

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO Dr. ANTONIO NÚÑEZ
JIMÉNEZ
FACULTADA DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE MINARÍA**

**TESIS EN OPCION AL GRADO CIENTIFICO DE DOCTOR EN CIENCIAS
TECNICAS
(RESUMEN)**

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MACIZOS ROCOSOS EN OBRAS
SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN ORIENTAL DE PAÍS**

AUTOR: M.Sc. MADAY CARTAYA PIRE

TUTOR: Prof. Tit. Ing. Roberto Blanco Torrens. Dr. C.

CUBA- 2001

INTRODUCCIÓN

Tanto tuneleros, como mineros durante sus labores tratan la extraordinaria variedad de macizos y la necesidad de “acomodarlos” y “adaptarlos” hasta alcanzar el éxito, a partir de medios rudimentarios disponibles, el inteligente uso de las manos y de sus elementales útiles, sin olvidar la imprescindible habilidad para protegerse ellos mismos frente a posibles desprendimientos mediante la colocación de soportes y entibación. La mina más antigua que se conoce en el mundo se localiza en el Cerro de Bomvu, en Swazilandia, y data del año 40. 000 a.c; en ella el hombre de Neandertal, minaba hematita, para ritos mortuorios. El primer túnel de la historia, fue el túnel de Babilonia bajo el Eúfrates, para comunicar el Palacio y el Templo de Belos en la Babilonia del 2200 a.c. Resulta impresionante la tremenda perseverancia y desprecio por el riesgo que mostró el hombre desde los orígenes de la historia en sus intentos de perforar la tierra, partiendo inicialmente, solo de sus propias manos y, poco apoco confeccionando herramientas, rudimentarios martillos, picos, cinceles. Si a esta absoluta precariedad de utensilios de trabajo añadimos los elementales procedimientos de entibación empleados y la ausencia de sistemas de ventilación y de evaluación o pronóstico de la estabilidad de las obras, comprobamos que la excavación de túneles y galerías implicaba en la antigüedad una formidable y enormemente sacrificada y peligrosa labor.

En los últimos años ha sido el boom de la ingeniería subterránea, siendo el rasgo característico, su diversificación, se puede decir sin exageración, que se está viviendo la era de los túneles y construcciones subterráneas multipropósito, muestra de ello son los grandes túneles como los que se proyectan bajo los Alpes, y que dejarán pequeños a los túneles actuales o el túnel submarino del Seikán con 54 km de longitud, las autopistas subterráneas de circunvalación de grandes ciudades como los de la Bahía de Tokio, París o las Artery Tunnel de Boston. Pero hoy no se trata sólo de concebir obras lineales, como estas, sino también de construir amplios espacios subterráneos e inmensas cavernas de propósitos diversos; bien de carácter lúdico, como el urbanismo subterráneo, bien con función de depósito y almacenamiento, tanto de combustible, alimentos, residuales, plantas, hidroeléctricas, potabilizadoras, refugios, etcétera. En la actualidad, las nuevas tecnologías abren inmensas posibilidades a la construcción de túneles y obras subterráneas. Esta realidad ya en nuestros días se proyecta hacia el futuro como una tendencia que apunta hacia mejoras en los rendimientos y en la seguridad de

los trabajos. Las obras subterráneas tienen un inmenso futuro, que ya es realidad en muchos lugares del mundo.

En nuestro país la industria minera constituye una de las principales ramas de la economía, estimula el desarrollo de la industria, asegura el abastecimiento de las principales materias primas e influye directamente en el desarrollo económico y social del país, la construcción de obras subterráneas, tanto civiles (trasvases, almacenes, etcétera), como para obras protectoras de diversos usos, ha aumentado en los últimos años. Para garantizar la estabilidad y por ende la seguridad de estas excavaciones, deben realizarse estudios del macizo rocoso, con el objetivo de conocer cuales son sus características y al menos suponer cual será su comportamiento ulterior. En nuestro país hoy en día, cada entidad relacionada con la construcción subterránea realiza el estudio del macizo rocoso donde está enclavada la obra, pero todavía existen insuficiencias en el alcance y contenido de esos estudios, ya que las obras subterráneas continúan presentando problemas de estabilidad, influyendo esto directamente en el gasto de recursos, ocasionado por que los macizos rocosos no son diferenciados para su estudio y adopción de medidas, de acuerdo al comportamiento variado que puede presentar una misma litología en la excavación subterránea, causado por que, en la mayoría de los casos han sido afectadas por diferentes eventos tectónicos, o resulta que, sencillamente, la zona en cuestión a sido afectada por el método de arranque empleado. Por lo que habitualmente se fortifica después que ya se han producido pérdidas de estabilidad, o sencillamente se fortifica toda la excavación, “preventivamente”, considerando que el comportamiento de macizo será igual, demostrándose en la práctica que no siempre resulta así.

Es por ello que **el problema** que enfrenta la presente investigación radica en que es insuficiente el alcance y contenido de los procedimientos que se aplican actualmente para el estudio de los macizos rocosos ya que los mismos no son diferenciados geomecánicamente.

Lo que en muchos casos puede producir soluciones incorrectas, gastos excesivos y afectaciones a la seguridad durante los trabajos que en ellos se efectúen.

