

**INDICACIONES METODOLÓGICAS PARA LA ELECCIÓN DEL
MÉTODO DE ARRANQUE DE LAS ROCAS DURANTE EL
LABOREO DE EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS
HORIZONTALES DE PEQUEÑA Y MEDIANA SECCIÓN EN
CUBA ORIENTAL**

(RESUMEN DE TESIS DOCTORAL / 2003)

Rafael ROLANDO NOA-MONJES / rnoa@ismm.edu.cu

Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico

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 en opción al título de “Máster 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 suficiente 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.

Objetivo general

Obtener un sistema de indicaciones metodológicas que permita 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

1. Caracterizar geomecánicamente los macizos rocosos.
2. Determinar la bloquicidad de los macizos rocosos.
3. 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.

CAPÍTULO 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. 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.

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. El estudio integral del macizo incluye tanto el modelo geológico como el geomecánico, lo que 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.

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. En el año 1964 Deere propone una clasificación para el macizo (Blanco, 1981, 1998, González de Vallejo, 1998 y López Jimeno, 1999), basada en la recuperación de testigos de perforación, denominada sistema RQD (Rock Quality Designation), índice de calidad de las rocas.

En esta etapa surgieron también los trabajos de Hagerman (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 isótropos) hasta aquellos muy inestables, que presentan un gran número de discontinuidades.

En 1972, surge un nuevo método para clasificar geomecánicamente las rocas, propuesto por Wickham, Tiendemain y Skinner (Blanco 1998). Esta clasificación surge con el nombre de RSR (Rock Structure Rating). En la misma década, Bieniawski (1973) propone su clasificación, cuya modificación fue concluida en el año 1979). En ella se establece una cuantificación de la calidad del macizo rocoso, mediante el índice RMR (Blanco, 1998 y López Jimeno, 1997,1999).

En el año 1974 fue propuesto por el Instituto Geotécnico Noruego (Barton, Lien y Lunde, 1974) un sistema para valorar la calidad del macizo, el cual se fundamenta en la determinación de un índice denominado 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 (Ramírez y Huerta, 1994; Moreno, 1998; González 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 de los parámetros estudiados, como el de los resultados finales obtenidos con el empleo de estas clasificaciones han de ajustarse a las condiciones concretas de la zona estudiada.

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.

En la década del 80 del siglo XX surgieron nuevas clasificaciones, como el RMI (Rok Mass Index), propuesto por Palmstrom en 1996, a partir de la resistencia a la compresión simple de las rocas. Este índice permite caracterizar 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 Clasiffication), 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.

La primera clasificación de los macizos rocosos respecto a la excavabilidad, fue propuesta por Franklin en 1971. Se basa en el espaciamiento entre fracturas y la resistencia a la compresión simple de las rocas, parámetros que son obtenidos de los testigos del sondeo. Louis en 1974 presentó una clasificación basada en el RQD y la resistencia a la compresión simple de las rocas, pero 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.

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, esta clasificación es indicativa y debe usarse en la fase de estudios previos o anteproyectos de obras.

En 1982 Kirsten propone un sistema de clasificación para la excavación de los macizos rocosos, basado en la determinación de un índice de excavabilidad. Abdullatif y Crudden (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 mejores o de calidad buena el sistema RMR deben ser objeto de perforación y voladura, estos autores 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, lo que 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 (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 parámetros que también influyen en el proceso de arranque.

1. 2 Situación actual del tema en Cuba

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 la elección del método de arranque más eficiente.

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.

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos en los últimos años se ha incrementado notablemente. Este incremento 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 las zonas donde se construye el trasvase Este - Oeste, donde se utilizó para la evaluación de la estabilidad del macizo la metodología de Bieniawski, modificada por Federico Torres 1989, las metodologías de Barton y la de Deere, así como otros métodos novedosos para el estudio del macizo, el procesamiento de imágenes por teledetección y métodos geofísicos (Colectivo, 1991. Colectivo, 1992. Hidalgo, 1991. Pérez, 1991).

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.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede observar que 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 que 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 someterse a 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 del mismo nombre 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.
- La mina de cromo Amores, ubicada cerca del poblado de Cayo Güin en el municipio de Baracoa, provincia de Guantánamo.

1.4 Planeación de la investigación

Para darle cumplimiento a los objetivos propuestos en este trabajo, se estableció una metodología integral de investigación, que incluyó varias etapas (figura 1):

