puede afirmar que los valores no son exactos.

- La clasificación propuesta por Scoble y Muftuoglu, presenta limitaciones muy parecidas a la clasificación anterior, en este caso, teniendo en cuenta las características del macizo y los parámetros que sirven de base para su aplicación, se demuestra que esta no es aplicable a este tipo de macizo, sobre todo para determinar por sí sola el método de arranque de las rocas. Este macizo no se manifiesta de forma estratificada, el grado de alteración se recomienda valorarlo en las paredes de las excavaciones, lo que es muy difícil de analizar, por el hecho de que este proceso en el macizo no se manifiesta con claridad o la magnitud con que el mismo influye en el comportamiento de la roca es muy baja. En esta clasificación se utiliza el valor de la resistencia a la compresión simple de las rocas, sin embargo el comportamiento real en este macizo se obtiene a partir de los valores estimados de la resistencia de este, no se realiza una valoración detallada del agrietamiento, siendo este otro de los parámetros que mayor influencia tiene en el comportamiento mecánico - estructural del macizo.

Macizo de rocas sedimentarias.

Para valorar la aplicabilidad de las clasificaciones de excavabilidad en este tipo de macizo, se realizó un estudio de las características geo – estructurales del mismo, el que se llevó a cabo a través del análisis de este comportamiento en varios túneles que se construyen en esta región.

- La clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden, basada en los valores de Q y del RMR, presenta algunas limitaciones por lo que no es recomendable emplearla en este tipo de macizo; En este caso uno de los parámetros que mayor influencia tiene en el arranque de la roca es la resistencia y esta no se tiene en cuenta como cuestión básica en la clasificación, 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 geo – estructurales del macizo es muy evidente su utilización, 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 geo – estructural y por consiguiente en el proceso de arranque.

- Según los análisis de la clasificación propuesta por Franklin, se obtiene que su aplicación en este macizo es muy limitada, debido a que en ella no 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 geo – estructurales del macizo es muy evidente, además no se tiene en cuenta la estratificación del macizo, la bloquicidad, la humedad, ni el grado de deterioro de las rocas, siendo estos los elementos que mayor influencia tienen en el comportamiento geo – estructural y por consiguiente en el proceso de arranque, se propone utilizar los valores de resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados de resistencia del macizo, que es mucho más confiable y que permite valorar con mayor exactitud el comportamiento estructural del macizo.
- Al igual que la anterior clasificación, la propuesta de Louis tampoco se puede utilizar por si sola para determinar el método de arranque en este macizo; Se propone utilizar los valores de la resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados del macizo que es mucho más confiable y que en este caso permite valorar con mayor exactitud el comportamiento de este durante el proceso de arranque, no se tiene en cuenta la humedad de las rocas, la que en algunos sectores se manifiesta con bastante intensidad afectando de esta forma la resistencia del macizo, no se realiza una valoración de la estratificación, la bloquicidad ni el grado de deterioro, que son los parámetros que realmente controlan el comportamiento de este macizo y no 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 geo – estructurales del macizo es muy evidente.
- La clasificación de excavabilidad propuesta por Kirsten tiene también algunas limitaciones, que se relacionan con el comportamiento geo – estructural de este macizo y que no le permiten, por sí sola determinar con la suficiente fundamentación científica cuál es el método más adecuado de arranque; No se valora el 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 geo – estructural y por consiguiente en 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 geo – estructurales del macizo es muy evidente.

- La clasificación de Romana, presenta algunas limitaciones, lo que implica que no se puede aplicar por sí sola para elegir el método de arranque de la roca en este macizo. Esta clasificación es indicativa y se debe de usar solamente en la etapa de estudios previos, se propone utilizar los valores de resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados de la resistencia del macizo que en este caso es mucho más confiable y que permite valorar con mayor exactitud el comportamiento real de este, no se tiene en cuenta la humedad de las rocas la que en algunos sectores es considerable, lo que provoca que la resistencia varíe en determinada magnitud, por lo que este es otro de los parámetros de este macizo que influye en el proceso, no se realiza una valoración de la estratificación del macizo, su bloquicidad ni grado de deterioro, que son parámetros que realmente controlan el comportamiento de este.
- La clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble, presenta algunas limitaciones que le impiden determinar por sí sola con la suficiente argumentación el método de arranque de la roca. En este caso uno de los parámetros que mayor influencia tiene en el arranque es la resistencia del macizo y en esta clasificación no se tiene en cuenta como uno de los elementos básicos. En cambio se propone el empleo de la resistencia de la roca que permite obtener valores aproximados, no 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 geo – estructurales del macizo es muy evidente, no se tiene en cuenta la estratificación del macizo que es el parámetro que mayor influencia tiene en el comportamiento geo – estructural y por consiguiente en el proceso de arranque.
- La clasificación propuesta por Scoble y Muftuoglu, presenta limitaciones muy parecidas a la clasificación anterior, que impiden que la misma pueda ser

aplicable en este tipo de macizo, para determinar por sí sola el método de arranque. No se valora el grado de humedad de las rocas el que afecta considerablemente las características de resistencia del macizo, no se tiene en cuenta dentro de sus parámetros básicos la bloquicidad ni la dirección de los principales sistemas de diaclasas, siendo estos algunos de los elementos que mayor influencia tienen en el comportamiento geo – estructural y por consiguiente en 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 geo – estructurales del macizo es muy evidente. En esta clasificación se utiliza el valor de la resistencia a la compresión simple de las rocas, sin embargo el comportamiento real en este macizo se obtiene a partir de los valores estimados de este.

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis realizados anteriormente, para determinar cuales son las clasificaciones de excavabilidad que más se adecuan a las características de cada uno de los macizos estudiados y poder contribuir con ello a la adecuada elección del método de arranque de las rocas en cada caso, se hace un estudio del historial sobre la efectividad de los métodos de arranque empleados en estas obras durante 5 años, se tiene en cuenta las condiciones geo - estructurales de los macizos y la correspondencia de estas condiciones con los parámetros que sirven de base para el empleo de cada una de las clasificaciones de excavabilidad.

Del análisis de los parámetros en que se basan las clasificaciones de excavabilidad y de las características geo – estructurales de los macizos ofiolíticos, que influyen de manera significativas en el proceso de arranque de la roca, se obtiene que estos se caracterizan por estar conformados por bloques de diferentes dimensiones, formas y disposición con respecto a la dirección de arranque. En estos macizos el agrietamiento está caracterizado por la existencia de varios sistemas de grietas principales más algunas grietas complementarias. Las grietas se caracterizan por ser ligeramente rugosas, generalmente limpias o están rellenas con material de meteorización, conjuntamente con esto aparecen además algunas fallas, fracturas y fisuras que en su conjunto hacen que algunos tramos estén muy fracturados y otros no, lo que puede afectar de manera decisiva el rendimiento en el proceso de arranque.

Por todo lo anteriormente expresado, se recomienda que para estos macizos las clasificaciones de excavabilidad que más se adecuan a sus condiciones y que permiten obtener un criterio preliminar sobre la elección del método de arranque de la roca son: la clasificación de excavabilidad propuesta por Kirsten y la propuesta por Louis, teniendo en cuenta las sugerencias hechas por el autor.

Para el macizo de la formación El Cobre, las clasificaciones que más se adecuan son: la de Kirsten y la de Hadjigeorgiou y Scoble, esto se obtiene a partir del análisis de los resultados obtenidos por los métodos empleados en la práctica, así como su efectividad en las obras que se construyen en este macizo, las características mecánico – estructurales y el análisis de los parámetros en los que se basan estas clasificaciones.

Este macizo está constituido en algunos sectores por bloques de diferentes dimensiones, formas y disposición con respecto a la dirección de arranque de la roca y en otros tramos se comporta como un macizo monolítico, el agrietamiento está caracterizado por la existencia de varios sistemas de grietas principales más algunas grietas complementarias, estas grietas se caracterizan por ser ligeramente rugosas, generalmente son limpias o están rellenas con material de meteorización, conjuntamente con esto aparecen además algunas fallas, fracturas y fisuras. También se determinó la resistencia de las rocas bajo carga puntual en condiciones naturales y el grado de alteración del macizo, donde se obtiene que el mismo es moderado, lo que hace que las características estructurales sean muy cambiantes, siendo estos aspectos tenidos en cuenta en las clasificaciones de excavabilidad propuestas y que afectan de manera decisiva el rendimiento en el proceso de arranque de la roca.

En el caso del macizo de rocas sedimentarias las clasificaciones que permiten obtener criterios orientativos sobre la elección del método de arranque son: la clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble y la de Scoble y Muftuoglu, aquí se realizó el mismo proceso que para los macizos analizados anteriormente. Se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos por los métodos empleados en la práctica, así como su efectividad en las obras que se construyen en este macizo y el análisis de las características mecánico – estructurales del mismo. Atendiendo a esto último, según los análisis realizados se obtiene que este macizo está estratificado, lográndose con esto que se pueda medir la potencia de los estratos, aquí aparecen varios sistemas de grietas principales con distancia entre ellas bien definida, caracterizándose por ser entre lisas y rugosas, generalmente están rellenas

con material de meteorización, también pueden aparecer algunas grietas complementarias, algunas fracturas y fisuras que en su conjunto hacen que algunos sectores estén muy fracturados, el grado de alteración de las rocas es muy alto, lo que hace que los índices de resistencia en condiciones naturales disminuyan considerablemente, en este macizo aparecen bloques de diferentes dimensiones, formas y disposición con respecto a la dirección de arranque de la roca, que conjuntamente con otros parámetros afectan de manera decisiva el rendimiento en el proceso. Todo esto permite conocer el comportamiento de este macizo y son los parámetros en los cuales se basan las clasificaciones de excavabilidad propuestas.

III. 3 Indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones horizontales de pequeña y mediana sección

A partir de los estudios realizados y los resultados obtenidos, se propone un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilitan con su empleo lograr una correcta fundamentación en la elección del método de arranque de la roca.

Estas indicaciones se pueden resumir en lo siguiente:

1. Análisis de las características ingeniero- técnicas de la obra.
2. Caracterización geomecánica del macizo.
3. Determinación del grado de bloquicidad del macizo.
4. Evaluación de la estabilidad del macizo.

1. Análisis de las características ingeniero - técnicas de la obra.

La valoración de las características ingeniero – técnicas de la obra, se debe realizar con el objetivo de conocer los diferentes factores que influyen en el proceso de arranque de la roca.

Se debe analizar la forma y dimensiones de la sección de la excavación, para poder determinar las características de los instrumentos de corte de la maquinaria de excavación, de forma tal que estos se adecuen a estas secciones, en el caso de que el proceso se realice con métodos mecánicos; si lo que se usa es voladura, esto permite valorar la correcta ubicación de los barrenos según el contorno deseado, se puede valorar la profundidad de

los barrenos y además determinar qué correspondencia existe entre el tamaño de las excavaciones y el tamaño de los bloques; se debe valorar la profundidad y lugar de ubicación de la excavación en el macizo, lo que permite tener en cuenta la influencia de las direcciones de los principales sistemas de diaclasas, en la dirección de laboreo de esta, pudiéndose definir con esto, el lugar más adecuado.

Realizar un análisis para conocer el grado de influencia de excavaciones vecinas ó de obras de superficie, en caso de que estas existan, para conocer el comportamiento del macizo y por consiguiente de las excavaciones que se vayan a laborear.

Otros de los aspectos que hay que tener en cuenta es conocer los tipos de macizos que atraviesa la excavación, para poder realizar un análisis que permita valorar cómo influyen las características de estos en el proceso de arranque y cómo los diferentes métodos de excavación se adecuan a estas características, de forma tal que se pueda utilizar el método más adecuado de arranque de la roca.

2. Caracterización geomecánica del macizo.

Para ello se deben ponderar más las propiedades y características que influyen en la definición del método de arranque a emplear, dentro de las que tenemos:

✓ Valoración de las características geológicas e hidrogeológicas del macizo.

Para valorar las características geológicas del macizo, se debe hacer un estudio o evaluación de la región, que permita conocer el origen o génesis de este, los afloramientos o diferentes tipos de rocas que lo integran, las diferentes estructuras, los elementos de yacencia de estas estructuras, realizar un análisis de los fósiles para conocer la edad de las rocas y las características de estas.

En cuanto a las características hidrogeológicas, hay que conocer: Las principales direcciones de movimiento de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, la profundidad de estas y su gradiente, la cantidad de horizontes acuíferos, sus características y conocer si se comunican entre sí, además el tipo de roca donde se forman estos acuíferos.

✓ **Determinación y valoración de las propiedades físico – mecánicas de las rocas.**

La valoración de las propiedades físico – mecánica de las rocas, se realiza a partir de su determinación haciendo énfasis en aquellas que sean de mayor interés o necesario su conocimiento para llevar a cabo la investigación. Para ello se debe realizar el análisis de los trabajos realizados en macizos similares y en el caso de que las propiedades sean determinadas por el propio investigador, se debe realizar la toma de muestras a partir de un estudio para la determinación del número de muestras que hay que tomar en condiciones naturales y que se establece en el diseño de experimentos, posteriormente se determinarán las propiedades, mediante ensayos de laboratorio o en condiciones naturales (in situ). La determinación de las propiedades se debe realizar cumpliendo rigurosamente los requisitos de las diferentes metodologías existentes al respecto y en los laboratorios que reúnan las condiciones exigidas, todo esto con el objetivo de obtener los resultados con el grado de confiabilidad requerido.

En este aspecto se considera que se debe prestar fundamental interés a las siguientes propiedades: Resistencia del macizo, abrasividad, dureza, fortaleza, porosidad y presencia de agua en las rocas.