La formulación de **la hipótesis** parte del hecho de que si se realiza la caracterización geomecánica de los macizos rocosos entonces se posibilita la diferenciación de los mismos de acuerdo a su comportamiento, lo que permitiría

alcanzar soluciones de proyecto y constructivas de las obras subterráneas más económicas y seguras.

El objetivo general es caracterizar desde el punto de vista geomecánico los macizos rocosos de las Minas de cromo Merceditas, Amores y de cobre “El Cobre”, de los túneles hidrotécnicos de los Trasvases Melones – Sabanilla y Caney – Gilbert.

Es necesario significar que la zona de estudio donde se realiza la investigación, abarca una extensa región de la zona oriental, por lo que se realiza un macro estudio de las características geomecánicas de los macizos.

Objetivos específicos

- ✓ Realizar el estudio ingeniero – geológico de los macizos rocosos.
- ✓ Determinar los parámetros geomecánicos de los macizos estudiados.
- ✓ Proponer los modelos geomecánicos más representativos de los macizos rocosos de las obras estudiadas.
- ✓ Proponer criterios geomecánicos estructurales que permitan un mejor diseño de excavaciones y obras subterráneas.

La tesis consta de cuatro capítulos. En el primero se realiza un análisis del estado actual del tema, así como el desarrollo alcanzado en Cuba, en la materia y se expone la metodología de investigación empleada.

En el segundo capítulo se realiza el estudio – ingeniero geológico, la determinación de las propiedades físico – mecánicas y la evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos de las obras estudiadas.

En el tercer capítulo se ofrecen las principales características geomecánicas de los macizos y se proponen los modelos geomecánicos más representativos del comportamiento de los macizos rocosos en las obras estudiadas.

En el cuarto capítulo se ofrecen criterios geomecánicos – estructurales para el diseño de excavaciones y obras subterráneas. Se realiza la estimación de la resistencia de las rocas por métodos empíricos de actualidad, se definen las posibles direcciones de las tensiones principales máximas, medias y mínimas, de las estructuras en las excavaciones con el auxilio de las proyecciones estereográficas, se proponen los lugares donde es posible aplicar el método del bloque clave y se

definen los esquemas de interacción macizo - fortificación más representativos de las obras en estudio

Los principales resultados obtenidos de la investigación son los siguientes.

- ✓ El establecimiento de una metodología para la caracterización geomecánica del macizo.
- ✓ La caracterización geomecánica de los macizos rocosos de las obras estudiadas y la propuesta los modelos geomecánicos más representativos de los macizos de las obras estudiadas
- ✓ El empleo de diferentes criterios geomecánicos - estructurales para el diseño de excavaciones y obras subterráneas en los macizos rocosos estudiados.

La presente investigación tuvo como punto de partida el estudio efectuado por la autora en su tesis para la opción al título de Master en Geomecánica, así como la información obtenida de la revisión bibliográfica y de la búsqueda en las diferentes entidades a que pertenecen las obras subterráneas estudiadas, estas entidades y empresas fueron. Empresa Cromo Moa, Empresa Minera del Cobre en Santiago de Cuba, Empresa No2 de Proyectos e Investigaciones de Holguín, Empresa de Proyectos e Investigaciones Hidráulicos – Holguín, Empresa de Proyectos e Investigaciones Hidráulicos – Bayamo, CITMA- Bayamo. GEOCUBA – Bayamo, Oficina Nacional de Recursos Minerales - Fondo Geológico – Santiago de Cuba, también aportaron datos importantes a la investigación, el Centro de Información Científico Técnica, el Fondo Geológico del Departamento de Geología y el Archivo del Departamento de Minería, todos del ISMMM. La información obtenida fue muy amplia, ya que estos macizos han sido bastante estudiados desde el punto de vista ingeniero geológico y en ellos se han realizado varios estudios de estabilidad, tal es el caso de las obras del Tránsito Este – Oeste Melones – Sabanilla, del túnel Caney – Gilbert, en las Minas Merceditas, Amores y El Cobre, en estos tres últimos casos realizados por el Grupo de Construcción Subterráneas del Departamento de Minería, al que pertenece la autora del presente trabajo.

No obstante, resulta necesario señalar, que en la bibliografía consultada, son muy escasas las investigaciones referentes al estudio sectorizado o diferenciado de los macizos, y no se encontraron referencias en las que se desarrolle una metodología para la caracterización geomecánica y se propongan los modelos geomecánicos más representativos del comportamiento de los macizos rocosos teniendo en cuenta

sus características mecánicas y estructurales, tal vez justificado por el creciente auge que han alcanzado en nuestro país, en los últimos años, las clasificaciones geomecánicas (Deere, Barton, etc.) dando lugar a que los estudios geomecánicos actuales, solo se limiten a clasificar las rocas por estas metodologías, sin llegar al modelo geomecánico. Sin embargo, resulta evidente la necesidad de profundizar en los aspectos relacionados con la temática objeto de estudio; no solo por la importancia de la diferenciación para el estudio de los macizos partiendo de sus características geomecánicas, sino también, para adecuar las investigaciones geomecánicas futuras, según esta nueva tendencia.