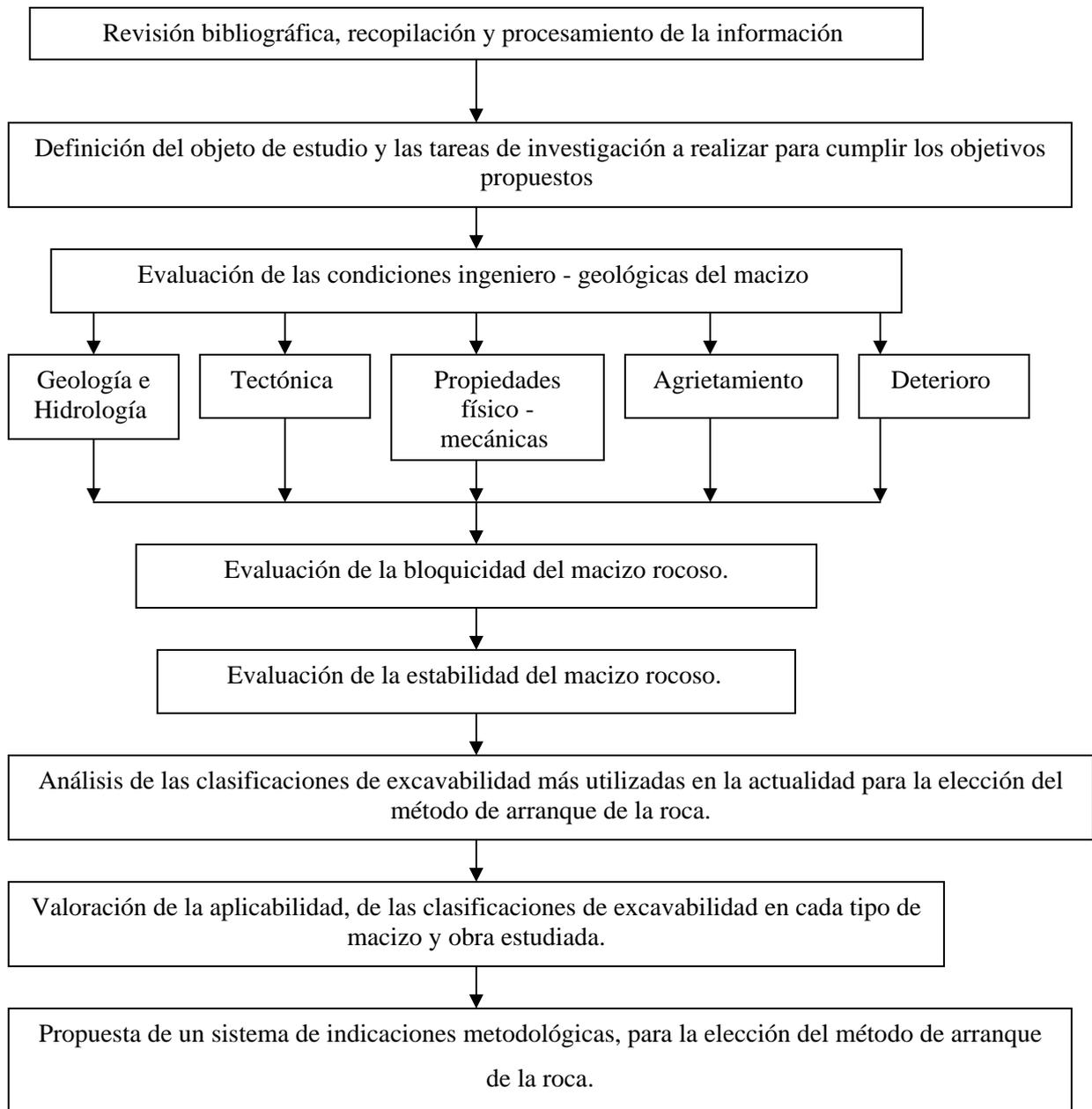
- Revisión bibliográfica, recopilación y procesamiento de la información.
- Definición del objeto de estudio y las tareas de investigación a realizar para cumplir los objetivos propuestos.
- Evaluación de las condiciones ingeniero – geológicas del macizo rocoso.
- Evaluación de la bloquicidad del macizo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

Revisión bibliográfica, recopilación y procesamiento de la información

En esta etapa se estudiaron diferentes textos en los que se aborda esta problemática, los artículos publicados en diferentes revistas, varias tesis de maestrías y doctorados y varios trabajos de diplomas. También fueron consultados algunos trabajos presentados en eventos, los informes geológicos y de propiedades de las rocas de diferentes entidades, así como información sobre el tema publicada en Internet.

Definición del objeto de estudio y las tareas de investigación

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.

**FIGURA 1.** Metodología de investigación.

Evaluación de las condiciones ingeniero - geológicas del macizo rocoso

Se realizó un análisis de cada macizo rocoso, teniendo en cuenta los aspectos que inciden en el proceso de elección del método de arranque de las rocas, como son: condiciones geológicas e hidrogeológicas de los macizos, características tectónicas de cada región de estudio, propiedades físico – mecánicas de las rocas, agrietamiento y deterioro del macizo rocoso.

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 era 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 uno de ellos.

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.

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 que actualmente se utilizan para obtener criterios sobre la elección del método de arranque de la roca.

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 analizadas se puede usar para cada tipo de macizo y obra, con vista a obtener un criterio preliminar sobre el método de arranque adecuado.

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 elección del método de arranque de la roca.

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS DE LOS MACIZOS ESTUDIADOS

2.1 Ubicación geográfica de las zonas estudiadas y características técnicas de las obras

Mina Las Merceditas

La mina Las Merceditas se encuentra ubicada en el noreste de la provincia Holguín, a 46 km de la ciudad de Moa, dentro del macizo montañoso Sagua - Baracoa. La vía de comunicación con el yacimiento es mediante terraplenes y carreteras.

Los trabajos de investigación se realizaron en todo el sector de la mina, eligiéndose para el mismo las excavaciones horizontales que se consideraron más representativas. Las excavaciones están laboreadas en diferentes tipos de rocas, tales como gabro, peridotita y dunita y tienen una longitud variable, sobrepasando los 100 m en todos los casos. Generalmente su sección transversal es de paredes rectas con techo abovedado, un ancho entre 2 y 2,30 m y una altura de 2,10 a 2,30 m. La profundidad de ubicación es variable llegando en algunos casos hasta los 600 m.

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 al oeste de esta ciudad. La vía de acceso son las carreteras, las cuales enlazan esta zona con la capital provincial y el resto del país.