✓ **Análisis del comportamiento mecánico – estructural del macizo.**

Se debe realizar una valoración de los aspectos que caracterizan el agrietamiento y que mayor influencia tienen en el proceso de arranque de la roca (Cantidad de sistemas de diaclasas, distancia entre las diaclasas, su ancho, relleno y características de este, dirección de los principales sistemas, así como la existencia de grietas complementarias), este análisis se puede realizar a partir de la utilización del método geológico en excavaciones de exploración, con el análisis de muestras de sondeo, con el empleo de los métodos geofísicos u otro de los métodos empleados al efecto.

En caso de que el método empleado sea el geológico, el macizo se debe dividir en tramos con características litológicas similares de 10 a 25m de longitud, logrando con esto una elevada representatividad en el estudio, aquí se debe realizar un análisis de todos los parámetros que caracterizan al agrietamiento y que influyen en el proceso de arranque. Si el método empleado es el geofísico, se debe realizar un análisis que permita determinar cuales son las zonas de mayor o menor agrietamiento dentro de un área determinada.

Generalmente los métodos geofísicos que más se emplean son los sísmicos y fundamentalmente la variante de reflexión y refracción. Este consiste en que en una zona determinada se realiza una excitación y se mide cómo varía la velocidad de las ondas longitudinales y transversales, a partir de lo cual se valora el agrietamiento. Cuando se emplean los testigos de sondeo, se debe realizar una elección muy cuidadosa del testigo, mediante el cual se determinan los diferentes sistemas de grietas así como la distancia entre ellas, de forma tal que no se cofundan las grietas relacionadas con la génesis del macizo y las originadas por el proceso de perforación. Este método tiene el inconveniente que no se pueden determinar las direcciones de los principales sistemas de grietas.

Para complementar también el análisis del comportamiento mecánico – estructural del macizo se debe realizar un estudio de sus características de resistencia, cómo se pronostican estas y la construcción y valoración del pasaporte de resistencia.

3. Determinación del grado de bloquicidad del macizo.

Para la determinación de la bloquicidad del macizo, se deben analizar los diferentes métodos existentes al respecto y utilizar aquellos que más se adecuan a las características geo - estructurales del macizo estudiado. Para lograr esto se debe hacer un estudio detallado del agrietamiento del macizo, ya que el mismo en la mayoría de los casos constituye la base para valorar la bloquicidad, se debe analizar también la disposición estructural de los bloques y su influencia en el proceso de arranque de las rocas.

Dentro de los métodos que se deben emplear están: El método para determinar el volumen del bloque a partir de la frecuencia de las grietas (N_a), este se basa en analizar un área de observación, tiene en cuenta también la longitud de las grietas y su correspondencia con el área de observación. El método para determinar el volumen del bloque a partir del número de grietas por m^3 , este se basa en la distancia de las grietas de cada familia y el número de grietas aleatorias. El método para la clasificación del volumen de los bloques relacionado con el tamaño de la partícula (método de Palmstrom) y se debe determinar el tipo y forma de los bloques teniendo en cuenta la distancia entre las grietas de cada familia.

4. Evaluación de la estabilidad del macizo.

La estabilidad del macizo se puede evaluar por diferentes vías a partir de las condiciones mecánico y geo - estructurales del macizo y del equipamiento con que se cuente para ello.

Para tal fin se pueden emplear algunas de las denominadas clasificaciones geomecánicas, como la de Bieniawski, Barton, Palmstrøm, Laubescher y Bulichev, entre otras, también pueden ser utilizados criterios basados en los desplazamientos que sufre el macizo o en la formación de zonas de rocas destruidas alrededor de las excavaciones. En todos los casos se deben evaluar los métodos que se empleen y realizar el análisis estadístico de los resultados obtenidos con estos.

Para el análisis de la estabilidad se debe dividir el macizo en tramos con similitud en cuanto a sus características litológicas, expresando de esta forma los resultados de la estabilidad para cada uno de los tramos analizados. Para el caso de que en la zona de estudio existan excavaciones subterráneas, el análisis se puede realizar tanto por la evaluación de la estabilidad de estas obras ó el análisis de los testigos de sondeo. Cuando se utilizan las excavaciones existentes se debe prestar una especial atención a la valoración del grado de deterioro de las rocas de forma tal que se pueda tener un criterio del nivel de afectación que experimenta la estabilidad del macizo por este factor. También hay que tener en cuenta que en el tramo analizado si existen inclusiones de otros tipos de rocas esto puede influir en la estabilidad. Cuando el análisis se realiza mediante testigos de sondeo hay que tener en cuenta que el número de parámetros que se pueden evaluar es muy limitado y que existen otros, que no se pueden valorar por este método y que influyen de manera decisiva en la estabilidad, por lo que se estima que por esta vía los resultados obtenidos no son muy confiables.

III.4 Impacto socio – económico

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten fundamentar de forma adecuada y con suficiente rigor científico – técnico la elección del método de arranque de la roca durante el laboreo de excavaciones horizontales, lo que sin duda tiene un significativo impacto socio – económico.

En la actualidad, en nuestro país, en muchos casos se emplea, a priori, el método de voladura para el arranque de la roca, en condiciones, en que puede emplearse otra opción, lo que trae consigo un peor contorneado de la excavación, una mayor afectación a la integridad del macizo y condiciones más difíciles para el sostenimiento que se emplee. Todo esto conduce al aumento de los costos y una disminución en el nivel de confianza del personal que labora o se protege en estas obras.

Otro aspecto a tener en cuenta es que para poder implementar las indicaciones metodológicas propuestas, surge la necesidad de elevar el nivel de los recursos humanos. En los resultados de este trabajo se introducen elementos que no son del dominio del personal que está vinculado directamente a la producción, por lo que este debe ser capacitado.

El trabajo representa una continuidad al conocimiento, por el hecho de que aporta un grupo de indicaciones metodológicas, que permiten determinar el método de arranque en otros macizos con similitud en sus características. En nuestro país aún queda una gran cantidad de obras que no han sido analizadas pero que presentan un determinado grado de semejanza, en cuanto a la geología, geomecánica, condiciones constructivas, entre otras, lo que permitiría el empleo en ellas de estas indicaciones.

Con el empleo de los resultados del presente trabajo, se puede lograr una disminución en el volumen de material rocoso a depositar en las escombreras. Una parte considerable del estéril es producido por el proceso de arranque de las rocas y otra parte, aproximadamente el 40% de los desechos rocosos, es generado por los derrumbes que se originan por la alteración del estado tensional del macizo durante los trabajos de construcción de las excavaciones subterráneas.

III.5 Conclusiones

- ✓ Se hace una valoración crítica de las clasificaciones de excavabilidad más conocidas, donde se fundamentan sus insuficiencias, que limitan su empleo, para que por sí solas, puedan ser empleadas para elegir en forma fundamentada el método de arranque de la roca.

- ✓ Se define, para cada tipo de macizo rocoso y obras estudiadas, cuáles de estas clasificaciones de excavabilidad, son factibles de empleo en el marco de contribuir a una adecuada elección del método de arranque de la roca.
- ✓ Se propone un sistema de indicaciones metodológicas que permiten garantizar una adecuada y fundamentada elección del método de arranque de la roca.

Conclusiones

CONCLUSIONES

- ✓ Se define para cada tipo de macizo rocoso estudiado, cuáles son los métodos para determinar la bloquicidad que se debe emplear: Para macizos ofiolíticos y macizos de rocas sedimentarias, se debe emplear el método basado en el número de grietas y el método basado en la relación entre la distancia entre grietas y para el macizo de la formación El Cobre, el método basado en el número de grietas.
- ✓ Se valora la estabilidad de los macizos por varios métodos y se define estadísticamente a partir de los resultados obtenidos, cual método es el más adecuado en cada caso: Para el macizo ofiolítico, el método de Bieniawski, para el macizo de la formación El cobre, el método de Bieniawski, el de Bulichev y el de Barton y para el macizo de rocas sedimentarias, el método de Bieniawski y el de Bulichev.
- ✓ Se fundamenta el hecho de que ninguna de las clasificaciones de excavabilidad existentes, por sí sola, permite elegir en forma adecuada y fundamentada el método de arranque de la roca, no obstante se estima que ellas pueden ser utilizadas en estudios que se hagan con ese objetivo. Por ello se define cuáles de estas clasificaciones son factibles de usar en cada tipo de macizo rocoso estudiado.
- ✓ Se propone un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilita con su empleo, lograr una correcta fundamentación en la elección del método de arranque de la roca.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

- ✓ Aplicar el sistema de indicaciones metodológicas obtenido, para realizar la elección del método más adecuado de arranque de la roca durante el laboreo de excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección en el resto del país.
- ✓ Valorar el desarrollo de un trabajo similar, pero orientado a los trabajos en canteras.

Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Abalos, B.**, Aplicación de la función de la autocorrelación al análisis estructural de los medios fisurados. Boletín Geológico y Minero. Mayo – Junio. Pág 19, 106 (3), 1995.
2. **Abdullatif, O. M y Crudden, D. M.**, The relationship between Rock Mass Quality and ease of excavation. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. No 28. 1983.
3. **Acosta Betancourt, R. J.**, Estudio de los parámetros que influyen en la ubicación de los objetivos económicos y sociales en los túneles populares de la ciudad de Holguín. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 1996.
4. **Adamovich, A. Chejovich, V.**, Principales Características de la geología y los minerales útiles de la región norte de la Provincia Oriente. Revista tecnológica, Vol 2, No. 1. (4- 20p). 1992.
5. **Alfaro. S. J. M.**, Aplicación de nuevas técnicas en el estudio ingeniero geológico de los macizos rocosos. Memorias “Primer Simposio Internacional la Geodesia y la Geomecánica Aplicada a la construcción: Ciudad de la Habana. Cuba. 19 – 28p. 2000.
6. **Ayala, C. F. J.**, Manual de ingeniería de taludes: Instituto Tecnológico Geominero de España. 1991.
7. **Almaguer, Carmenate. Y.**, Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentinitico de Moa. Tesis de maestría. ISMMANJ. 2001.
8. **Barrabí, D. H. Y otros.**, Informe para la exploración detallada de las reservas subterráneas del yacimiento El Cobre. Empresa Minera de Cobre, Santiago de Cuba. Julio.1994.
9. **Barton, N, R.**, A model study or rock Joint deformation. International Journal of rock Mechanic Geomechanics Abstracts. Vol 9, No. 5, Septiembre. 1972.
10. **Barton, N, R.**, A relationship between of rock joints. International Rock Mechanical, Vol 13. 1976.

11. **Barton, N, R y otros.**, Strength, deformation and conductivity coupling of rock joint, Vol 22. International Rock Mechanical, 1985.
12. **Barton, N; Lien, R; Lunde, J.**, Engineering classification of rocks massea for the desing of tunnel support. Rock Mechanics, Springer verlag, vol.6: 189 – 236pp.1974.
13. **Barton, N.**, Scale effects or sampling bias. Proc in Workshop Scale Effects in Rock Masses, 31 – 55. Rotterdam Balkema. 1990.
14. **Barton, N, R y Choubey.**, A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Ed. E. Brooch. 1974.
15. **Bell, F. G.**, Ground engineers reference bock. Ed. Butterworths. Londres. Chap. 39. “open excavation”. 1987.
16. **Bieniawski, Z. T.**, Stability concept of brittle fracture propagation in rock in rock. Engineering geology and international journal (Amsterdam) 2(3): 149 – 162p, December. 1967.
17. **Bieniawski. Z. T.**, Geomechanics classification of rock masses and its application to tunnelling. Proc. II. Tnt. Congress for Rock Mechanic. ISMR. Vol II. 1979.
18. **Blaisdell, Z. T.**, Statistics in practice. Saunders Collage Publishing. New York. 653p. 1992.
19. **Blanco, T. R.**, Mecánica de rocas: Oriente, Santiago de Cuba.1981.
20. **Blanco, T. R.**, Elaboración de los principales criterios para garantizar el empleo de los espacios subterráneos después de concluida su explotación en las condiciones de Cuba. Tesis Doctoral. 1986.
21. **Blanco, T. R y E. Rodríguez.**, Características de formación de rocas destruidas en el techo de las excavaciones. Revista Minería y geología. No 2, Cuba. 1988.
22. **Blanco, T. R.**, Estudio de la estabilidad y la presión minera en las excavaciones subterráneas: Universidad Nacional de Loja, Ecuador. 1993.
23. **Blanco, T. R y otros**, Informes Ingeniero – Geológicos y valoración de estabilidad de los túneles populares del municipio de Moa. Estado Mayor Municipal de la Defensa Civil – Moa, 1997.