La novedad científica de la investigación radica en:

- ✓ El desarrollo de una metodología para realizar la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, y la diferenciación de los modelos geomecánicos representativos de los macizos estudiados

Los resultados de este trabajo se han presentado en:

- ✓ II y III Taller de Túneles y Construcciones Subterráneas. 1997, 1998.
- ✓ Conferencia Internacional de Aprovechamiento Racional de los Recursos Naturales, CINAREM' 98.
- ✓ XII Forum de Ciencia y Técnica de Base, Municipal, Provincial y XII Forum Municipal de las FAR, noviembre / 1997, diciembre/ 1997, marzo / 1998 y noviembre/ 1997.
- ✓ Evento Internacional de Protección del Medio, PROTAMBI'99.
- ✓ IX Sesión Científica del Centro de Investigaciones de la Laterita, noviembre / 1999.
- ✓ Jornada Científico - Técnica de Geominera Santiago de Cuba, febrero/1999.
- ✓ Primer Taller Territorial la Geodesia y la Geomecánica aplicadas a la construcción, noviembre/1999.
- ✓ Primer Simposio Internacional la Geodesia y la Geomecánica aplicadas a la construcción, abril / 2000.
- ✓ IX Exposición Municipal, Provincial, Nacional de las BTJ "Forjadores del futuro", marzo/2000, junio / 2000.
- ✓ IV Congreso De Geología y Minería. Marzo / 2001.

Publicaciones:

1. Modelos geomecánicos de los macizos rocosos de la mina de cromo Merceditas, revista Minería y Geología, No. 2, 1999.
2. Caracterización geomecánica de algunas minas y túneles subterráneos de la región oriental del país. Revista Minería y Geología, No. 1. 2000.
3. Estimación de la resistencia de las rocas. Revista Minería y Geología, No.2. 2000.
4. Caracterización geomecánica de los macizos rocosos en minas subterráneas para el aprovechamiento racional de los recursos y la protección del medio. Edición especial Libro de Ponencias de la IX Sesión Científica del Centro de Investigaciones de la Laterita, Unión del Níquel.
5. Caracterización geomecánica de macizos rocosos. CD-Room, Publicación de IV Congreso De Geología y Minería. Marzo / 2001.

Capítulo I. Estado actual de la problemática y metodología de investigación.

Estado actual de la problemática.

La geomecánica es quizás una de las ramas tecnológicas más antiguas del universo, los griegos y egipcios en sus construcciones emplearon los macizos rocosos para obras. En las pirámides construidas en Egipto se emplearon bloques de caliza dura. Todas estas fastuosas obras, contaron con excelentes mineros que desarrollaron una amplia gama de construcciones subterráneas y fortificaciones que hoy se observan y conservan en nuestros días.

Sin embargo la geomecánica como ciencia es a fines de los años 50, que hizo su entrada en el hasta entonces, mundo crítico de las obras subterráneas. Históricamente se conoce que el Primer Congreso de Mecánica de Rocas se celebró en Portugal en 1966. (López Jimeno, 1998)

Aún cuando la literatura especializada en estas materias se ha expandido y ha acelerado su desarrollo en todo el mundo, con el empleo tanto de revistas especializadas, como el surgimiento de nuevas técnicas y tecnologías computarizadas. El estado actual del conocimiento en mecánica de rocas, así como la definición y obtención de parámetros y adopción de modelos que representen el comportamiento real de los macizos rocosos, se encuentran en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de la ingeniería como pueden ser la Mecánica de Suelos, Hidráulica, Resistencia de Materiales, etcétera; bien por la menor antigüedad de la primera, o por una mayor complejidad frente a la simulación del problema real del macizo. (López Jimeno, 1998)

Como consecuencia de esto, resulta difícil establecer modelos analíticos del comportamiento del macizo rocoso que sean reflejo fiel de este, cuando se trata de resolver problemas de estabilidad o dimensionamiento de obras a cielo abierto o subterráneas.

La Geomecánica está dando a la construcción de obras subterráneas un creciente soporte científico y técnico que ha encontrado su máximo exponente en la última década, hasta el punto de que hoy en día, la mayoría de los túneles se hacen bajo supervisión de un experto en geotecnia. Siendo uno de los objetivos, caracterizar geomecánicamente los macizos, constituyendo esto el estudio integral del macizo en cuestión, que incluye tanto el modelo geológico, como el geomecánico, abarcando aspectos tales como, estructura del macizo, litología, contactos y distribución de

litologías, geomorfología, cartografía geológica, estudio hidrogeológico, levantamiento de discontinuidades, técnicas geofísicas, sondeos, ensayos in situ, de laboratorio, clasificaciones geomecánicas, entre otros. Convirtiéndose la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en una herramienta indispensable para pronosticar su comportamiento.

Una parte importante de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas de sostenimiento en túneles. Las mismas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel (Palmström, 1998). Además de las obras subterráneas, se destacan las aplicaciones en taludes y cimentaciones. Las clasificaciones llevan más de 50 años en uso, pero es a partir de la década de los 70 cuando se extienden internacionalmente (González de Vallejo, 1998).

Al depender los túneles de múltiples variables geológicas de difícil cuantificación, los métodos empíricos, a los que pertenecen las clasificaciones geomecánicas, han sido de gran ayuda, desde el primer sistema de clasificaciones propuesto por TERZAGHI en 1946 (Moreno, 1998), convirtiéndose este en el primer aporte a las investigaciones geomecánicas. TERZAGHI parte del criterio de la formación de una zona de roca destruida por el techo de la excavación, clasificando los terrenos en nueve tipos atendiendo esencialmente a las condiciones de fracturación en las rocas y a la cohesión o expansividad en los suelos. Esta metodología expuesta por TERZAGHI (González de Vallejo, 1998. Moreno, 1998) carece de un índice cuantitativo mediante el cual se pueda tener un criterio más acertado de la competencia de las rocas.