Para el estudio se escogieron las excavaciones horizontales que fuesen más representativas para todo el sector de la mina. Estas excavaciones se laborean en rocas tobáceas; las mismas tienen un ancho que oscila entre 2,2 y 2,3 m y un alto entre 2,3 y 2,5 m; la forma de la sección transversal es de paredes rectas con techo abovedado y se encuentran generalmente a una profundidad de 200 a 400 m. En algunos casos las excavaciones están fortificadas.

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. Las obras se encuentran ubicadas cerca de varios poblados como son Arroyo del Medio, Seboruco, Arroyo Seco y otros.

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 35 m², los mismos tienen una longitud variada, las que dependen de las dimensiones de la elevación donde esté situado el mismo, la sección transversal es de paredes rectas con techo abovedado o semicircular, su ancho es de 4 a 5 m y tienen una altura de 5 a 6 m, los mismos se encuentran ubicados a una profundidad de 200 a 450 m y se laborean con el método de perforación y voladura. Estos túneles se fortifican con hormigón armado.

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.

Para el estudio del macizo de Holguín, varias excavaciones o túneles fueron analizados, los cuales se laboreaban en rocas del grupo de las serpentinas. Estos túneles tienen una longitud muy variada, así como su profundidad, la que oscila entre 200 y 300 m, 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 2,50 m.

Túnel hidrotécnico 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. Tiene una forma de la sección transversal de paredes rectas con techo abovedado, una longitud aproximada de 500 m, la profundidad a la que se encuentra esta excavación es de 30 a 50 m, esta tiene un ancho de 2,20 a 2,40 m y una altura de 2,30 a 2,50 m.

Túneles populares de Guantánamo

Los túneles estudiados de la provincia de Guantánamo se encuentran ubicados en un macizo de rocas sedimentarias. Para el estudio de este macizo fueron analizados varios túneles, los que tienen una longitud muy variada y la misma depende de las características del macizo rocoso. 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.

Túneles populares de Moa

Se ubican en las cercanías de la ciudad de Moa. Fueron analizadas varias excavaciones, las que se laborean en rocas pertenecientes al grupo de las serpentinas. Estos túneles tienen una longitud muy variada y su profundidad de ubicación oscila entre 100 y 150m, la forma de la sección transversal 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.

Mina Amores

La mina Amores está ubicada en el municipio Baracoa. El proceso de extracción del mineral se realiza a través de un socavón, única excavación que reúne las condiciones necesarias para los análisis. La forma de la sección transversal es de paredes rectas con techo abovedado, con un ancho entre 2,2 y 2,5 m y una altura entre 2,3 y 2,8 m; se encuentra a una profundidad de 200 a 350m aproximadamente.

2.2 Geología e hidrogeología de los macizos rocosos estudiados

Mina Las Merceditas

Este macizo 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.

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 (colectivo, 1996. Proenza, 1997. Iturralde, 1978, 1990).

Mina El cobre

Este macizo se relacionan con el producto de la actividad postmagmática de la instrucción de la Sierra Maestra.(Barrabí,1994). El mismo es de tipo hidrotermal, 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. 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.

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 – serpentinado.

El primer complejo está constituido por calizas, margas, conglomerados y otros. 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 (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 (Hidalgo, 1991; Morales, 1990).

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 (Rosales, 1996).

Las características hidrogeológicas de la región de estudio, están muy relacionadas con las precipitaciones atmosféricas, esta región se encuentra enmarcada en un relieve llano, la red hidrográfica de la región está 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, existe un proceso de formación de grietas las que se comienzan a registrar a poca profundidad.

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

Este macizo está conformado por varios 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. 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.

Debido a las características higroscópicas de las rocas, gran cantidad del agua procedente de las precipitaciones 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, durante la época de lluvia se forman algunos arroyos o cañadas que solo permanecen con un caudal durante ese periodo (Noa, 1996).

Túneles populares de Moa

El área se caracteriza, fundamentalmente por la intensidad con que actúan los procesos de meteorización, destacándose en gran medida el interperismo 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.

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. Una de las características geológicas que marca la cercanía de la transición entre los complejos es la aparición de numerosos diques de 5 a 20cm de espesor, generalmente concordantes con las capas de ultramafitas.

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.

2.3 Análisis de la tectónica de los macizos estudiados

Los macizos donde se ubican las obras estudiadas, por lo general presentan una gran actividad tectónica, las dislocaciones están representadas por zonas de fragmentación y agrietamiento abierto, en los mismos aparecen algunas fallas con direcciones muy variadas.

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 (Campo, 1989).

2.4 Propiedades físico – mecánicas de las rocas

Los resultados de las propiedades que se utilizan en este trabajo fueron tomadas de diferentes informes, Tesis de maestrías y doctorales (Colectivo,1996; Cartaya, 2001; 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 anteriormente determinadas y que se consideran importantes 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.

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%.

2.5 Evaluación del agrietamiento de los macizos estudiados

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.

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. 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. Otro de los aspectos analizado fue la direcciones de los sistemas de grietas, para lo cual se construyo el diagrama de roquetas de cada obra estudiada, con la ayuda del programa georient.

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, 2001; Falero, 1996; Mondejar, 2001; Ugalde, 2000; González, 1995).

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, 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.

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.

En este macizo aparecen de dos a tres sistemas de grietas principales, más algunas grietas aleatorias o complementarias. La distancia promedio entre las grietas es de 300 a 500 mm, estas 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.