24. **Blanco, T. R.**, Elementos de la mecánica de los medios rocosos: Félix Varela, La Habana, 1998.
25. **Blanco, T. R y otros.**, Valoración de la estabilidad de las excavaciones a partir del criterio de formación y dimensiones de una zona de deformación inelástica en su contorno: Centro nacional de informaciones geológicas. Instituto de Geología y Paleontología. Memorias III Congreso Cubano de Geología y Minería. La Habana. Cuba. 57 – 60p.1998.
26. **Blanco, T. R y Cartaya, P. M.**, Estimación de la resistencia de las rocas. Minería y Geología(Moa). No. 1. 2000.
27. **Bluman, A.**, Elementary statistics a step by step approach. Wm. C. Brown publishers. Washington. 713p. 1998.
28. **Borisov. A .A.**, Mecánica de rocas y de los macizos: Niedra, Moscú. 1986.
29. **Bulichev. N. S.**, Mecánica de obras subterráneas: Niedra, Moscú. 1982.
30. **Cartaya, P. M.**, Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina Las Merceditas. Tesis de Maestría. ISMMANJ. 1996.
31. **Cartaya, P. M y Blanco, T. R.**, Modelos geomecánicos del macizo rocoso en la mina de cromo Las Merceditas. Minería y Geología (Moa). XVI (2): 47 – 52, 1999.
32. **Cartaya, P. M y Blanco, T. R.**, Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de algunas minas y túneles subterráneos de la región Oriental del país: Memorias “Primer Simposio Internacional la Geodesia y la Geomecánica Aplicadas a la Construcción”: Ciudad de la Habana. Cuba. 122 – 130p. 2000.
33. **Cartaya, P. M.**, Caracterización geomecánica de macizos rocosos de la región Oriental de Cuba. Tesis Doctoral. ISMMANJ. 2001.
34. **Cassongo , A. S.**, Criterio para la evaluación de la estabilidad del macizo rocoso en la mina Las Merceditas. Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 2000.
35. **Castillo, González. J; I , Mundi. M.**, Estudio geólogo – tectónico de la región de Moa. Trabajo de Diploma, ISMMANJ.1993.
36. **Castro. O.**, Mecánica de rocas aplicada a la construcción: Científico Técnica, La Habana. 1989.

37. **Colectivo de autores.**, Informe ingeniero - geológico, Tránsito Este - oeste (Melones - Sabanilla): Túnel Seborquito - Esperanza. ENIA - Holguín, Junio, 1991.
38. **Colectivo de autores.**, Informe ingeniero - geológico, Tránsito Este - oeste (Melones - Sabanilla): Túnel Guaro - Manacal. Empresa de Proyectos e Investigaciones del MINFAR (E. C. M. No 2) Holguín, 1992.
39. **Colectivo de autores.**, Informe Ingeniero - Geológico. mina Las Merceditas. Moa. Cuba, 1996.
40. **Colectivo de autores.**, Informe geológico Mina Amores. 1997.
41. **Colectivo de autores.**, Informes Ingeniero - Geológicos de los túneles populares del municipio Holguín. Estado Mayor Provincial de la defensa Civil - Holguín, 1998.
42. **Correoso, C. A.**, Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la mina Amores. Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 1997.
43. **Cornejo, L.**, Excavación mecánica de túneles. Ed. Rueda, Madrid. Apéndice III. 1988.
44. **Cotilla, R. M; O, Bankwitz y otros.**, Cinemática Neotectónica de Cuba Oriental Rev. Soc. Geológica de España, 11 (1 - 2): 33 - 42. 1998.
45. **Cruzata. A y otros.**, Tránsito Caney - Gilbert. Informe ingeniero - geológico regional básico. Escala 1:1 0000. Unidad Básica de Proyectos e Investigaciones del MINFAR - Mayarí - Holguín (E.C.M.No 2 y 15). 1992.
46. **Cuesta, R. A.**, Impermeabilización de obras subterráneas. Tesis de Maestría. ISMMANJ, Moa. 1997.
47. **Deere, D.**, Indexing Rock machine tunnelling. Proc of tunnel and Shaft. Conf. Minneapolis. 1979.
48. **Dines, Da Gamas. C.**, Evaluación de los daños a los macizos rocosos provocados por la voladura en túneles. Ingeotúneles. Madrid. Entorno Gráfico, S. L. 231 - 249p. 1998.

49. **Estefanía, P. S.**, Túneles hidrotécnicos. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 345 – 369p. 1998.
50. **Falero, S. F.**, Geometría del agrietamiento del macizo rocoso de mina Las Merceditas y su estabilidad. Tesis de Maestría. ISMMANJ. 1996.
51. **Franklin, J. A.**, Logging the mechanical character of rock. Trans. Inst. Min. Metall, No 80. Section A. Mining Industry, A 1- 9. 1971.
52. **Franklin, J. A.**, Rock Quality in Relation of the Quarring and Performance. 2do International Congress of the international association of Engineering Geology. Sao Paulo. Brasil. 1974.
53. **Franklin, J. A.**, Rock engineering. Ed. Mc G Hill Canada. 578p. 1994.
54. **Franklin, J. A.**, The monitoring of structures of rock. International journal or Rock Mechanic Geomechanics Abstracts. Vol 14, No.4, Julio. 1997.
55. **Freud, J.; Simon, G.**, Modern elementary statistics. Prentice Hall. 8^{va} edición. New Jersey. 578p. 1992.
56. **Furrazola. B. G y K. Núñez.**, Estudios sobre geología de Cuba: Instituto de Geología y Paleontología. Ciudad de la Habana, 527p. 1997.
57. **González de Vallejo. L.**, Las clasificaciones geomecánicas para túneles. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T- I, 25 – 66p. 1998.
58. **González. N.**, Caracterización del agrietamiento en la Mina Las Merceditas. Trabajo de Diploma. Cuba. 1995.
59. **Guillermo, A. R.**, Criterios para el diseño de la cámaras y pilares en la mina Las Merceditas. Tesis de maestría. ISMM, Departamento de Minería. 1998.
60. **Gullón, Buceta. A.**, La calidad en obras subterráneas. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 397 – 416p. 1999.
61. **Guardado, L. R.**, Ingeniería geológica e ingeniería petrológica: Pueblo y Educación _ Habana, 348p. 1986.
62. **Gutiérrez, G. L.**, Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de las minas las Merceditas y Amores. Trabajo de Diploma. ISMM. 1996.

63. **Hadjigeorgiou, J y Scoble, M.**, Ground Characterization for assessment of ease of excavation. Mine Planing and equipment Selection. Calgary, Canadá. 1990.
64. **Hidalgo, H. A y otros.**, Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste(Melones - sabanilla): Túnel En medio – Guayabo. INRH – Holguín, Junio, 1991.
65. **Hidalgo, N. E.**, Propuesta de utilización del espacio subterráneo con fines económicos y sociales en la ciudad de Holguín, Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 1996.
66. **Hoek, E and Brown, E. T.**, Underground Excavations in rock- London: The Institution of mining and Metallurgy, 527p. 1980.
67. **Hoek, E and Brown, E.T.**, Empirical strength criterious for rock masses. Geotechnical Engineering, 1003 – 1035p, 1988.
68. **Hoek, E and Brown, E.T.**, Practical estimates of rock mass strength. Mining of Rock Mechanic, London, 1999.
69. **Hoek, E. Kaiser, P. K and Bawder, W.F.**, Support of underground excavations in hard Rock: A, Balkema Rotterdam, 1995.
70. **Iturralde – Vinent, M.**, Estratigrafía de la zona de calabaza ochotal, Mayarí Arriba. Revista La Minería y la Geología en Cuba. Parte I (5): 9-23. Parte II: (6): 32 – 40. 1976 – 1978.
71. **Iturralde - Vinent, M.**, Las ofiolitas en la constitución geológica de Cuba. Revista Ciencia de la Tierra y El Espacio. (17) 8 – 26. 1990.
72. **Joao, P. A.**, Caracterización mecánico – estructural del macizo rocoso de la mina subterránea “El Cobre”, Santiago de Cuba. Trabajo de Diploma. ISMMANJ, 1998.
73. **Kilic. R.**, Geomechanical Properties of the ofiolites and alteration degree of diabase. Bulletin of international association of engineering geology. April, 51, 63 – 71p, 1995.
74. **Kirsten, H. A. D.**, A classification system for excavation in natural materials. Civ. Eng. S. Africa. July, 1982.

75. **Larosi, H. M. Alf.**, Determinación del método de arranque más eficiente para el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales en el macizo rocoso de la mina Amores. Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 1997.
76. **Lineu. D. A.**, La mecánica de las rocas como herramienta indispensable en los proyectos mineros. Memorias " Primer Simposio Internacional de la Geodesia y la Geomecánica. Aplicadas a la Construcción: Ciudad de la Habana. Cuba. 112 – 121p. 2000.
77. **Llorente. E y otros.**, Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Canal Bitirí - Sabanilla. INRH – Holguín, Junio, 1991.
78. **López Jimeno, C.**, Manual de túneles y obras subterráneas. Graficas Arias Montano. S. A. ETSIM. MOSTOLE. Madrid. 1997.
79. **López Jimeno, C.**, Ingeo túneles (Serie: Ingeniería de Túneles). Libro 2. Graficas Arias Montano. S. A. ETSIM. MOSTOLE. Madrid. 1999.
80. **Louis, C.**, Reconnaissance par sondages dan les roches. Annales de institut tech. Du Batiment et des travaux public. No 319. 1974.
81. **Lovaina, H. D.**, Determinación del método de arranque más eficiente para el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales en algunos macizos de la región Oriental. Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 2000.
82. **Martínez, S. R.**, Construcciones subterráneas. Universidad de pinar del Río, 63p, 1999.
83. **Mondejar, O. O.**, Mecanismo de acción de presión minera en Mina Merceditas: Centro Nacional de Informaciones Geológicas. Instituto de Geología y Paleontología. Memorias III congreso Cubano de Geología y Minería. La Habana. Cuba. 442 – 445p. 1998.
84. **Mondejar, O. O.**, Cargas actuantes en las excavaciones subterráneas de la región Oriental de Cuba. Memorias " Primer Simposio Internacional la Geodesia y la Geomecánica Aplicadas a la construcción. Ciudad de la Habana. Cuba. 38 – 47p. 2000.

85. **Mondejar, O. O.**, Propuesta de sostenimiento para excavaciones subterráneas bajo la influencia sísmica en la región Oriental de Cuba. Tesis Doctoral. ISMMANJ. 2001.
86. **Montalvo, S. F y otros.**, Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Canal Guaro - Manacal. INRH – Holguín, Junio, 1991.
87. **Moreno, Tallón. E.**, Las clasificaciones geomecánicas de las rocas, aplicadas a las obras subterráneas: KAHER II, S. A Madrid. Curso impartido en el ISMMANJ 63p. 1998.
88. **Morales, G. G y otros.**, Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Canal Juan Vicente- Yagrumal y Canal Pontezuelo Juan - Vicente. INRH – Holguín, Junio, 1990.
89. **Navy, U. S.**, Foundations and earth structures. Desing Manual 7.02. Washington. 1986.
90. **Noa, Monjes. R.**, Elección del método de arranque con el uso de las clasificaciones geomecánicas: Tesis de Maestría, ISMMANJ. 1996.
91. **Noa, Monjes. R.**, Elección del método de arranque más eficiente para el laboreo de excavaciones subterráneas en la región oriental. Libro de memorias. III Congreso Cubano de Geología y Minería, La Habana, 1998.
92. **Noa, Monjes. R.**, Criterios para la elección del método de avance en las excavaciones horizontales. Revista Geología y Minería, (4), 2003.
93. **Noa, Monjes. R.**, Análisis del grado de fracturación y deterioro del macizo rocoso en las minas Las Merceditas y Amores. Revista Geología y Minería, (1), 2004.
94. **Otaño, N. J.**, Elementos de física de las rocas. Cuba: Pueblo y Educación, 1981.
95. **Palmstrøm. A.**, The volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. Presented at the conference of fracture, fragmentation and flow, Jerusalem. 19 pp. 1986.
96. **Palmstrøm. A.**, Rmi a system for characterization rock mass strength for use in rock engineering. Rock Mach and tunnelling tech, 1995.

97. **Palmstrøm. A.**, Rmi – A rock mass characterization system for rock engineering purpose. Ph. D. thesis, University of Oslo, Norway. 400pp. Ingeotúneles. Madrid. 1998.
98. **Palmstrøm. A.**, Caracterización de macizos rocosos mediante el Rmi y sus aplicaciones en Mecánicas de Rocas. Ingeotúneles. Madrid. 1999.
99. **Pérez, C y otros.**, Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Túnel Esperanza - Enmedio. INRH – Holguín, Junio, 1991.
100. **Perri, Gianfranco.**, Diseño geotécnico de túneles. Caracas: Innovacions Tecnologic. Universidad Central de Venezuela. Caracas 1990.
101. **Pinto Da Cunha. A.**, Scale Effects in Rock Masses 1 st Int. Work – Shop on Scale effects in Rock Masses, A.A Balkema.1990.
102. **Pinto Da Cunha. A.**, Scale Effects in Rock Masses 93. 2do Int. Work – Shop on Scale effects in Rock Masses, A.A Balkema.1993.
103. **Proenza, J. A.**, Mineralización de cromita en la faja ofiolítica de Mayarí – Baracoa (Cuba). Ejemplo del Yacimiento Merceditas. (Tesis Doctoral). Universidad de Barcelona, España, 1997.
104. **Quiralde, López. F.**, Investigaciones in situ. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 69 – 97p. 1998.
105. **Quintas, C. F.**, Características estratigráficas del complejo ofiolítico y eugeosinclinal en la cuenca del río Quibiján, Baracoa. Minería y geología. 2 - 11p. 1998.
106. **Ramírez Oyangueren, P.; Laín Huerta, R.**, Presente y futuro de las clasificaciones geomecánicas. Madrid. Boletín geológico y minero. 105(6). Noviembre – Diciembre, 48-56p. 1994
107. **Riverón, Z. B.**, Caracterización de la respuesta dinámica de los suelos dela ciudad de Moa. (Tesis de Maestría). ISMMANJ. 1996.
108. **Rodríguez, I. A.**, Estudio geomorfológico y morfotectónico del municipio de Moa y áreas adyacentes. (Tesis Doctoral), ISMM de Moa. 1999.