En 1958, LAUFFER (Moreno, 1998), propuso una nueva clasificación, también para túneles, que posee un carácter cualitativo. El autor da una clasificación del macizo rocoso y a partir de ella efectúa recomendaciones para la elección del sostenimiento, introduciendo el concepto del claro activo. A nuestro criterio, el inconveniente que presenta, es la dificultad de determinar los parámetros que intervienen en la clasificación, si no se tienen abiertas excavaciones de distintas longitudes libres, durante sus tiempos de estabilidad.

Más tarde en 1963, DEERE (Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998. Moreno,1998, Palmström, 1998) propuso un índice de la calidad de las rocas, basado en la recuperación de testigos, denominado como el sistema Rock Quality Designation (RQD) - Índice de Calidad de las Rocas -. Este índice se ha usado en muchas partes y se ha comprobado que es muy útil en las Clasificaciones Geomecánicas de los Macizos Rocosos, formando parte de un sin número de ellas.

En 1972, WICKHAM, TIEDEMAIN Y SKINNER del U. S. Bureau of Mines, (Blanco, 1998. Moreno,1998) Establecen los criterios para la obtención del RSR (Rock Structure Rating). Según este criterio el efecto del agua está condicionado por parámetros litológicos y estructurales del macizo y por la influencia del agrietamiento, por lo que se debe analizar muy bien las características del macizo en cuestión a la hora de emplear este criterio porque no siempre la afluencia de agua en una excavación está condicionada exclusivamente estos factores.

BOLUCHOF en la década de los años 70, (Bolushof, 1982. Martínez, 2000) desarrolló un método para valorar la estabilidad dado por el índice - S - ; este criterio es bastante completo incorporando parámetros como el coeficiente de fortaleza de las rocas. Durante esta misma década aparecen otras Clasificaciones Geomecánicas de Macizo Rocosos, como las de, FRANKLIN, (1970 y 1975) y LOUIS EN 1974, (Moreno, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998) que han tenido menos seguidores.

La sencillez de los métodos presupesto por BIENIAWKI (1973) y BARTON, LIEN Y LUNDE (1974), (Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998. Moreno,1998) contribuyeron definitivamente a su rápida aceptación y expansión. PALMSTRÖM en 1995 y 1996 (Palmström, 1998) propone el índice R_{Mi}, a partir de la resistencia a la compresión simple de la roca matriz, del parámetro de diaclasado JP en función de las discontinuidades y tamaño del bloque. El índice permite caracterizar macizos rocoso y calcular sostenimientos en excavaciones subterráneas.

En España la aplicación de las clasificaciones se inicia a finales de la década de los 70 y las primeras publicaciones datan del Simposio de Uso Industrial del Suelo de la S.E.M.R, en 1981. Los autores Españoles han realizado significativos aportes al desarrollo de las clasificaciones tales como la propuesta de González de Vallejo, L. 1983, aplicada a túneles y la clasificación para taludes de Romana, M.1985 y 1997. Entre otras contribuciones se pueden mencionar las realizadas para medidas de

sostenimiento en túneles por Moreno, E. 1982, para el dimensionamiento de galerías mineras por Abad, et al, 1983 y los trabajos de investigación de Munóz, L.1987 y Encing, I.1992. (González de Vallejo, 1998. Moreno, 1998. López Jimeno, 1998).

Debe añadirse también el creciente desarrollo de los trabajos de reconocimiento de los macizos rocosos, como los de auscultaciones, aunque por el momento estas actividades no han alcanzado la generalización deseable en la mayoría de los países, es creciente el número de obras subterráneas que, por medio de secciones instrumentadas u otro tipo de estaciones de control, aportan datos objetivos para las calibraciones de los modelos, generalmente, semiempíricos, para la verificación práctica de los estudios teóricos y para la estimación del estado tensional.

La introducción de la computación, como por ejemplo los SofWare para el cálculo de estabilidad de las obras, diseño del sostenimiento, estado tensional alrededor de las excavaciones, entre otros (López Jimeno, 1998) también han contribuido grandemente en el desarrollo científico y técnico de la geomecánica.

En Cuba las Clasificaciones Geomecánicas de los Macizos Rocosos, tienen pocos seguidores. Han sido empleadas fundamentalmente por las empresas de proyecto y construcción de obras subterráneas del Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias. Durante la década de los 60 y 70, los criterios utilizados en el CAT – FAR para proyecto y ejecución de túneles se basan en la escuela Soviética, que se apoya en los trabajos del profesor Protodiákonov. Según esta teoría, la estabilidad se logra cuando la excavación tiene forma parabólica o cuando alcanza, por derrumbes, dicha forma. Durante esos años la observación y control de infinidad de casos reales (Acosta,1996), donde se logra la estabilidad con secciones de formas absolutamente arbitrarias, puso en dudas el planteamiento de Protodiákonov.