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).

En este macizo podemos apreciar la existencia de tres sistemas de grietas, más algunas grietas aleatorias, la distancia entre estas grietas es de 100 a 300m como promedio, las mismas se clasifican en grietas continuas, onduladas y rugosas y están rellenas con partículas arcillosas consolidadas, las paredes están ligeramente alteradas, la afluencia de agua es muy baja, excepto en algunos tramos donde el caudal es elevado, las aberturas tienen un ancho de 2 a 6mm.

Túneles populares de Holguín

En este macizo rocoso fueron estudiados varios túneles: 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).

En este túnel se pueden encontrar de dos a tres sistemas de grietas principales, así como algunas grietas complementarias, la distancia promedio entre las grietas es de 100 a 500 mm, las grietas se clasifican como continuas, planas y rugosas o lisas 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 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.

Este macizo se caracteriza por tener bien definido tres sistemas de grietas, la distancia promedio que existe entre ellas es de 150 a 300 mm, las mismas se caracterizan por ser continuas, planas y rugosas, las aberturas 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.

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 puede 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 2 174 grietas en 104 estaciones de medición.

En este macizo aparecen de tres a cuatros 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 grietas 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.

Mina Amores

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 este macizo se definen cuatro sistemas de grietas más algunas grietas complementarias, el espaciamiento entre las grietas está en el rango de 200 a 300 mm, en este tramo las grietas son continuas, onduladas y rugosas a lisas, 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.

Los resultados obtenidos del estudio del agrietamiento para los diferentes macizos rocosos, se muestran en las tablas de la 1 a la 8 del anexo, 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%.

2.6 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 en la valoración del tamaño, forma y disposición espacial de los bloques, al igual que en el comportamiento del macizo. Palmstrom, 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.

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 los macizos estudiados se muestran en las tablas de la 9 a la 16 del anexo. En ellas se señala el valor promedio de los resultados obtenidos por cada método y su variación.

Teniendo en cuenta el análisis realizado y los resultados de cada método se obtiene que en los macizos ofiolíticos y sedimentarios, 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 y para 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.

2.7 Análisis del grado de deterioro de los macizos rocosos

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 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.

2.8 Análisis de las condiciones de estabilidad en los macizos rocosos estudiados

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:

- Clasificación de Deere, que se basa en la determinación de un índice de calidad de las rocas el RQD.
- Clasificación que se basa en el RMR (*Rock Mass Rating*) propuesto por Bieniawski (versión corregida de 1979) (Bieniawski, 1979; Moreno, 1998).
- 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, 1974 y Vallejo, 1998).
- Clasificación basada en el índice S propuesto por Bulichev (Blanco,1998; Martínez Silva, 2000).

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 en un amplio rango, esto implica que no se pueda realizar una caracterización del comportamiento de la estabilidad del conjunto macizo excavación, ocurriendo así para otras obras.

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 de la 17 a la 40 del anexo, 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 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.

De los resultados del análisis de varianza realizado para las excavaciones laboreadas en los macizos estudiados 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), las probabilidades son menores que el 5% (nivel de significación que se usa generalmente).

De los resultados obtenidos por el análisis de varianza, se recomienda que para evaluar la estabilidad de las obras en los macizos ofiolíticos, se puede utilizar la clasificación de Bieniawski, para las excavaciones laboreadas en el macizo El Cobre, se puede utilizar cualquiera de las clasificaciones propuestas y para los túneles populares laboreados en el macizo de rocas sedimentarias de la provincia de Guantánamo, se recomienda que se puede utilizar cualquiera de las clasificaciones propuestas excepto la de Barton.

2.9 Conclusiones del capítulo

Se hace un estudio detallado de las propiedades físico - mecánicas de las rocas, y en los casos que se considera necesario se realiza por el autor, estudios adicionales de estas propiedades, y de otras que anteriormente no habían sido determinadas en estos macizos (Dureza y Abrasividad). El estudio del agrietamiento se debe realizar por tramos litológicos iguales, con una longitud de 9 a 25 m 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, para los macizos ofiolíticos y el macizo de la formación el cobre el 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 a media y para el macizo de rocas sedimentarias la estabilidad de las rocas se clasifica de media a mala.

CAPÍTULO III

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

3.1 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 (Abdullatif y Crudden, 1983; Bell, 1987; Franklin, 1971, 1997; Kirsten, 1982; Louis, 1974; Romana, 1981, 1997, 1994; López, 1997, 1999) que más se emplean en la actualidad son:

- 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 1 del anexo.
- Clasificación propuesta por Franklin, que se basa en los valores del espaciamiento entre las grietas (Eg) y los valores de la resistencia a la compresión simple de las rocas (Rc), ver figura 2 del anexo.
- 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 (Rc) en (Mpa), ver figura 3 del anexo.
- 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 1.

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

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 y Js - resistencia estructural del macizo.

TABLA 1. 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

- 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 (R_c) en (Mpa), así como en una clasificación de los terrenos respecto a la excavabilidad mecánica en túneles ver figura 4 del anexo y tabla 2.

TABLA 2. Clasificación de los terrenos respecto a la excavabilidad

Zonas	Topos		Rozadoras			Martillo escarificador	Pala Traílla
	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

- 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, y la tabla 3.

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

Donde: I_s - Resistencia bajo carga puntual, B_s - Tamaño de bloque, W - Grado de alteración del macizo rocoso y J_s - Índice de disposición estructural relativa.