109. **Romana, Ruiz. M.**, Caracterización de rocas blandas a partir de testigos de sondeos. Simp. Nac. De Rocas Blandas. Madrid. 1976.
110. **Romana, Ruiz. M.**, Excavación mecanizada con topo. Simposio sobre Uso Industrial del Subsuelo(SUIS) 2da parte de la ponencia general No 1. 1981.
111. **Romana, Ruiz. M.**, Nota sobre la aplicación de métodos mecanizados en la excavación de túneles. Curso sobre excavación de túneles en roca. Universidad politécnica de Valencia. Tomo IV, 1981.
112. **Romana, Ruiz. M.**, Clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles. Revista INGEOPRES, No 18. 1994.
113. **Romana, Ruiz. M.**, El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. Simposio Nacional de Taludes y Laderas. Granada, Vol. 3. 1997.
114. **Romana, Ruiz. M.**, Geología de túneles. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 29 – 77p. 1999.
115. **Rosales, A. R.**, Caracterización geomecánica de macizos de serpentinitas de Holguín. (Tesis de Maestría). ISMMANJ. 1996.
116. **Rusavin, Ivanovich. G.**, Métodos de la Investigación Científica. Editorial de Ciencias Sociales, La Habana. 1990.
117. **Scoble, M y Muftuoglu, Y.**, Derivattion of a Diggability Index for Surface Mine Equipment Selection. Mining Science and Technology. Vol. 1. 1984.
118. **Sen, Z. and Eissa, E. A.**, Volumetric rock quality designation. J. Geotrch. Engr. 117(9): 1331 – 1346. 1991. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 79 – 107p. 1999.
119. **Sen, Z. and Eissa, E. A.**, Rock quality charst for log – normally distributed block sizes. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 29 (1), 1 – 12. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 79 – 107p. 1999.
120. **Ugalde, Y. A.**, Estudio geomecánico de la mina Merceditas. (Trabajo de Diploma). ISMMANJ. 2000.

Anexos

Anexo I

Titulo: **Perfil geológico y Forma de la sección transversal de las excavaciones de las diferentes obras estudiadas.**

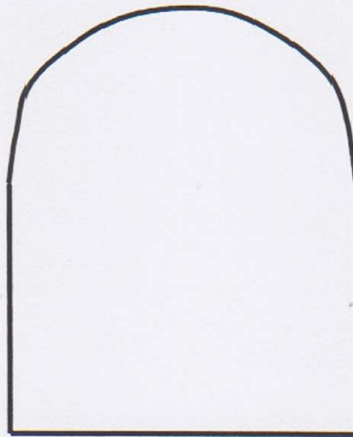


Figura 1. Forma de la sección transversal de las excavaciones de la mina Las Merceditas.

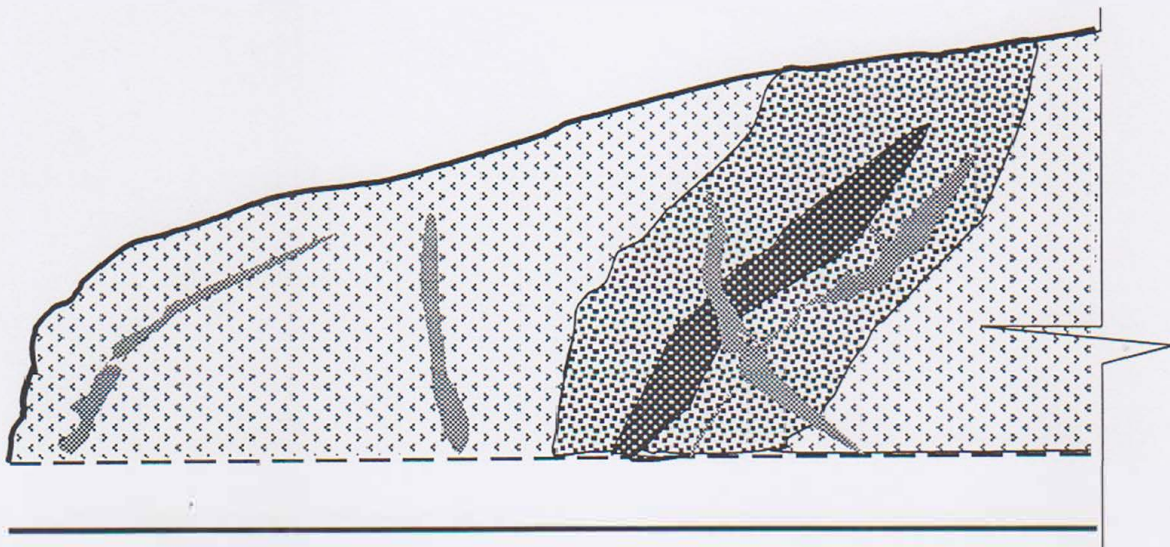


Figura 2. Perfil geológico de las excavaciones de la mina Las Merceditas.

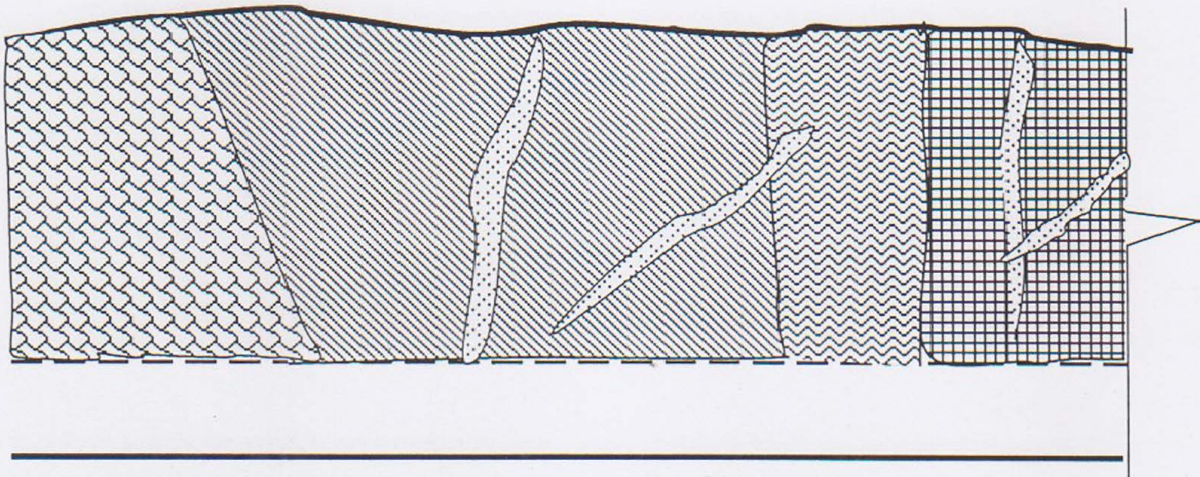


Figura 3. Perfil geológico de las excavaciones de la mina El Cobre.

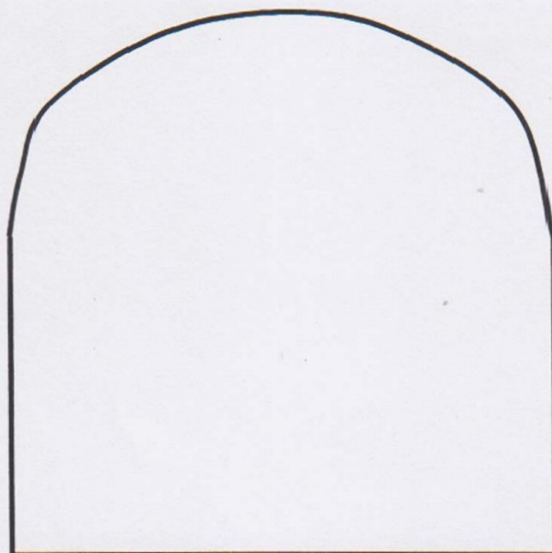


Figura 4. Forma de la sección transversal de las excavaciones de los túneles del trasvase de Mayarí.

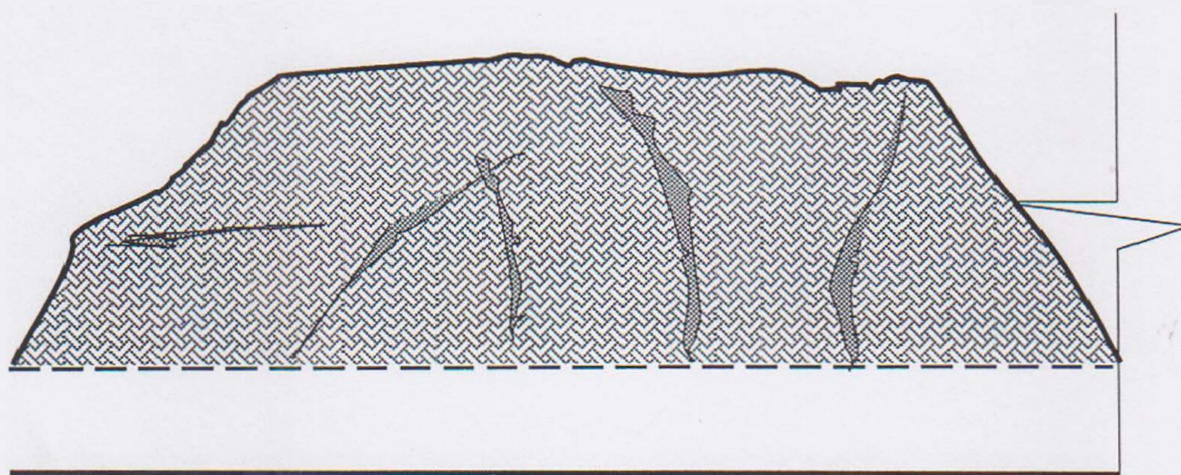


Figura 5. Perfil geológico de las excavaciones de los túneles del trasvase de Mayarí.

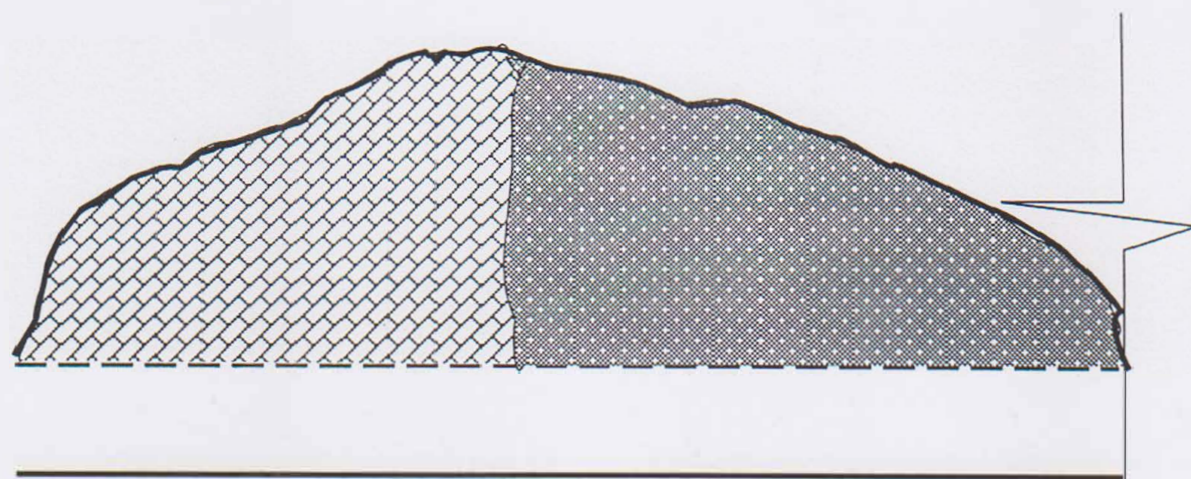


Figura 6. Perfil geológico de las excavaciones de los túneles del trasvase de Mayarí.

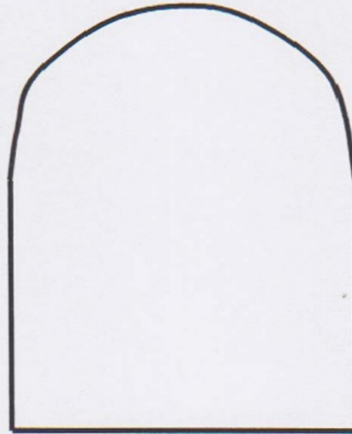


Figura 7. Forma de la sección transversal de las excavaciones de los túneles populares de Holguín.

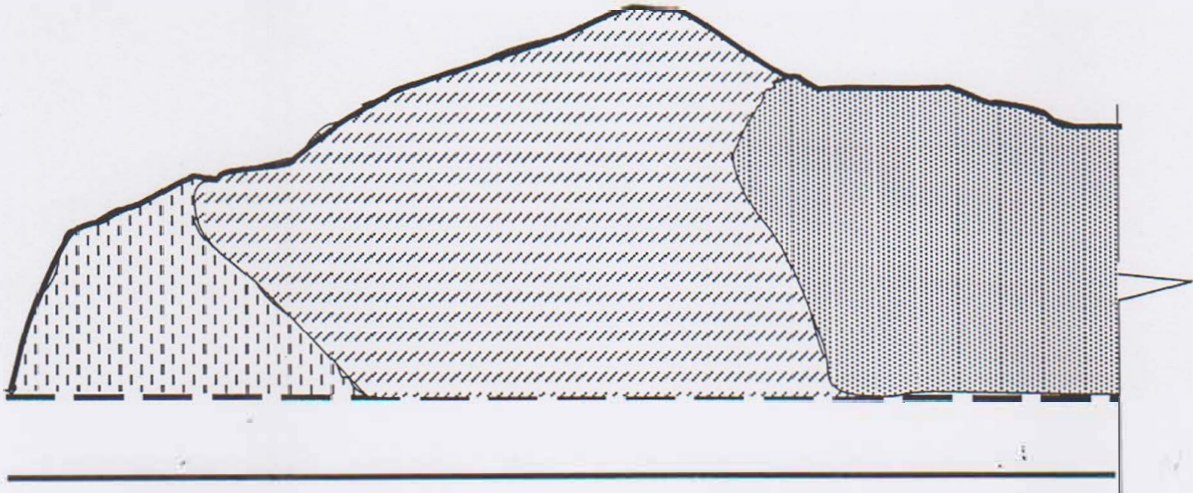


Figura 8. Perfil geológico de las excavaciones de los túneles populares de Holguín.