A principios de la década de los 80 se pone en práctica la clasificación de Bieniawski, más tarde modificada por F. Torres. La modificación consistió en sustituir la resistencia a compresión de la roca de Bieniawski por su equivalente dado por el coeficiente de fortaleza de Protodiákonov. Por lo que a partir de este momento se comenzó a evaluar la estabilidad de las rocas según el criterio Bieniawski – Torres, en las investigaciones de los túneles del área CAT – FAR. De acuerdo a esta evaluación, se establecía el tiempo y el avance permisible sin revestir que admitía cada tramo de obra. Al verificar en la práctica que la estabilidad no se afectaba con avances o tiempos sin revestir superiores a los pronosticados, se decidió realizar

una minuciosa investigación para establecer criterios más exactos y que permitieran realmente valorar dicho comportamiento. Esta investigación fue realizada por Augusto A. Cañizares, del Departamento de Matemáticas aplicadas del CDCM. (Acosta,1996).

En la actualidad el uso de las clasificaciones geomecánicas tanto para trabajos subterráneos como a cielo abierto se ha incrementado en nuestro país. Se debe aclarar que las clasificaciones geomecánicas, si bien se puede considerar como una parte de la caracterización geomecánica del macizo rocoso de ningún modo pueden representar por sí solas a esta problemática. Ya que no incluyen en su análisis una variedad de parámetros que deben ser considerados para tener un pronóstico del comportamiento del macizo rocoso

Las investigaciones encaminadas a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, en nuestro país, no han alcanzado un desarrollo importante, utilizándose muy poco en el análisis del comportamiento de los macizos rocosos. Han sido empleados principalmente para el estudio del macizo en obras con fines hidráulicos y protectoras, en menor cuantía, le siguen el estudio en laderas, taludes, en obras civiles (viaductos, embalses, presas, etcétera) y por último (casi nulo) canteras y minas subterráneas, aunque se debe señalar que en los últimos diez años, se ha manifestado un cierto interés, por estas materias; destacándose los esfuerzos realizados, por el grupo de construcción subterránea del ISMMM, apoyándose en los cursantes de las Maestrías de Geomecánica y Construcción Subterránea, que desarrollaron varias tesis en esta línea de investigación, que constituyen importantes documentos científico – técnicos, en la realización de este trabajo, tales como: la Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina Merceditas (Cartaya, 1996), la geometría del agrietamiento de la Mina Merceditas y su estabilidad (Falero, 1996), la acción de la presión minera en las minas de cromo (Mondejar, 1996), la elección del método de arranque a partir de las clasificación geomecánica del macizo (Noa,1996), entre otras investigaciones. (Blanco, 1998. Blanco, 2000. Cartaya, 1997. Cartaya, 1999. Cartaya, 2000. Guillerme, 1998. Mondejar,1998. Mondejar,1999. Mondejar, 2000).

El Centro de investigaciones y proyectos Hidráulicos y la Constructora Militar No.2, ambas de Holguín, desarrollaron un importante trabajo ingeniero geológico y geomecánico, en el macizo del Tránsito Este – Oeste, con el auxilio de medios y métodos novedosos, como son el procesamiento de imagen por teledetección, la

geofísica, y el empleo de las clasificaciones geomecánicas de Benjawski, modificada por Federico Torres (1989), Barton y Deere, estas investigaciones constituyen una base importante para la caracterización geomecánica del macizo de esa obra. (Colectivo, 1991. Colectivo, 1992 a. Hidalgo, 1991 a, b. Pérez, 1991 a, b, c)

En el trabajo aplicación de nuevas técnicas en el estudio ingeniero geológico de los macizos rocosos del ing. J. M. Alfaro, (2000) se realiza un análisis de los trabajos de campo más importantes, utilizados en la evaluación de macizos rocosos a partir de la utilización de métodos de campo no tradicionales utilizados en nuestro país. En el mismo se hace un análisis y evaluación del agrietamiento del macizo rocoso de varios túneles en las provincias Granma y Santiago de Cuba. Esta investigación es sin dudas un paso importante para efectuar la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, pero en nuestra opinión no se logra caracterizar geomecánicamente los mismos.

Otros esfuerzos en esta temática, lo constituye la investigación realizada por el Ing. J. L. Peñates, (2000) titulada: caracterización geomecánica de Macizo del Escambray, donde el peso de la investigación lo tienen los criterios geológicos, clasificando las rocas por su génesis, para la determinación de las propiedades físico – mecánicas, como únicos criterios para la caracterización geomecánica del macizo. Esto a nuestro juicio, más bien es una investigación ingeniero geológica, que constituye la base fundamental de la caracterización geomecánica, a la cual no se llega en el trabajo.

En nuestro país actualmente la mayoría de las investigaciones geomecánicas tratan como principales aspectos, las condiciones ingeniero geológicas del macizo rocoso y la evaluación de la estabilidad de estos, teniendo en cuenta las Clasificaciones Geomecánicas. En la presente investigación se consideran esos aspectos, pero además se introduce un nuevo enfoque, hasta ahora no tratado en la literatura consultada, que radica en la estimación del modelo geomecánico más representativo de los macizos rocosos a partir de su estudio diferenciado, de acuerdo a su comportamiento mecánico y estructural, principales formas de pérdidas de estabilidad y el mecanismo con que ellas se producen, estado tensional, bloquiosidad, entre otros; con el empleo de una metodología integral de investigación.

Metodología de la investigación.

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos facilita en forma significativa y hace más confiable el pronóstico sobre el comportamiento del macizo rocoso, lo que disminuye la probabilidad de que se produzcan afectaciones de diferentes índoles que puedan atentar tanto la economía como la seguridad de las obras y los trabajadores que se encuentran en ellas. Para cumplimentar la tarea planteada se emplea una metodología integral de investigación que consta de trabajos analíticos y experimentales.

