

**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](mailto: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.

## **CAPITULO I**

### **SITUACIÓN ACTUAL DEL TEMA Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1 Estado actual de esta problemática en el mundo**

En la actualidad, las nuevas tecnologías abren inmensas posibilidades a la construcción de túneles y obras subterráneas. 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; Gonzáles de Vallejo, 1998).

Estas clasificaciones fueron creadas y comprobadas en macizos constituidos en su gran mayoría por granitos, cuyas características son bastante diferentes a las que se presentan en nuestra región de estudio, por lo que tanto los valores 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):

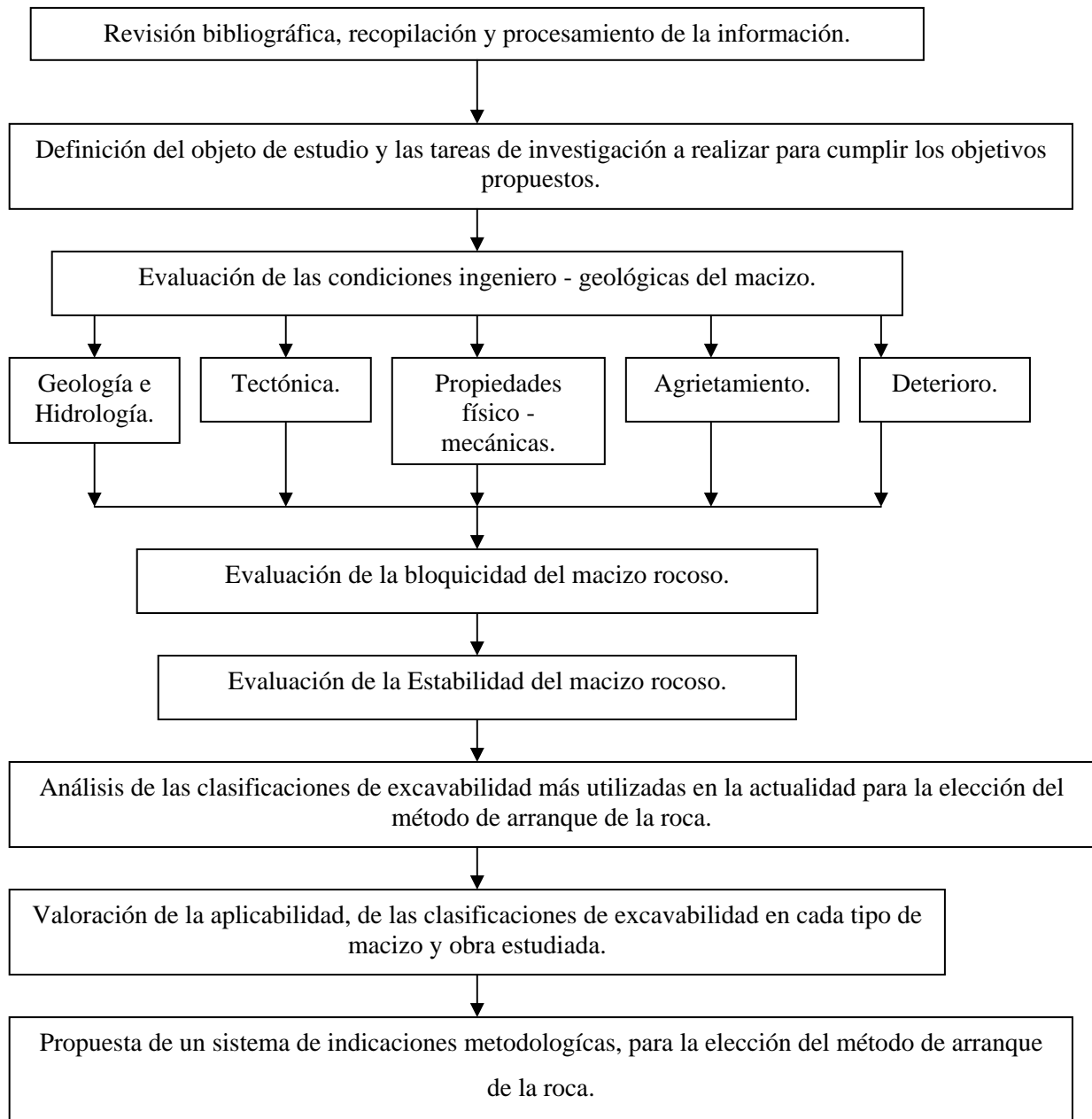
- Revisión bibliográfica, recopilación y procesamiento de la información.
- Definición del objeto de estudio y las tareas de investigación a realizar para cumplir los objetivos propuestos.
- Evaluación de las condiciones ingeniero – geológicas del macizo rocoso.
- Evaluación de la bloquicidad del macizo 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.

## **CAPITULO 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 m<sup>2</sup>, 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 2,50m.

### **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; Gonzáles, 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.



















