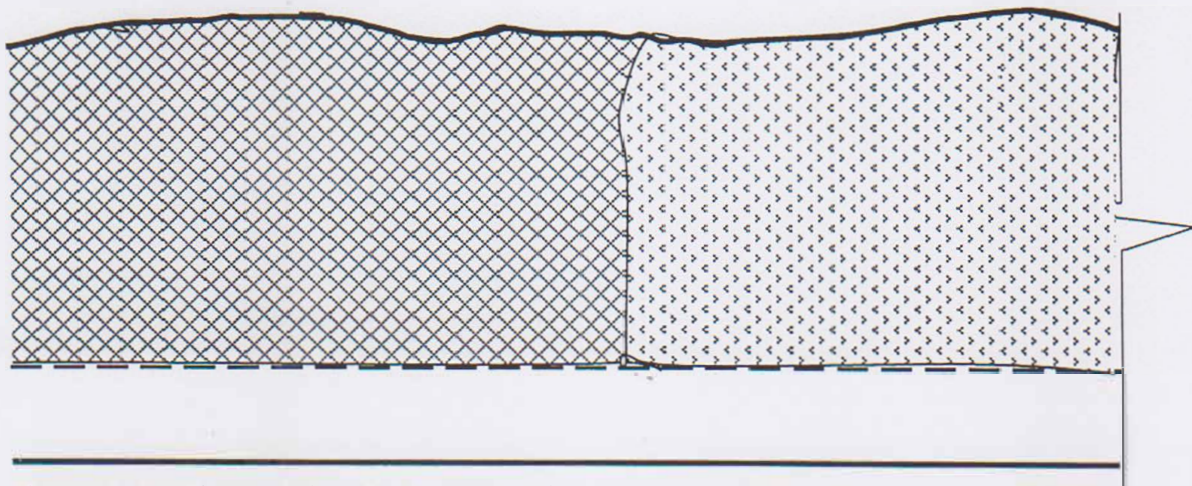


Figura 9. Perfil geológico de las excavaciones del túnel hidrotécnico de Las Tunas.

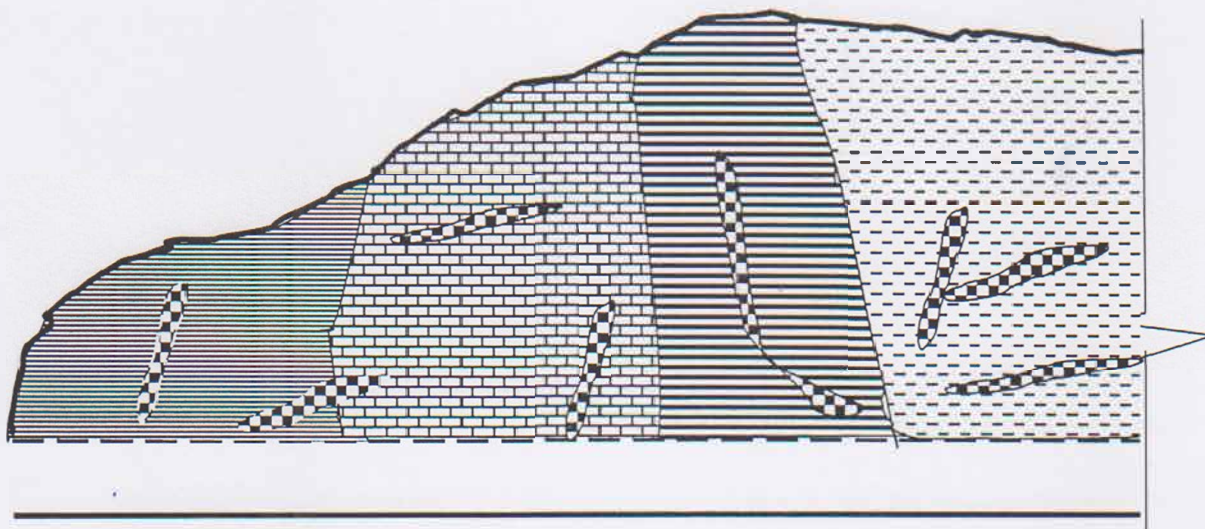


Figura 10. Perfil geológico de las excavaciones de los túneles populares de Guantánamo.

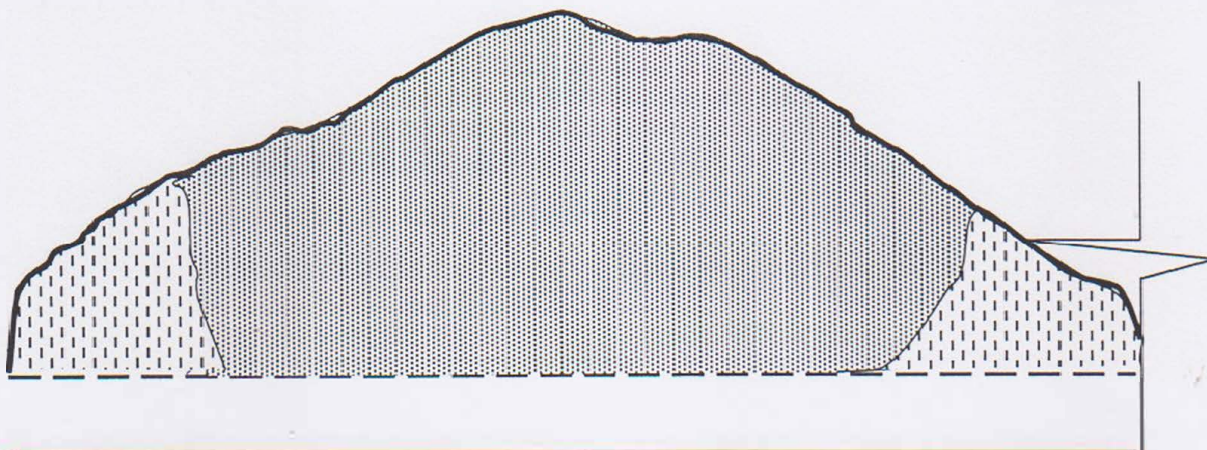


Figura 11. Perfil geológico de las excavaciones de los túneles populares de Moa.

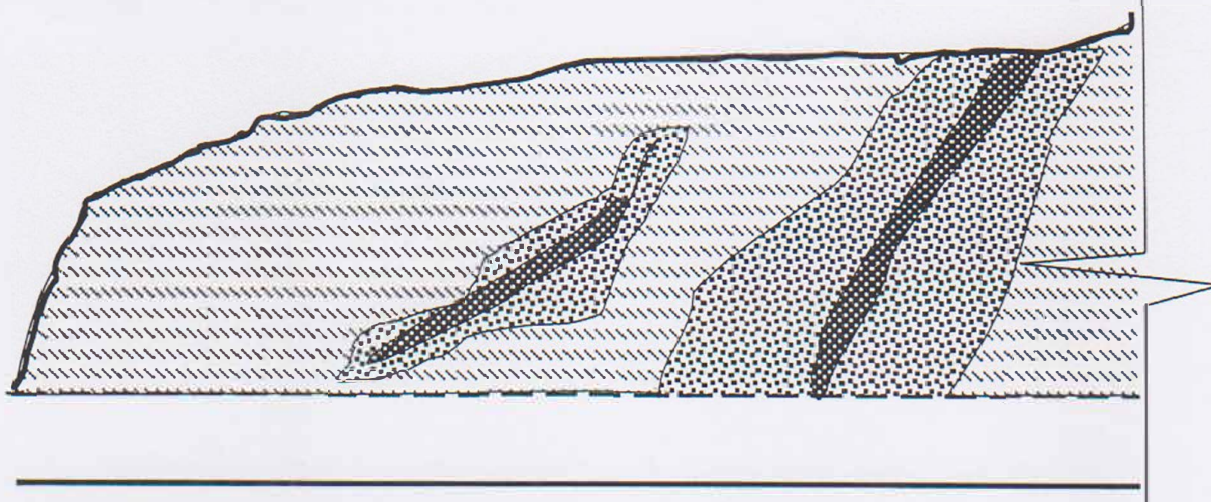


Figura 12. Perfil geológico del socavón de la mina Amores.

Leyenda: Principales rocas de cada macizo estudiado.

Mina Las Merceditas



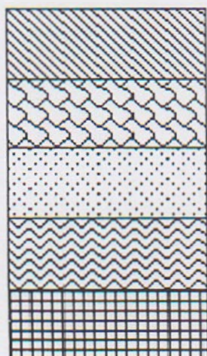
Peridotita.

Microgabro.

Dunita.

Cromita.

Mina El Cobre



Tobas de diferentes granulometría.

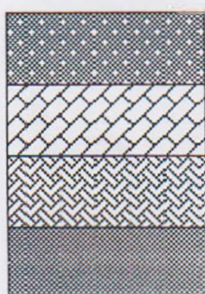
Tufitas alteradas.

Porfiritas andesíticas.

Areniscas tobáceas.

Tobas andesíticas.

Túneles del trasvase de Mayarí



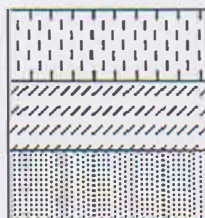
Calizas masivas, formación Bitirí y formación Camazan.

Calizas Arcillosas y estratificadas, Formación Bitirí.

Complejo Ultramáfico.

Garbos y brechas de garbos.

Túneles populares de Holguín.



Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada.

Serpentinita de color verde oscuro.

Peridotita serpentinizada fresca de color verde oscuro.

Túnel hidrotécnico de Las Tunas.



Andesita.

Peridotita

Túneles populares de Guantánamo.



Margas.

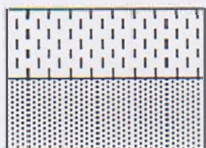
Tufitas.

Calizas tobáceas.

Areniscas de granos finos.

Ópalo.

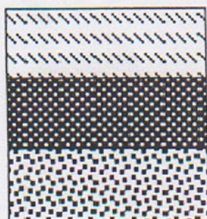
Túneles populares de Moa.



Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada.

Serpentinita de color verde oscuro fresca.

Mina Amores.



Harzburgita.

Cromita.

Dunita.

Anexo II

Titulo: **Resumen de los resultados de las propiedades físico - mecánicas de las rocas en los
Macizos Rocosos Estudiados.**

Tabla 1. Resumen de las propiedades másicas de las rocas de la mina Las Merceditas.

Tipo de roca	γ , t/m ³		ρ , t/m ³		W, %			P, %		
	Valor	A, %	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Cromita	3,92	4,02	3,98	11,83	15	0,11	4,68	12	1,5	7,9
Dunita	2,66	4,70	2,77	10,39	11	1,14	6,09	15	3,97	6,5
Microgabro	2,54	8,51	2,87	9,65	10	1,29	4,97	13	11,49	9,3
Peridotita	2,83	10,95	2,86	10,71	13	0,73	2,21	12	1,05	10,5
Peridotita serpentinizada	2,46	1,98	2,53	9,90	9	2,04	7,88	10	2,76	6,9

Tabla 2. Resumen de las propiedades mecánica de las rocas de la mina Las Merceditas.

Tipo de roca	Rc, MPa		Rt, MPa		F			D			Ka		
	Valor	A, %	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Cromita	67,7	23,63	7,00	26,82	9	6,4	6,51	13	27	23,2	11	19,5	11,4
Dunita	43,34	27,25	4,650	24,20	10	7,0	10,33	16	23,5	19,11	9	2,9	10,7
Microgabro	43,22	29,73	4,57	25,58	8	7,77	9,42	10	21	20,3	8	1,05	9,62
Peridotita	31,25	26,76	4,51	23,41	11	8,0	10,5	13	19,7	20,71	13	2,5	8,7
Peridotita serpentinizada	29,43	23,96	4,14	21,58	15	6,2	11,01	10	19	19,4	12	1,07	10,14

Tabla 3. Resumen de las propiedades másicas de las rocas de la mina El Cobre.

Tipo de roca	γ , t/m ³		ρ , t/m ³		W, %		Pr, %	
	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %
Tobas de diferentes granulometría	2,091	2,10	2,75	3,60	2,75	8,61	5,749	6,73
Porfiritas andesíticas	2,56	10,87	2,75	10,72	2,75	9,72	7,450	7,5
Tufitas alteradas	2,56	6,83	2,73	3,26	2,73	6,86	8,760	5,3
Areniscas tobáceas	2,49	8,80	2,91	9,68	2,91	2,88	6,781	9,5
Tobas andesíticas	2,57	10,54	2,69	5,54	0,63	8,95	8,530	7,2
Tobas de granos medios	2,51	10,82	2,67	6,65	0,69	10,32	7,570	6,33

Tabla 4. Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas de la mina El Cobre.

Tipo de roca	Rc, Mpa		Rt, Mpa		F			D		
	Valor	A, %	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Tobas de diferentes granulometría	67,91	16,30	3,64	15,71	11	6,7	19,3	9	30	14,54
Porfiritas andesíticas	25,40	15,24	5,32	19,29	16	2,5	20,25	14	17	17,39
Tufitas alteradas	41,33	14,22	7,83	22,81	9	4	19,83	12	23	19,41
Areniscas tobáceas	85,00	15,86	3,71	14,52	11	7,1	14,58	12	34	15,26
Tobas andesíticas	72,26	24,53	18,15	21,43	15	7,01	24,7	15	31	20,15
Tobas de granos medios	47,5	23,98	9,97	18,98	10	4,5	21,36	10	26	19,34

Tabla 5. Resumen de las propiedades másicas de las rocas de los túneles del trasvase de Mayarí.