La metodología que se desarrolla puede ser aplicada en la caracterización geomecánica de macizos rocosos, tanto en obras subterráneas como de superficie. Como tal esta metodología constituye un aporte científico, ya que incluye aspectos novedosos de gran importancia que permiten evaluar y pronosticar el comportamiento del macizo.

Los procedimientos empleados en la misma se aplican por primera vez en Cuba y la propuesta supera cualitativa y cuantitativamente otros intentos hechos en diferentes países (López Jimeno, 1998). A continuación se relacionan las etapas de trabajo. (figura 1)

Primera etapa: En esta etapa se estableció el área de investigación, que estuvo condicionado por la existencia o no de obras subterráneas y el criterio de implementación de la metodología en macizos de diferente génesis y comportamiento, y en excavaciones de distintas formas y dimensiones en zonas de la región oriental del país. Como objeto de la investigación se definió los macizos rocosos que circundan las obras subterráneas de las Minas Merceditas, Amores y El Cobre, de los trasvases Melones – Sabanilla y Caney – Gilbert, y los túneles populares de los Municipios Moa y Holguín.

En esta etapa se realizó la investigación bibliográfica del tema, en la que se analiza el estado actual de la temática en el país y en el resto del mundo. Los trabajos efectuados en nuestro país relacionado con la temática, proporcionan una información importante para caracterizar el objeto de estudio, es decir los macizos rocosos de las obras subterráneas estudiadas. Sobre la base de esta información existente se determinó el conjunto de métodos de investigación a aplicar.

Segunda etapa: Se realiza la parte experimental de la investigación, que permitió obtener los datos necesarios, para realizar la caracterización geomecánica. Incluyó los siguientes aspectos.

Primero: Estudio y evaluación de las condiciones ingeniero - geológicas de los macizos rocosos de las obras subterráneas de las Minas Merceditas, Amores y El Cobre, de los trasvases Melones – Sabanilla y Caney – Gilbert, y los túneles populares de los Municipios Moa y Holguín.

Segundo: Con el empleo de métodos de laboratorio se realizó en los casos necesarios la determinación complementaria de las propiedades físico – mecánicas de las rocas y su procesamiento estadístico.

Tercero: Con el empleo del método geológico se realiza el estudio del agrietamiento de los macizos rocosos, donde se incluyeron todas las superficies de debilitamiento presentes en los mismos, se determinó, la abertura de las grietas, su espaciamiento, rugosidad, alteración, dirección y ángulos de buzamientos y la afluencia de agua, entre otros aspectos.

Cuarto: Se determinan las principales formas de pérdidas de estabilidad y el mecanismo con que ellas se manifiestan en los macizos rocosos, así como las causas que las provocan.

Quinto: Evaluación de la estabilidad de las rocas por varias metodologías de evaluación de estabilidad de gran actualidad. Este estudio se realizó por tramos ingeniero – geológico de 10 a 15 m, analizando los macizos rocosos de forma diferenciada de acuerdo a su comportamiento y estado.

Tercera etapa: De gabinete. En esta etapa se procedió a la interpretación y procesamiento de la información, realizando la evaluación integral y diferenciada de los macizos rocosos, lo que permitió efectuar su caracterización geomecánicas. Sobre la base de lo cual se proponen los modelos geomecánicos más representativos del comportamiento de los macizos rocosos.

Cuarta etapa: Se ofrecen criterios geomecánicos – estructurales para el diseño de excavaciones y obras subterráneas. Teniendo como base los resultados obtenidos de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, tales como: Aplicación del método del “Bloque Clave” y del método dado por F. C. Phillip, para la Valoración de las posibles direcciones de los esfuerzos principales. Estimación de la

resistencia de las rocas, a partir de los criterios dados por Hoek y Brown y se recomiendan los esquemas de interacción macizos – Fortificación.