TABLA 3. 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

- 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 y la tabla 4.

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

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 4. 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

3.2 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.

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.

Abdullatif y Crudden, no es recomendable emplearla en este tipo de macizo, ya que presenta una serie de limitaciones: Los valores del RMR son estimados y no existe una adecuación correcta del sistema Q, no se tiene en cuenta el valor de la resistencia del macizo, siendo usado el valor de la resistencia lineal de las rocas, siendo este factor

uno de lo que mayor influencia tiene en el proceso de destrucción y por consiguiente en el arranque de las rocas.

La propuesta por Franklin, 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 ellos presentan, además el agrietamiento, que en la mayoría de los casos es considerable afecta los valores del RQD, no se considera la resistencia del macizo.

La clasificación propuesta por Louis, presenta las siguientes limitantes: En esta clasificación se propone utilizar los valores de la resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados de la resistencia del macizo que es mucho más confiable y que en este caso permite valorar mejor el comportamiento real de estos durante el proceso de arranque, además no se realiza un análisis de las maquinarias, 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 de este macizo.

La clasificación propuesta por Kirsten presenta las siguientes limitaciones: 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 su dirección, siendo este último un factor que en esta clasificación no se tiene en cuenta con un nivel de ponderación adecuado, además no se valora el grado de humedad de las rocas, la que en algunos sectores de estos macizos es considerable 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 en algunos casos o sectores es posible.

La clasificación de Romana, no tiene en cuenta factores importantes tales como: la humedad de las rocas, la que en algunos sectores es considerable, por lo que tiene 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 juega en este proceso se considera que el estudio es insuficiente.

La clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble, no se puede aplicar con una buena exactitud en los resultados, dado el hecho de que teniendo 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, además 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 la resistencia de las rocas bajo carga puntual, cuando lo correcto sería utilizar los valores de la resistencia del macizo que son mucho más confiables y 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, ya que en las diferentes zonas estudiadas el macizo no se manifiesta de forma estratificada, además no se realiza una valoración detallada del agrietamiento, siendo este otro de los parámetros que mayor influencia tiene en el comportamiento mecánico - estructural de este macizo.

Macizo de la formación El Cobre

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 como se adecuan estas clasificaciones a este comportamiento.

La clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden, no es recomendable emplearla en este 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, otro 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.

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.

La clasificación propuesta por Louis presenta las siguientes limitaciones: 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 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.

La clasificación de excavabilidad propuesta por Kirsten tiene también limitaciones, que se relacionan con el comportamiento geo – estructural de este macizo. El agrietamiento en este macizo se comporta con determinado grado de intensidad en algunos sectores lo que provoca que el mismo esté muy fragmentado, influyendo 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 y este es otro de los parámetros de este macizo que mayor influencia tiene en el proceso.

La clasificación de Romana, también se considera que presenta limitaciones, entre ellas: se propone utilizar los valores de resistencia de las rocas, cuando lo correcto sería emplear los valores estimados del macizo que en este caso es mucho más confiable y que permite valorar con mayor exactitud el comportamiento real del macizo, 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 mayor influencia tiene en el proceso.

La clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble, también presenta limitaciones. En este macizo teniendo en cuenta las características del agrietamiento, el que se comporta con determinado grado de intensidad en algunos sectores y en otros no, lo que provoca que la bloquicidad como 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.

La clasificación propuesta por Scoble y Muftuoglu, presenta limitaciones muy parecidas a la clasificación anterior; 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 este macizo no se manifiesta con claridad o la magnitud con que el mismo influye en el comportamiento de la roca es muy baja, 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

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.

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, no se tiene en cuenta la estratificación del macizo, la bloquicidad, la humedad, ni el grado de deterioro de las rocas.

Al igual que la anterior clasificación, la propuesta por Louis tampoco se puede utilizar en este macizo; 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, 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.

La clasificación de excavabilidad propuesta por Kirsten tiene también limitaciones; 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, la bloquicidad ni el grado de deterioro de las rocas, siendo estos los elementos que mayor influencia tienen en el proceso de arranque, tampoco se realiza un análisis que permita definir el tipo de maquinaria a emplear en caso de que el arranque se realice con métodos mecánicos, lo que teniendo en cuenta las características geo – estructurales del macizo es muy evidente.

La clasificación de Romana, presenta limitaciones, 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, no se realiza una valoración de la

estratificación, la bloquicidad ni el grado de deterioro, que son los parámetros que realmente controlan el comportamiento del macizo.

La clasificación propuesta por Hadjigeorgiou y Scoble, también presenta algunas limitaciones. 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, 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.

La clasificación propuesta por Scoble y Muftuoglu, presenta limitaciones muy parecidas a la clasificación anterior; 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 el proceso de arranque, tampoco se realiza un análisis que permita definir el tipo de maquinaria a emplear en caso de que el arranque se realice con métodos mecánicos, lo que es muy evidente.

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis realizados anteriormente, para determinar cuáles 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.

3.3. 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.

Análisis de las características ingeniero - técnicas de la obra

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

Se debe de analizar su forma y dimensiones, para poder determinar las características de los instrumentos de corte en 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 determinar que 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 grietas, en la dirección de laboreo de esta, pudiendo definir con esto el lugar más adecuado al respecto.

Se debe 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.