Tipo de roca	γ , t/m ³		ρ , t/m ³		W, %		Pr, %	
	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %
Calizas Arcillosas y estratificadas, formación Bitirí.	2,30	6,33	2,67	6,02	1,0	4,68	4,52	8,9
Calizas masivas, formación Camazan	2,19	5,41	2,69	4,95	1,2	6,07	2,97	6,53
Calizas masivas, a formación Bitirí	3,02	8,62	2,68	7,81	0,4	2,36	3,49	7,34
Complejo Ultramáfico	2,2	6,93	2,70	4,73	2,4	4,54	3,05	9,5
Gabros	2,3	10,7	2,76	11,04	2,7	7,78	1,5	7,93
Brechas de gabros	2,6	12,3	2,85	13,16	1,8	6,96	7,97	5,98

Tabla 6. Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas de los túneles del trasvase de Mayarí.

Tipo de roca	Rc, MPa		Rt, MPa		F			D			Ka		
	Valor	A, %	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Calizas Arcillosas y estratificadas, formación Bitirí.	31,22	21,3	2,08	23,96	9	3,1	19,1	16	23,1	14,71	12	0,12	11,1
Calizas masivas, formación Camazan	32,77	20,8	2,20	21,78	10	3,2	21,32	14	26	19,5	11	1,33	14,5
Calizas masivas, formación Bitirí	59,7	17,95	3,98	23,03	13	4	18,54	11	41	13,87	15	1,56	19,5
Complejo Ultramáfico	21,33	14,71	1,42	19,51	11	2	19,18	12	17	20,92	10	1,02	18,2
Gabros	9,43	23,3	0,63	24,5	8	0,9	20,2	14	10	23,14	13	0,17	17,1
Brechas de gabros	17,07	21,5	1,20	22,32	12	1,7	21,07	13	12	20,5	13	0,68	16,3

Tabla 7. Resumen de las propiedades másicas de las rocas de los túneles populares de Holguín.

Tipo de roca	γ , t/m		ρ , t/m		Pr, %		W, %	
	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %
Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada	2,29	18,9	2,66	17,9	12,0	16,9	2,3	7,68
Serpentinita de color verde oscuro	2,08	16,9	2,57	14,9	10,9	17,9	1,9	4,17
Peridotita serpentinizada fresca de color verde oscuro	2,27	17,6	2,57	7,01	15,1	19,5	0,86	5,36

Tabla 8. Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas de los túneles populares de Holguín.

Tipo de roca	Rc, Mpa		Rt, Mpa		F			D			Ka		
	Valor	A, %	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada.	15,03	16,86	1,90	22,69	13	1,5	19,52	12	9	14,9	16	2,7	19,96
Serpentinita de color verde oscuro.	55,67	21,54	4,59	19,5	10	5,56	20,3	10	27	23,07	12	3,1	20,03
Peridotita serpentinizada fresca de color verde oscuro.	90	16,03	10,89	14,67	11	7,1	17,04	15	40	19,5	14	4,53	16,1

Tabla 9. Resumen de las propiedades másicas de las rocas del túnel hidrotécnico de Las Tunas.

Tipo de roca	γ , t/m			ρ , t/m			Pr, %			W, %		
	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Andesitas	11	2,4	4,02	15	2,63	6,3	10	8,75	6,73	13	1,92	3,19
Peridotitas	15	2,67	4,07	16	2,71	7,1	7	1,50	6,4	12	1,76	4,2

Tabla 10. Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas del túnel hidrotécnico de Las Tunas.

Tipo de roca	Rc, Mpa			Rt, Mpa			F			D			Ka		
	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Andesitas	17	12,0	19,3	18	0,8	20,2	10	1,2	19,87	11	3	14,38	13	1,15	16,67
Peridotitas	14	13,2	14,04	16	0,88	17,4	11	1,3	17,39	13	3,2	18,3	10	2,37	17,87

Tabla 11. Resumen de las propiedades másicas de las rocas de los túneles populares de Guantánamo.

Tipo de roca	$\gamma, \text{t/m}^3$			$\rho, \text{t/m}^3$			W, %			P, %		
	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Margas	15	2,17	4,56	16	2,25	4,47	18	2,75	6,73	17	3,60	8,52
Tufitas	12	2,50	6,69	13	2,67	7,3	16	3,01	10,52	14	6,36	6,36
Calizas Tobáceas	14	2,63	10,07	12	2,71	12,8	9	2,61	7,41	12	2,95	10,03
Areniscas de granos finos	13	2,40	11,4	11	2,56	9,75	12	2,13	4,3	9	6,25	7,23
Ópalo	8	2,20	2,1	9	2,25	2,09	15	0,1	3,8	7	2,20	4,33

Tabla 12. Resumen de las propiedades mecánica de las rocas de los túneles populares de Guantánamo.

Tipo de roca	Rc, Mpa			Rt, MPa			F			Ka		
	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Margas	19	1,285	20,8	12	0,086	21,5	17	1,30	11,37	11	0,012	10,42
Tufitas	17	1,978	19,72	20	0,132	19,32	14	2,50	19,16	12	0,09	11,71
Calizas Tobáceas	16	9,240	23,4	19	0,616	24,04	10	1,73	20,52	8	1,27	14,17
Areniscas de granos finos	14	1,256	24,13	18	0,084	20,79	11	2,30	17,4	13	1,5	19,63
Ópalo	10	10,09	11,16	15	6,73	16,7	8	8,91	10,39	9	-	-

Tabla 13. Resumen de las propiedades máxicas de las rocas de los túneles populares de Moa.

Tipo de roca	γ , t/m		ρ , t/m		Pr, %		W, %	
	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %	Valor	A, %
Serpentinita de color verde grisáceo, meteorizada	2,20	13,76	2,65	2,76	12,00	1,87	2,46	8,65
Serpentinita de color verde oscuro, fresca	2,08	12,87	2,57	1,99	10,06	2,34	1,69	6,55

Tabla 14. Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas de los túneles populares de Moa.

Tipo de roca	Rc, Mpa		Rt, Mpa		F			D			Ka		
	Valor	A, %	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Serpentinita de color verde grisáceo, meteorizada	22,06	16,86	1,945	22,67	11	3,20	15,3	9	13	19,7	10	1,3	16,96
Serpentinita de color verde oscuro, fresca	32,41	21,54	4,598	19,50	13	4,10	19,87	17	18	23,2	13	1,7	16,3

Tabla 15. Resumen de las propiedades másicas de las rocas de la mina Amores.

Tipo de roca	γ , t/m ³			ρ , t/m ³			W, %			P, %		
	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Harzburgita	10	2,55	11,50	11	2,66	10,71	17	1,46	10,25	9	4,2	8,03
Cromita	11	3,85	10,62	13	3,95	10,57	11	0,53	11,33	10	2,5	6,72
Dunita	13	2,79	11,11	16	2,79	11,45	14	0,80	8,3	13	0,7	4,17

Tabla 16. Resumen de las propiedades mecánica de las rocas de la mina Amores.

Tipo de roca	Rc, Mpa			Rt, Mpa			F			D			Ka		
	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %
Harzburgita	11	73,9	21,61	12	4,926	25,2	10	4,27	19,1	15	33	20,3	14	1,15	14,3
Cromita	14	67,7	19,6	9	6,87	20,41	11	6	20,8	15	27,8	19,18	16	17,4	16,5
Dunita	13	72,9	23,9	13	4,86	22,58	13	6,3	21,31	11	31	23,4	10	3,01	13,1

Anexo III

Titulo: Resumen de los resultados de las Direcciones de las principales estructuras existentes en los Macizos Rocosos Estudiados.

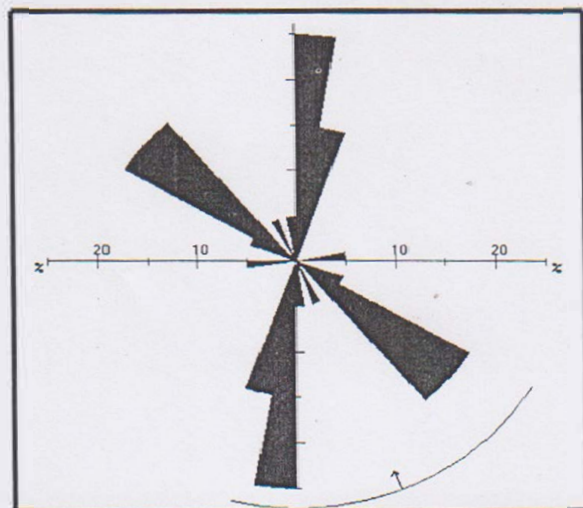


Figura 1. Direcciones de las principales estructuras existentes en la mina Las Merceditas.

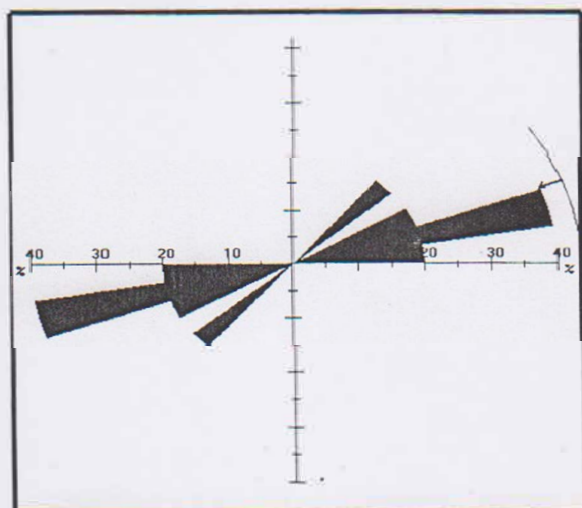


Figura 2. Direcciones de las principales estructuras existentes en la mina El Cobre.

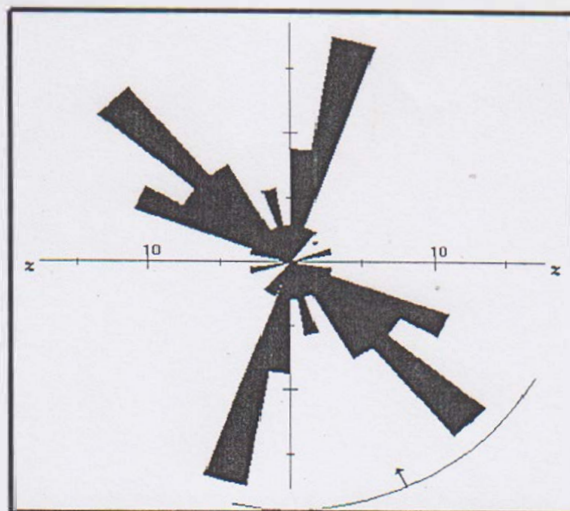


Figura 3. Direcciones de las principales estructuras existentes en los túneles del trasvase de Mayarí.

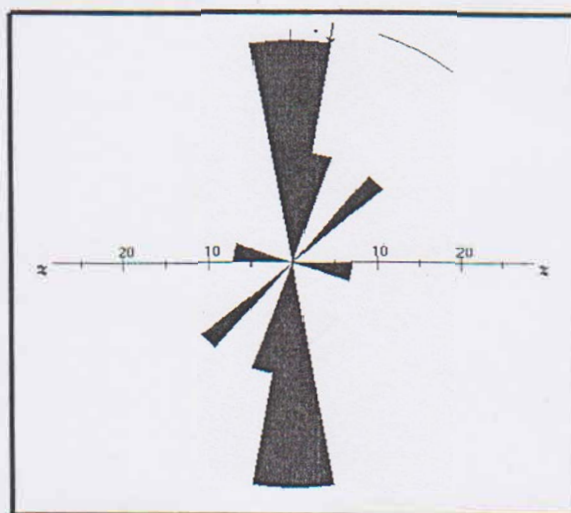


Figura 4. Direcciones de las principales estructuras existentes en los túneles populares de Holguín.

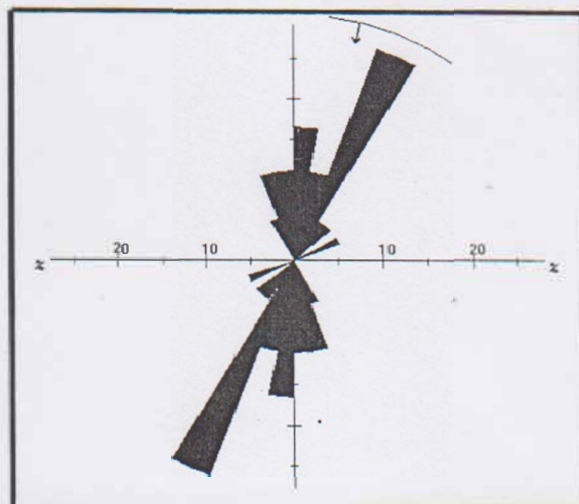


Figura 5. Direcciones de las principales estructuras existentes en el túnel hidrotécnico de Las Tunas.

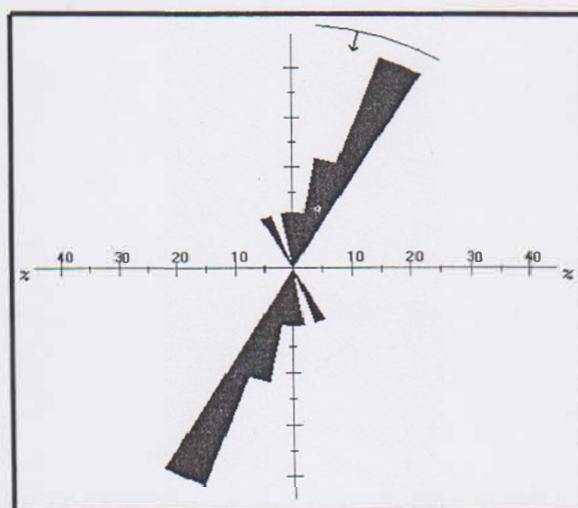


Figura 6. Direcciones de las principales estructuras existentes en los túneles populares de Guantánamo.