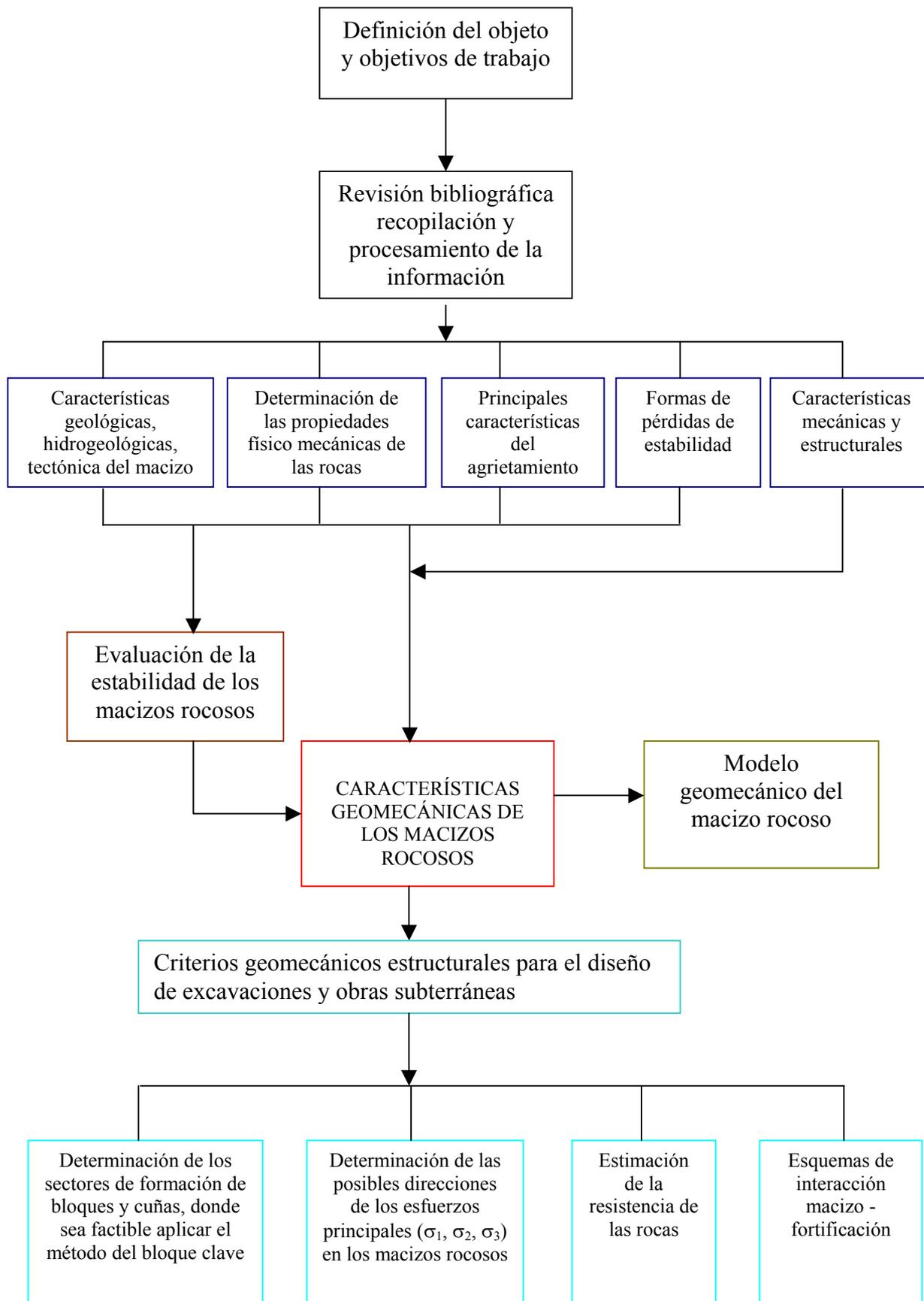


FIGURA 1. Metodología de la investigación

Capítulo II- Estudio ingeniero geológico de los macizos rocosos.

La investigación se realizó en los macizos rocosos de las minas Merceditas, Amores y El Cobre, obras subterráneas de los Tránsito Melones – Sabanilla y Caney – Gilbert, teniendo en cuenta que constituyen obras subterráneas de gran importancia en la región, tanto desde el punto de vista económico, social, como constructivo. Se tuvo en consideración además que estas obras subterráneas varían desde pequeña, hasta gran sección y se encuentran en zonas de diferentes complejidades tectónicas.

Este capítulo se efectúa el estudio y valoración general de las principales características ingeniero geológicas de los macizos rocosos donde se encuentran enclavadas las obras de estudio; que incluye un breve análisis de las particularidades geológicas, hidrogeológicas y tectónicas del macizo rocoso, se determinan las principales formas de pérdidas de estabilidad que se manifiestan en los mismos, se ofrecen las principales propiedades físico – mecánicas de las rocas; se realiza además el estudio de las principales características del agrietamiento y la valoración de la estabilidad de los macizos rocosos por las metodologías de Deere (1963), Barton (1974) y Bieniawski. (1979). Debe señalarse que este estudio se realizó por tramos ingeniero – geológicos de 10 a 15 m de longitud.

Características geológicas e hidrogeológicas del macizo rocoso de las obras subterráneas estudiadas.

Mina El Cobre.

La Mina El Cobre se encuentra ubicada al oeste del municipio de Santiago de Cuba a una distancia de 13 km de la Ciudad de Santiago de Cuba, está constituida por tres sectores diferentes: Mina Grande, Gitanilla y Mina Blanca.

Las litologías más comunes en las excavaciones estudiadas son las tobas de composición andesíticas y andesito - dacíticas, tobas brechosas y diques de porfiritas. En el yacimiento existen una gran cantidad de excavaciones y labores antiguas cuya ubicación no está determinada, lo que hace que las condiciones hidrogeológicas sean complejas.

A continuación en la figura 2, se muestra un esquema ingeniero geológico de la galería principal de la mina el cobre, reducido del plano original a escala 1:500. Para las demás obras estudiadas se muestran en el anexo 1, Tabla 1.