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 topos de rocas que lo integran, las diferentes estructuras, los elementos de yacencia de estas estructuras, se debe realizar un análisis de los fósiles para conocer la edad de las rocas y las características de estas. Hay que hacer fundamental énfasis en el deterioro del macizo provocado por los diferentes agentes de interperismo y como influye este proceso en el comportamiento de las propiedades y en el proceso de arranque de las rocas.

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 debe realizar a partir de la determinación de las propiedades que sean de interés o necesario su conocimiento para llevar a cabo la investigación, para ello se debe realizar el análisis de los trabajos realizados para 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 sus propiedades, mediante ensayos de laboratorio o en condiciones naturales (in situ). La determinación de las propiedades se debe de 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 grietas, distancia entre las grietas, ancho, relleno y características de estas, dirección de

los principales sistemas, así como la existencia de grietas complementarias), este análisis se debe realizar a partir de la utilización del método geológico en excavaciones de exploración, el análisis de muestras de sondeo, 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 estudio 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 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 como 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 puede determinar las direcciones de los principales sistemas de grietas.

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

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 todo este análisis 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 de 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 de emplear están: el método para determinar el volumen del bloque a partir de la frecuencia de las grietas (Na), 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 m³, 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 de determinar el tipo y forma de los bloques teniendo en cuenta la distancia entre las grietas de cada familia.

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 cuenta 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 de 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 de 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.

3.4. 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 Cuba, se emplea, en muchos casos 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 se aporta un sistema de indicaciones metodológicas, que permiten determinar el método de arranque en otros macizos con similitud en sus características. En nuestro país aun 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.

3.5 Conclusiones del capítulo

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, cuales de estas clasificaciones, son factibles de empleo en el marco de contribuir con una adecuada

elección del método de arranque de la roca. Se propone un sistema de indicaciones metodológicas que permite garantizar una adecuada y fundamentada elección del método de arranque de la roca.

CONCLUSIONES

1. Se define para cada tipo de macizo rocoso estudiado, cuáles son los métodos para determinar la bloquicidad que se deben 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.
2. 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.
3. Se fundamenta el hecho de que ningunas 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 cuales de estas clasificaciones son factibles de usar en cada tipo de macizo rocoso estudiado.
4. 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

1. 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 medianas sección en el resto del país.
2. Valorar el desarrollo de un trabajo similar, pero orientado a los trabajos en canteras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- ALMAGUER, CARMENATE. Y.,** Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentinitico de Moa. Tesis de maestría. ISMMANJ. 2001.
- 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.
- BARTON, N, R.,** A model study or rock Joint deformation. *International Journal of rock Mechanic Geomechanics Abstracts*. Vol 9, No. 5, Septiembre. 1972.
- BARTON, N, R.,** A relationship between of rock joints. *International Rock Mechanical*, Vol 13. 1976.
- BARTON, N, R Y OTROS.,** Strengh, deformation and conductivity coupling of rock joint, Vol 22. *International Rock Mechanical*, 1985.
- 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.

- BARTON, N.**, Scale effects or sampling bias. Proc in Workshop Scale Effects in Rock Masses, 31 – 55. Rotterdam Balkema. 1990.
- BARTON, N, R Y CHOUBEY.,** A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Ed. E. Brooch. 1974.
- BELL, F. G.,** Ground engineers reference book. Ed. Butterworths. Londres. Chap. 39. “open excavation”. 1987.
- 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.
- BIENIAWSKI. Z. T.,** Geomechanics classification of rock masses and its application to tunnelling. *Proc. II. Int. Congress for Rock Mechanics*. ISMR. Vol II. 1979.
- BLAISDELL, Z. T.** Statistics in practice. Saunders Collage Publishing. New York. 653p. 1992.
- BLANCO, T. R.,** Mecánica de rocas: Oriente, Santiago de Cuba. 1981.
- 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.
- BLANCO, T. R Y E. RODRÍGUEZ.,** Características de formación de rocas destruidas en el techo de las excavaciones. *Minería y geología*. No 2, Cuba. 1988.
- BLANCO, T. R.,** Estudio de la estabilidad y la presión minera en las excavaciones subterráneas: Universidad Nacional de Loja, Ecuador. 1993.
- 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.
- BLANCO, T. R.,** Elementos de la mecánica de los medios rocosos: Félix Varela, La Habana, 1998.
- 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.
- BLANCO, T. R Y CARTAYA, P. M.,** Estimación de la resistencia de las rocas. *Minería y Geología* (Moa). No. 1. 2000.

- BLUMAN, A.**, Elementary statistics a step by step approach. Wm. C. Brown publishers. Washington. 713p. 1998.
- BORISOV. A. A.**, Mecánica de rocas y de los macizos: Nedra, Moscú. 1986.
- BULICHEV. N. S.**, Mecánica de obras subterráneas: Nedra, Moscú. 1982.
- CARTAYA, P. M.**, Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina Las Mercedes. Tesis de Maestría. ISMMANJ. 1996.
- CARTAYA, P. M Y BLANCO, T. R.**, Modelos geomecánicos del macizo rocoso en la mina de cromo Las Mercedes. *Minería y Geología* (Moa). XVI (2): 47 – 52, 1999.
- 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.
- CARTAYA, P. M.**, Caracterización geomecánica de macizos rocosos de la región Oriental de Cuba. Tesis Doctoral. ISMMANJ. 2001.
- CASSONGO, A. S.**, Criterio para la evaluación de la estabilidad del macizo rocoso en la mina Las Mercedes. Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 2000.
- CASTILLO, GONZÁLEZ. J; I, MUNDI. M.**, Estudio geólogo – tectónico de la región de Moa. Trabajo de Diploma, ISMMANJ.1993.
- CASTRO. O.**, Mecánica de rocas aplicada a la construcción: Científico Técnica, La Habana. 1989.
- COLECTIVO DE AUTORES.**, Informe ingeniero - geológico, Tránsito Este – oeste (Melones - Sabanilla): Túnel Seboruquito – Esperanza. ENIA – Holguín, Junio, 1991.
- 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.
- COLECTIVO DE AUTORES.**, Informe Ingeniero - Geológico. mina Las Mercedes. Moa. Cuba, 1996.
- COLECTIVO DE AUTORES.**, Informe geológico Mina Amores.1997.
- COLECTIVO DE AUTORES.**, Informes Ingeniero – Geológicos de los túneles populares del municipio Holguín. Estado Mayor Provincial de la defensa Civil – Holguín, 1998.
- CORREOSO, C. A.**, Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la mina Amores. Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 1997.