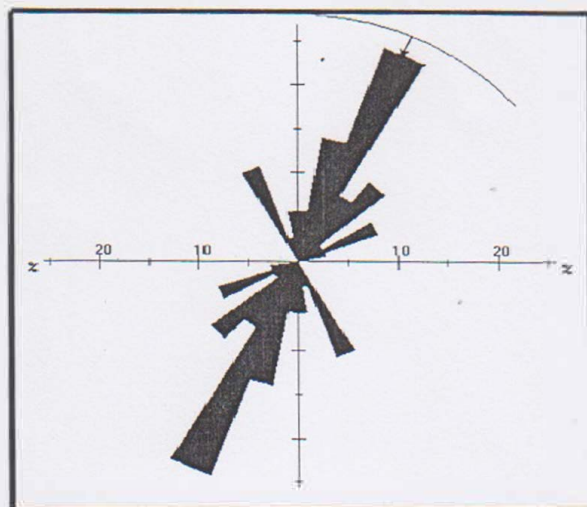


Figura 7. Direcciones de las principales estructuras existentes en los túneles populares de Moa.

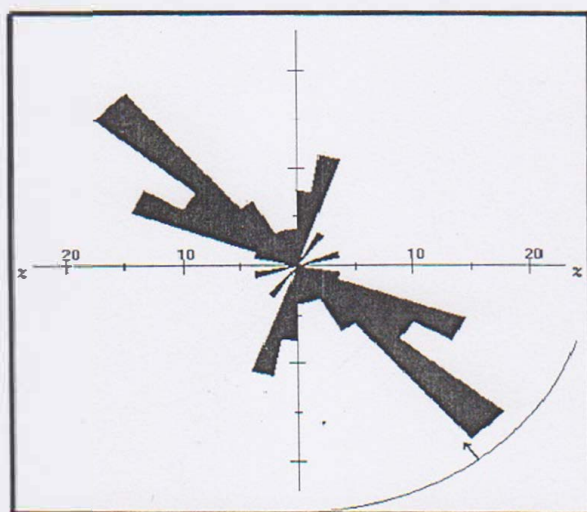


Figura 8. Direcciones de las principales estructuras existentes en la mina Amores.

Anexo IV

Titulo: **Resumen de los resultados de la valoración del grado de deterioro de los Macizos Rocosos Estudiados.**

Tabla 1. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua, para el macizo rocoso donde se ubica la mina Las Mercedes.

Rocas	Índices													
	Grado de afectación	Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %							
Peridotita	Bajo	19	31,25	26,76	20	27,26	28,72	0,872	31,2	30,38	30,36	30,35	29,37	29,34
Dunita	Moderado	15	43,33	27,25	19	36,21	26,35	0,83	43,2	42,9	42,3	41,7	40,73	38,6
Gabro	Alto	21	43,21	29,73	23	36,57	32,21	0,846	42,31	42,28	41,26	41,26	38,20	38,14
Cromita	Fresco	18	67,7	23,63	18	65,2	20,58	0,963	67,62	67,6	67,6	67,4	67,4	67,4
Peridotita. Serpentinizada.	Moderado	20	29,43	23,96	22	26,38	29,33	0,89	29,4	28,9	28,9	28,5	27	27

Tabla 2. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua, para el macizo rocoso donde se ubica la mina El Cobre.

Rocas	Grado de afectación	Índices												
		Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %							
Tobas de diferentes granulometría	Bajo	10	67,91	16, 30	17	61,17	19, 86	0,9	67,9	67,6	66	63,2	63	62
Porfiritas andesíticas	Moderado	11	25,4	15,24	19	17,8	20,27	0,7	24,7	14,7	21,3	20	20	19,81
Tufitas alteradas	Moderado	19	41,33	14,22	10	33,57	18,22	0,81	40,1	40,01	38	37,7	37,5	35
Areniscas tobáceas	Bajo	11	85	15,86	13	76	21,54	0,89	83,2	83	83	79	76	75,7
Tobas andesíticas	Bajo	17	72,26	24,53	20	63,1	24,63	0,87	71	70,67	70,1	68	67,9	67
Tobas de granos medios	Moderado	14	47,5	23,98	18	30	27,31	0,63	45,5	43	43	41	39	33,16

Tabla 3. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua para el macizo rocoso donde se ubican los túneles del trasvase de Mayarí.

Rocas	Índices													
	Grado de afectación	Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %							
Calizas Arcillosas y estratificadas, formación Bitirí.	Moderado	15	31,22	21,3	15	17,32	25,44	0,55	28,34	25	23,9	21	16,9	16,5
Calizas masivas, formación Camazan	Bajo	17	32,77	20,8	18	25,6	22,38	0,78	31	31	26,78	26,05	25,3	24,7
De la formación Bitirí	Bajo	13	59,7	17,95	13	51,2	20,15	0,86	57	56,8	55	55	53	50,9
Complejo Ultramáfico	Bajo	10	21,33	14,71	11	17,25	10,75	0,8	21,33	20,01	20	18,5	18	18
Gabros	Moderado	16	9,43	23,3	19	2,18	20,31	0,23	7,76	7,5	6	4,16	3,04	1,58
Brechas de gabros	Moderado	17	17,07	21,5	20	9,98	19,17	0,58	15,76	13,1	13	11	9	9

Tabla 4. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua para el macizo rocoso donde se ubican los túneles populares de Holguín.

Rocas	Índices													
	Grado de afectación	Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %							
Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada	Moderado	18	15,03	16,86	21	10,6	11,12	0,7	13,8	13	11	9,15	9	7,5
Serpentinita de color verde oscuro	Bajo	20	55,67	21,54	19	42	20,24	0,75	53	51,37	51	48,32	45	45
Peridotita serpentinizada fresca de color verde oscuro	Bajo	18	90	16,03	22	72,5	19,22	0,8	87,43	87	85,39	85,39	83	75,7

Tabla 5. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua para el macizo rocoso donde se ubica el túnel hidrotécnico de Las Tunas.

Rocas	Índices													
	Grado de afectación	Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %							
Andesitas	Bajo	17	12	19,3	19	9,68	18,14	0,8	11,17	11	11	9,97	9	9
Peridotitas	Bajo	14	13,2	14,04	18	9,88	16 57	0,75	13,2	13	11,17	10,91	10,87	10,87

Tabla 6. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua para el macizo rocoso donde se ubican los túneles populares de Guantánamo.

Rocas	Índices													
	Grado de afectación	Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %							
Margas	Muy alto	19	1,285	20,8	21	0,2	23,7	0,15	0,91	0,67	0,33	-	-	-
Tufitas	alto	17	1,978	19,72	18	0,42	21,35	0,21	1,15	0,99	0,63	-	-	-
Calizas Tobáceas	alto	16	9,24	23,4	16	3,2	27,4	0,34	7,1	5,3	2,17	1,42	0,33	0,15
Areniscas de granos finos	moderado	14	1,256	24,13	15	0,178	21,25	0,14	1,16	0,92	0,67	0,45	0,18	0,13
Ópalo	fresco	10	10,09	11,16	13	10	10,11	1,009	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09

Tabla 7. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua para el macizo rocoso donde se ubican los túneles populares de Moa.

Rocas	Índices													
	Grado de afectación	Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7	14	21	28	35	42
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %		días	días	días	días	días	días
Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada.	Moderado	18	22,06	16,86	21	16,3	19,98	0,73	20,3	17,1	17	17	16,78	16,7
Serpentinita de color verde oscuro fresca.	Bajo	13	32,41	21,54	15	27,46	27,67	0,85	30	29,72	29,67	27	27	26,7

Tabla 8. Resumen de los resultados del grado de alteración de las rocas y la variación de la resistencia en el agua para el macizo rocoso donde se ubica la mina Amores.

Rocas	Índices													
	Grado de afectación	Valores de la resistencia (Mpa)						Kt	Variación de la resistencia de las rocas en el agua (Mpa)					
		Rocas frescas			Rocas alteradas				7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días
		Ensayos	Valor	A, %	Ensayos	Valor	A, %							
Hanzburgita	Bajo	11	73,9	21,61	15	71,4	23,84	0,96	73,8	73,8	72,3	72	71,9	71,9
Cromita	Fresco	14	67,7	19,6	14	65,5	20,67	0,96	67,7	67,7	67,5	67,34	67,3	67,1
Dunita	Moderado	13	72,9	23,9	16	69,1	21,61	0,94	72,7	72,01	71,8	70,5	68,9	68,7

Anexo V

Título: Resultados de la Evaluación de la Estabilidad, para los diferentes Macizos Estudiados.

Tabla 1. Clasificación de las rocas según la metodología de valoración de estabilidad dada por Deere, (1963).

RQD	Tipo de roca
90 - 100	Muy buena
75 - 90	Buena
50 - 75	Media
25 - 50	Mala
0 - 25	Muy mala

Tabla 2. Parámetros de clasificación y sus valores, según Bieniawski (1979).

Nº	Parámetros.		Rango de valores.						
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo de carga puntual.	>10MPa	4 - 10 MPa	2 -4 MPa	1-2 MPa	comp.. simple (Mpa)		
		C. Simple	>25 0MPa	100- 250MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 5Mpa
	valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD.		90 a 100 %	75 a 90 %	50 a 75 %	25 a 50 %	< 25 %		
	valoración		20	17	13	8	3		
3	Espaciamiento entre grietas.		> 2m	0,6 - 2 m	0,2 a 0,6m	0,06 a 0,2m	< 0,06 m		
	valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de las diaclasas.		muy rugosas discontinuas, sin separaciones, bordes duros.	ligeramente rugosa. Abertura < 1mm. bordes duros	ligeramente rugosa, Abertura < 1mm. Bordes blandos	espejos de falla o con relleno <5mm o abiertas 1 -5 mm. Diaclasa continua	Relleno blando >5mm, aberturas >5mm. diaclasa continua		
	valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua freática	caudal por 10 m de túnel.	Nulo	< 10 l/min.	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	>125 l/min		
		Relación: entre presión de agua tensión principal mayor	0	0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	valoración		15	10	7	4	0		

Tabla 3. Ajuste de valores por las orientaciones de las juntas, según Bieniawski (1979).

Orientación del rumbo y buzamiento de las diaclasas.		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Valores	túneles	0	-2	-5	-10	-12

Tabla 4. Determinación de la clase de macizo rocoso, según Bieniawski (1979).

Valor total de RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala

Tabla 5. Significado de las clases de macizos rocosos según Bieniawski.

Clase número	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento	10 años para 5 m.	6 meses para 4 m.	1 semana para 3 meses	5 horas para 1,5 m	10 minutos para 0,5 m.
Cohesión, Mpa	>0,3	0,2 - 0,3	0,15 - 0,20	0,10 - 0,15	< 0,10
Angulo de fricción	>45°	40 - 45	35 - 40	30 - 35	< 30

Estimación de parámetros que intervienen en el índice Q (Barton, 1974), Tablas de la 6 a la 11.

Tabla 6. Índice del número de familias de juntas , Jn.

Descripción	Valor
Roca Masiva.	0.5 -1,0
Una familias de grietas.	2
Id. con otras grietas ocasionales.	3
Dos familias de grietas.	4
Id. con otras grietas ocasionales.	6
Tres familias de grietas .	9
Id. con otras grietas ocasionales.	12
Cuatro o más familias, roca muy fracturada.	15
Roca muy triturada	20

Tabla 7. Rugosidad de las juntas, Jr.

Descripción	Valor
Grietas rellenas	1
Grietas limpias (*)	
Discontinuas	4
Onduladas rugosas	3
Onduladas lisas	2
Planas rugosas	1,5
Planas lisas	1,0
Lisas o espejos de fallas	
Onduladas	1,5
Planas	0,5
(*) o cuyas caras entran en contacto bajo la sollicitación.	

Tabla 8. Índice de alteración de las juntas, Ja.

Descripción	Valor
Grietas de paredes planas.	0.75 -1
Ligera alteración	2
Alteración arcillosa.	4
Con detritus arenosos.	4
Con detritus arcillosos preconsolidados.	6
Id. poco consolidados.	8
Id. Expansivos.	8 - 12
Milonitas de roca y arcilla.	6 - 12
Milonitas de arcilla limosa.	5
Milonitas arcillosas - gruesas	10 - 20

Tabla 9. Coeficiente reductor de la presencia de agua, Jw.

Descripción	Valor	Presión de agua (kg/cm ²)
Excavaciones secas o con <5 l/min localmente.	1	< 1
Afluencia media con lavado de alguna grietas.	0,66	1 - 2,5
Afluencia importante por grietas limpias.	0,5	2,5 - 10
Id. Con lavado de grietas.	0,33	2,5 - 10
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo.	0,2 - 0,1	> 10
Id. Mantenido.	0,1 - 0,05	>10

Tabla 10. Tensión en las excavaciones, SRF (*Stress reduction factor*).

Descripción	Valor
Zonas débiles.	
Multitud de zonas débiles o milonitas.	10.0
Zonas débiles aisladas con arcilla o roca descompuesta (cobertura $\leq 50\text{mm}$).	5.0
Id. con cobertura mayor de 50mm.	2.5
Abundantes zonas débiles en rocas competente.	7.5
Zonas débiles aisladas en rocas competente. ($c \leq 50\text{m}$)	5.0
Id, con cobertura mayor de 50mm.	2.5
Terreno en bloques muy fracturado.	5,0
Roca competente.	
Pequeña cobertura.	2,5
Cobertura media.	1,0
Gran cobertura	0,5 – 2,0
Terreno fluyente.	
Con bajas presiones.	5 – 10
Con altas presiones.	10 - 20
Terreno expansivo.	
Con presión de hinchamiento moderada.	5 – 10
Con presión de hinchamiento alta.	10 – 15

Tabla 11. Clasificación de las rocas según el Índice de calidad de las rocas. (Barton 1974).

Q	Clasificación
Entre 0,001 y 0,01	Roca excepcionalmente mala
Entre 0,01 y 0,1	Roca extremadamente mala
Entre 0,1 y 1	Roca muy mala
Entre 1,0 y 4	Roca mala
Entre 4,0 y 10	Roca media
Entre 10 y 40	Roca buena
Entre 40 y 100	Roca muy buena
Entre 100 y 400	Roca extremadamente buena
Entre 400 y 1000	Roca excepcionalmente buena

Parámetros para la obtención de S, según Bulichev.

Tabla 12. Módulo de agrietamiento relativo.

n	> 60	60 - 25	25 - 12	12 - 6	<6 - 0
K _m	0,5 a 2,5	2,5 a 5,5	5,0 a 7,5	7,5 a 9,0	9,0 a 10,0

Tabla 13. Coeficiente que caracteriza las dimensiones de las aberturas (t) de las grietas no rellenas (K_t).

$K_t = 1$	para $t < 3$ mm	o para grietas rellenas
$K_t = 2$	Para $t = 3$ a 15 mm	
$K_t = 4$	Para $t > 15$ mm	

Tabla 14. Coeficiente que caracteriza la dirección de la excavación con respecto al sistema de Grietas más desarrollado (K_α).

$K_\alpha = 1,0$	para $\alpha = 70^\circ$ a 90°
$K_\alpha = 1,5$	para $\alpha = 20^\circ$ a 70°
$K_\alpha = 2,0$	para $\alpha < 20^\circ$

Tabla 15. Evaluación de la estabilidad de la roca según Bulichev.

Categoría de estabilidad	Grado de estabilidad de la roca	Valores de S
I	Macizos muy estables	>70
II	Macizos estables	5,0 a 70
III	Macizos medianamente estables	1,0 a 5,0
IV	Macizos inestables	0,05 a 1,0
V	Macizos muy inestables	$< 0,05$

Tabla 16. Códigos asignados a los resultados de estabilidad, obtenidos en la mina Las Merceditas.

Clasificación	Cromita	Dunita	Microgabro	Peridotita	Peridotita serpentizada
Deere	3	2	3	1	2
Bieniawski	3	3	4	2	3
Barton	3	3	4	2	4
Bulichev	3	2	3	2	3

Tabla 17. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina Las Merceditas.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	2,95	3	0,98333333	6,555	0,0071316	3,4902996
Columnas	7	4	1,75	11,66	0,0004227	3,25916
Error	1,8	12	0,15			
Total	11,75	19				

Tabla 18. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina Las Merceditas, sin tener en cuenta a Barton.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	1,6	2	0,8	6	0,0256	4,4589683
Columnas	4,933333	4	1,23333333	9,25	0,004284	3,8378544
Error	1,066666	8	0,13333333			
Total	7,6	14				

Tabla 19. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina Las Merceditas, sin tener en cuenta a Bulichev.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	2,8	2	1,4	9,333	0,0081	4,4589683
Columnas	6,4	4	1,6	10,66	0,0027151	3,8378544
Error	1,2	8	0,15			
Total	10,4	14				

Tabla 20. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina Las Merceditas, sin tener en cuenta a Bieniawski.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	2,5333333	2	1,2666667	6,909	0,0180753	4,4589683
Columnas	5,3333333	4	1,3333333	7,272	0,0089537	3,8378544
Error	1,4666666	8	0,1833333			
Total	9,3333333	14				

Tabla 21. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina Las Merceditas, sin tener en cuenta a Deere.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	0,9333333	2	0,4666667	3,5	0,0809086	4,4589683
Columnas	4,9333333	4	1,2333333	9,25	0,0042840	3,8378544
Error	1,0666666	8	0,1333333			
Total	6,9333333	14				

Tabla 22. Códigos asignados a los resultados de estabilidad, obtenidos en la mina El Cobre.

Clasificación	Tobas andesíticas de color gris verdoso	Porfiritas	Tobas de granos medios	Tobas brechosas
Deere	1	1	1	2
Bieniawski	2	2	3	3
Barton	2	2	3	3
Bulichev	2	2	3	3

Tabla 23. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina El Cobre.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	4,6875	3	1,5625	25	0,0001065	3,8625387
Columnas	3,1875	3	1,0625	17	0,0004750	3,8625387
Error	0,5625	9	0,0625			
Total	8,4375	15				

Tabla 24. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina El Cobre, sin tener en cuenta a Barton.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	4,1666666	2	2,0833333	25	0,0012299	5,1432493
Columnas	2,25	3	0,75	9	0,0122162	4,7570551
Error	0,5	6	0,0833333			
Total	6,9166666	11				

Tabla 25. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina El Cobre, sin tener en cuenta a Bulichev.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	4,1666666	2	2,0833333	25	0,0012299	5,1432493
Columnas	2,25	3	0,75	9	0,0122162	4,7570551
Error	0,5	6	0,0833333			
Total	6,9166666	11				

Tabla 26. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina El Cobre, sin tener en cuenta a Bieniawski.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	4,1666666	2	2,08333333	25	0,0012299	5,1432493
Columnas	2,25	3	0,75	9	0,0122162	4,7570551
Error	0,5	6	0,08333333			
Total	6,9166666	11				

Tabla 27. Códigos asignados a los resultados de estabilidad, obtenidos en los túneles del trasvase de Mayarí.

Clasificación	Calizas Arcillosas Formación Bitirí	Formación Camazan	Complejo ultramáfico	Brechas de Garbos
Deere	1	1	1	2
Bieniawski	3	2	3	3
Barton	4	3	3	4
Bulichev	3	2	2	4

Tabla 28. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles del trasvase de Mayarí.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	10,6875	3	3,5625	20,52	0,0002314	3,8625387
Columnas	3,6875	3	1,22916667	7,08	0,0096265	3,8625387
Error	1,5625	9	0,17361111			
Total	15,9375	15				

Tabla 29. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles del trasvase de Mayarí, sin tener en cuenta a Barton.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	6	2	3	13,5	0,0060105	5,1432493
Columnas	2,9166666	3	0,97222222	4,375	0,0590217	4,7570551
Error	1,3333333	6	0,22222222			
Total	10,25	11				

Tabla 30. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles del trasvase de Mayarí, sin tener en cuenta a Bulichev.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	10,5	2	5,25	37,8	0,0003975	5,1432493
Columnas	1,6666666	3	0,55555556	4	0,0701011	4,7570551
Error	0,8333333	6	0,13888889			
Total	13	11				

Tabla 31. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles del trasvase de Mayarí, sin tener en cuenta a Bieniawski.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	10,5	2	5,25	37,8	0,0003975	5,1432493
Columnas	3,6666666	3	1,22222222	8,8	0,0128885	4,7570551
Error	0,8333333	6	0,13888889			
Total	15	11				

Tabla 32. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles del trasvase de Mayarí, sin tener en cuenta a Deere.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	1,5	2	0,75	3,85714	0,0837402	5,1432493
Columnas	3,3333333	3	1,1111111	5,71428	0,0341973	4,7570551
Error	1,1666666	6	0,1944444			
Total	6	11				

Tabla 33. Códigos asignados a los resultados de estabilidad, obtenidos en los túneles populares de Holguín.

Clasificación	Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada	Serpentinita de color verde oscuro	Peridotita serpentinizada fresca de color verde oscuro
Deere	3	2	3
Bieniawski	3	3	3
Barton	4	3	4
Bulichev	4	2	2

Tabla 34. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Holguín.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	2	3	0,66666667	2	0,2155534	4,7570551
Columnas	2	2	1	3	0,125	5,1432493
Error	2	6	0,33333333			
Total	6	11				

Tabla 35. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Holguín, sin tener en cuenta a Barton.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	0,2222222	2	0,11111111	0,25	0,7901234	6,9442762
Columnas	1,5555555	2	0,77777778	1,75	0,2844444	6,9442762
Error	1,7777777	4	0,44444444			
Total	3,5555555	8				

Tabla 36. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Holguín, sin tener en cuenta a Bulichev.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	1,5555555	2	0,77777778	7	0,0493827	6,9442762
Columnas	0,8888888	2	0,44444444	4	0,1111111	6,9442762
Error	0,4444444	4	0,11111111			
Total	2,8888888	8				

Tabla 37. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Holguín, sin tener en cuenta a Bieniawski.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	2	2	1	3	0,16	6,9442762
Columnas	2,6666666	2	1,33333333	4	0,1111111	6,9442762
Error	1,3333333	4	0,33333333			
Total	6	8				

Tabla 38. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Holguín, sin tener en cuenta a Deere.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	1,5555555	2	0,77777778	1,75	0,28444444	6,9442762
Columnas	1,5555555	2	0,77777778	1,75	0,28444444	6,9442762
Error	1,7777777	4	0,44444444			
Total	4,8888888	8				

Tabla 39. Códigos asignados a los resultados de estabilidad, obtenidos en los túneles populares de Guantánamo.

Clasificación	Margas	Tufitas	Calizas Tobáceas	Areniscas de granos finos
Deere	1	2	2	3
Bieniawski	3	3	3	3
Barton	4	4	4	4
Bulichev	4	3	3	3

Tabla 40. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Guantánamo.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	8,1875	3	2,72916667	9,585	0,0036577	3,862538
Columnas	0,1875	3	0,0625	0,219	0,8804435	3,8625387
Error	2,5625	9	0,28472222			
Total	10,9375	15				

Tabla 41. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Guantánamo, sin tener en cuenta a Barton.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	3,5	2	1,75	4,2	0,0723379	5,1432493
Columnas	0,25	3	0,08333333	0,2	0,8927380	4,7570551
Error	2,5	6	0,41666667			
Total	6,25	11				

Tabla 42. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Guantánamo, sin tener en cuenta a Bulichev.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	8	2	4	18	0,0029154	5,1432493
Columnas	0,6666666	3	0,22222222	1	0,4547247	4,7570551
Error	1,3333333	6	0,22222222			
Total	10	11				

Tábla 43. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Guantánamo, sin tener en cuenta a Bieniawski.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	8,1666666	2	4,08333333	9,8	0,0128746	5,1432493
Columnas	0,25	3	0,08333333	0,2	0,8927380	4,7570551
Error	2,5	6	0,41666667			
Total	10,9166667	11				

Tabla 44. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Guantánamo, sin tener en cuenta a Deere.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	2,1666666	2	1,08333333	13	0,0065918	5,1432493
Columnas	0,25	3	0,08333333	1	0,4547247	4,7570551
Error	0,5	6	0,08333333			
Total	2,9166666	11				

Tabla 45. Códigos asignados a los resultados de estabilidad, obtenidos en los túneles populares de Moa.

Clasificación	Serpentinita de color verde grisáceo meteorizada	Serpentinita de color verde oscuro fresca
Deere	3	3
Bieniawski	3	2
Barton	5	4
Bulichev	3	3

Tabla 46. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Moa.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	4,5	3	1,5	9	0,0520440	9,2766185
Columnas	0,5	1	0,5	3	0,1816901	10,127962
Error	0,5	3	0,16666667			
Total	5,5	7				

Tabla 47. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Moa, sin tener en cuenta a Barton.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	0,3333333	2	0,16666667	1	0,5	19,000026
Columnas	0,1666666	1	0,16666667	1	0,4226497	18,512764
Error	0,3333333	2	0,16666667			
Total	0,8333333	5				

Tabla 48. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Moa, sin tener en cuenta a Bulichev.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	4,3333333	2	2,1666667	13	0,0714285	19,000026
Columnas	0,6666666	1	0,6666667	4	0,1835034	18,512764
Error	0,3333333	2	0,1666667			
Total	5,3333333	5				

Tabla 49. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Moa, sin tener en cuenta a Bieniawski.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	3	2	1,5	9	0,1	19,000026
Columnas	0,1666666	1	0,1666667	1	0,4226497	18,512764
Error	0,3333333	2	0,1666667			
Total	3,5	5				

Tabla 50. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad en los túneles populares de Moa, sin tener en cuenta a Deere.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	4,3333333	2	2,1666667	13	0,0714285	19,000026
Columnas	0,6666666	1	0,6666667	4	0,1835034	18,512764
Error	0,3333333	2	0,1666667			
Total	5,3333333	5				

Tabla 51. Asignación de códigos a los resultados de estabilidad obtenidos en la mina Amores

Clasificación	Harzburgitas	Cromitas	Dunitas
Bieniawski	2	2	3
Bulichev	2	3	4
Deere	1	1	1
Barton	4	4	4

Tabla 52. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina Amores.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	6,22	2	3,111111111	11,2	0,02295684	6,944276
Columnas	1,55	2	0,777777778	2,8	0,17361111	6,944276
Error	1,11	4	0,277777778			
Total	8,88	8				

Tabla 53. Análisis de varianza de los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la mina Amores, sin tener en cuenta a Barton.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	14,25	3	4,75	19	0,00182081	4,757055
Columnas	1,1667	2	0,583333333	2,333	0,17797851	5,143249
Error	1,5	6	0,25			
Total	16,916	11				