- CORNEJO, L.**, Excavación mecánica de túneles. Ed. Rueda, Madrid. Apéndice III. 1988.
- COTILLA, R. M; O, BANKWITZ Y OTROS.**, Cinemática Neotectónica de Cuba Oriental
Rev. Soc. Geológica de España, 11 (1 - 2): 33 – 42. 1998.
- 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.
- CUESTA, R. A.**, Impermeabilización de obras subterráneas. Tesis de Maestría. ISMMANJ, Moa. 1997.
- DEERE, D.**, Indexing Rock machine tunnelling. Proc of tunnel and Shaft. Conf. Minneapolis. 1979.
- 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.
- ESTEFANÍA, P. S.**, Túneles hidrotécnicos. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 345 – 369p. 1998.
- FALERO, S. F.**, Geometría del agrietamiento del macizo rocoso de mina Las Mercedes y su estabilidad. Tesis de Maestría. ISMMANJ.1996.
- FRANKLIN, J. A.**, Logging the mechanical character of rock. Trans. Inst. Min. Metall, No 80. Section A. Mining Industry, A 1- 9. 1971.
- FRANKLIN, J. A.**, Rock Quality in Relation of the Quarrying and Performance. 2do International Congress of the international association of Engineering Geology. Sao Paulo. Brasil. 1974.
- FRANKLIN, J. A.**, Rock engineering. Ed. Mc G Hill Canada. 578p.1994.
- FRANKLIN, J. A.**, The monitoring of structures of rock. International journal or Rock *Mechanic Geomechanics Abstracts*. Vol 14, No.4, Julio. 1997.
- FREUD, J.; SIMON, G.**, Modern elementary statistics. Prentice Hall.8va edición. New Jersey. 578p. 1992.
- FURRAZOLA. B. G Y K. NÚÑEZ.**, Estudios sobre geología de Cuba: Instituto de Geología y Paleontología. Ciudad de la Habana, 527p. 1997.
- 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.
- GONZÁLEZ. N.**, Caracterización del agrietamiento en la Mina Las Mercedes. Trabajo de Diploma. Cuba. 1995.

- GUILLERMO, A. R.**, Criterios para el diseño de la cámaras y pilares en la mina Las Mercedes. Tesis de maestría. ISMM, Departamento de Minería. 1998.
- GULLÓN, BUCETA. A.**, La calidad en obras subterráneas. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 397 – 416p. 1999.
- GUARDADO, L. R.**, Ingeniería geológica e ingeniería petrológica: Pueblo y Educación – Habana, 348p. 1986.
- GUTIÉRREZ, G. L.**, Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de las minas las Mercedes y Amores. Trabajo de Diploma. ISMM. 1996.
- HADJIGEORGIOU, J Y SCOBLE, M.**, Ground Characterization for assessment of ease of excavation. Mine Planing and equipment Selection. Calgary, Canadá. 1990.
- HIDALGO, H. A Y OTROS.**, Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Túnel En medio – Guayabo. INRH – Holguín, Junio, 1991.
- HIDALGO, N. E.**, Propuesta de utilización del espacio subterráneo con fines económicos y sociales en la ciudad de Holguín, Trabajo de Diploma. ISMMANJ. 1996.
- HOEK, E AND BROWN, E. T.**, Underground Excavations in rock- London: The Institution of mining and Metallurgy, 527p. 1980.
- HOEK, E AND BROWN, E.T.**, Empirical strength criterous for rock masses. Geotechnical Engineering, 1003 – 1035p, 1988.
- HOEK, E AND BROWN, E.T.**, Practical estimates of rock mass strength. Miting of Rock Mechanic, London, 1999.
- HOEK, E. KAISER, P. K AND BAWDER, W.F.**, Support of underground excavations in hard Rock: A, Balkema Rotterdam, 1995.
- 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.
- ITURRALDE - VINENT, M.**, Las ofiolitas en la constitución geológica de Cuba. *Revista Ciencia de la Tierra y El Espacio.* (17) 8 – 26. 1990.
- JOAO, P. A.**, Caracterización mecánico – estructural del macizo rocoso de la mina subterránea “El Cobre”, Santiago de Cuba. Trabajo de Diploma. ISMMANJ, 1998.
- KILIC. R.**, Geomechanical Properties of the ofiolites and alteration degree of diabase. Bulletin of international association of engineering geology. April, 51, 63 – 71p, 1995.
- KIRSTEN, H, A. D.**, A classification system for excavation in natural materials. Civ. Eng. S. Africa. July, 1982.

- LAROSI, H. M. ALÍ.,** 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.
- 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.
- LLORENTE. E Y OTROS.,** Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Canal Bitirí - Sabanilla. INRH – Holguín, Junio, 1991.
- LÓPEZ JIMENO, C.,** Manual de túneles y obras subterráneas. Graficas Arias Montano. S. A. ETSIM. MOSTOLE. Madrid. 1997.
- LÓPEZ JIMENO, C.,** Ingeo túneles (Serie: Ingeniería de Túneles). Libro 2. Graficas Arias Montano. S. A. ETSIM. MOSTOLE. Madrid. 1999.
- LOUIS, C.,** Reconnaissance par sondages dan les roches. Annales de institu tech. Du Batiment et des travaux public. No 319. 1974.
- 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.
- MARTÍNEZ, S. R.,** Construcciones subterráneas. Universidad de pinar del Río, 63p, 1999.
- 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.
- 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.
- MONDEJAR, O. O.,** Propuesta de sostenimiento para excavaciones subterráneas bajo la influencia sísmica en la región Oriental de Cuba. Tesis Doctoral. ISMMANJ. 2001.
- MONTALVO, S. F Y OTROS.,** Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Canal Guaro - Manacal. INRH – Holguín, Junio, 1991.

- 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.
- 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.
- NAVY, U. S.**, Foundations and earth structures. Desing Manual 7.02. Washington.1986.
- NOA, MONJES. R.**, Elección del método de arranque con el uso de las clasificaciones geomecánicas: Tesis de Maestría, ISMMANJ.1996.
- 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.
- NOA, MONJES. R.**, Criterios para la elección del método de avance en las excavaciones horizontales. *Geología y Minería*, (4), 2003.
- NOA, MONJES. R.**, Análisis del grado de fracturación y deterioro del macizo rocoso en las minas Las Mercedes y Amores. *Geología y Minería*, (1), 2004.
- OTAÑO, N. J.**, Elementos de física de las rocas. Cuba: Pueblo y Educación, 1981.
- 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.
- PALMSTRØM. A.**, Rmi a system for characterization rock mass strength for use in rock engineering. Rock Mach and tunnelling tech, 1995.
- PALMSTRØM. A.**, Rmi – A rock mass characterization system for rock engineering purpose. Ph. D. thesis, University of Oslo, Norway. 400pp. Ingeotúneles. Madrid. 1998.
- PALMSTRØM. A.**, Caracterización de macizos rocosos mediante el Rmi y sus aplicaciones en Mecánicas de Rocas. Ingeotúneles. Madrid. 1999.
- PÉREZ, C Y OTROS.**, Informe ingeniero geológico, trasvase Este – oeste (Melones - sabanilla): Túnel Esperanza - Enmedio. INRH – Holguín, Junio, 1991.
- PERRI, GIANFRANCO.**, Diseño geotécnico de túneles. Caracas: Innovacions Tecnologic. Universidad Central de Venezuela. Caracas 1990.
- PINTO DA CUNHA. A.**, Scale Effects in Rock Masses 1 st Int. Work – Shop on Scale effects in Rock Masses, A.A Balkema.1990.

- PINTO DA CUNHA, A.**, Scale Effects in Rock Masses 93. 2do Int. Work – Shop on Scale effects in Rock Masses, A.A Balkema.1993.
- 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.
- QUIRALDE, LÓPEZ. F.**, Investigaciones in situ. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 69 – 97p. 1998.
- QUINTAS, C. F.**, Características estratigráficas del complejo ofiolítico y eugeosinclinal en la cuenca del río Quibiján, Baracoa. *Minería y geología*. 2 - 11p. 1998.
- 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
- RIVERÓN, Z. B.**, Caracterización de la respuesta dinámica de los suelos dela ciudad de Moa. (Tesis de Maestría). ISMMANJ. 1996.
- RODRÍGUEZ, I. A.**, Estudio geomorfológico y morfotectónico del municipio de Moa y áreas adyacentes. (Tesis Doctoral), ISMM de Moa. 1999.
- ROMANA, RUIZ. M.**, Caracterización de rocas blandas a partir de testigos de sondeos. Simp. Nac. De Rocas Blandas. Madrid. 1976.
- ROMANA, RUIZ. M.**, Excavación mecanizada con topo. Simposio sobre Uso Industrial del Subsuelo(SUIS) 2da parte de la ponencia general No 1. 1981.
- 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.
- ROMANA, RUIZ. M.**, Clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles. *Revista INGEOPRES*, No 18. 1994.
- 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.
- ROMANA, RUIZ. M.**, Geología de túneles. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 29 – 77p. 1999.
- ROSALES, A. R.**, Caracterización geomecánica de macizos de serpentinitas de Holguín. (Tesis de Maestría). ISMMANJ. 1996.
- RUSAVIN, IVANOVICH. G.**, Métodos de la Investigación Científica. Editorial de Ciencias Sociales, La Habana. 1990.

- SCOBLE, M Y MUFTUOGLU, Y.,** Derivattion of a Diggability Index for Surface Mine Equipment Selection. *Mining Science and Technology*. Vol. 1. 1984.
- SEN, Z. AND EISSA, E. A.,** Volumetric rock quality designation. *J. Geotrch. Engn.* 117(9): 1331 – 1346. 1991. Ingeotúneles. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 79 – 107p. 1999.
- 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.
- UGALDE, Y. A.,** Estudio geomecánico de la mina Merceditas. (Trabajo de Diploma). ISMMANJ. 2000.