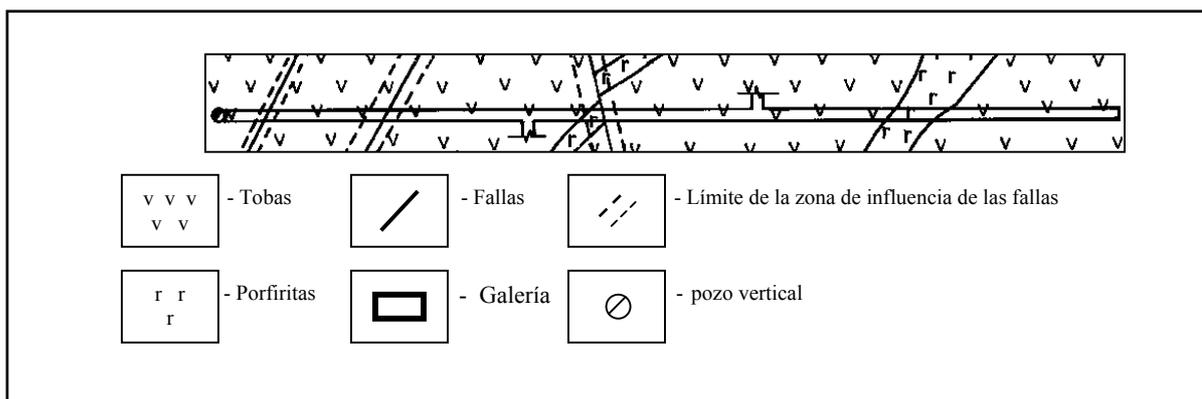


Figura 2. Esquema ingeniero geológico de la galería principal de la mina El Cobre.
Vista en planta.

Trasvase Caney - Gilbert

La región se encuentra a unos tres km al Sur del poblado Ramón de Guaninao, y a tres km al Noroeste de la presa Gilbert y el poblado Dos Palmas. Al Noroeste de la región corre el río Caney, y al Sur el río Cauto, también a unos tres km. Al Este corre el arroyo Valdés. La región se enmarca dentro de las estribaciones septentrionales de la Sierra Maestra Occidental específicamente en la región III Frente - El Cobre - Boniato,

En las excavaciones estudiadas las litologías presentes son: Las Tobas de diferentes granulometrías de coloración muy variada, desde el gris, gris verdoso, gris azul, pardo, pardo grisáceo, gris amarillento, etc. fundamentalmente estratificadas en capas de 5-10 m. Los Aglomerados, predominando los colores gris parduzco - carmelita a gris verdoso, aparecen dos tipos fundamentales, los aglomerados de granos finos, con tamaño de 2 – 5 cm que se encuentran generalmente en capas gruesas de hasta 1,5 m, afectado en diferentes grados por la meteorización, la matriz es tobacea; y los aglomerados de grano grueso, posee las mismas características que el anterior solo que los fragmentos son de mayor tamaño (mayor de 5 cm). La matriz por lo general es tobacea también, Las aguas superficiales en el área de investigación son realmente muy escasas y sólo tienen pequeño significado las drenadas por el arrollo Grande, estas aguas son las que alimentan el manto freático. Las aguas subterráneas se encuentran asociadas con las grietas de las tobas y los aglomerados, según la observación visual se pueden caracterizar por un bajo caudal, pudiéndose encontrar valores altos solo en las zonas muy agrietadas y tectonizadas

Minas Merceditas

La Mina Merceditas, que explota un yacimiento de cromo por el método de cámaras y pilares, se encuentra a 38 km del poblado de Moa.

Los cuerpos cromíticos de este yacimiento se relacionan especialmente a las rocas duníticas y dunito instatíticas y hasta con algunas variedades de gabroides. Los cuerpos minerales tienen formas de lentes y yacen en su mayoría de forma concordante con las rocas de caja. A través de la columna litológica (Colectivo, 1996. Proenza, 1997. Iturralde – Vinent, 1996) se puede conocer de forma general los tipos de rocas de la asociación estudiada, pero particularmente en las excavaciones de estudio encontramos: dunitas de color gris parduzco, peridotitas compactas, de color gris verdoso, peridotitas serpentinizadas de color verde grisáceo, compactas, con abundante serpentización, gabros de color blanco – crema, que aparecen en diques y cromitas compactas con brillo metálico. La zona posee una red hidrográfica bien desarrollada donde los afluentes principales del río yaguarí nunca se secan como por ejemplo el río Piloto, Jaragua (atraviesa la zona de los trabajos); Yarey y Ricto.

Mina Amores.

El área de estudio de la mina de cromo Amores, se encuentra en el municipio Baracoa a seis kilómetros del litoral del Océano Atlántico en el curso superior del río Báez y a 50 km de la planta de beneficio de Punta Gorda, municipio Moa. Las litologías principales, que se encuentran en la zona de estudio, que comprende el socavón principal y galerías adyacentes, así como la única cámara existente son: dunitas, formando una camisa alrededor de los cuerpos cromíticos, peridotitas, peridotitas serpentinizadas y la cromita, que presentan características físicas muy similares a las presentes en la mina Merceditas.

Trasvase Este – Oeste Melones –Sabanilla.

El trasvase Melones – Sabanilla se encuentra ubicado en la Sierra de Nipe – Cristal, desde el río Mayarí hasta la Presa Sabanilla. Situada al oeste del Central azucarero Loynaz Hechavarría, en toda la porción del borde norte del municipio Mayarí, de la provincia Holguín.

Las obras subterráneas estudiadas del Trasvase Este Oeste Melones – Sananilla son los siguientes túneles: Túnel Seboruquito – Esperanza, Túnel Esperanza – En

medio, Túnel Enmedio – Guayabo, Túnel Guayabo – Pontezuelo, Túnel Guaro – Manacal, Túnel Melones – Levisa, Túnel Yagrumal – Guaro.

Las litologías presentes en estos túneles son las siguientes.

Túnel Seboruquito – Esperanza: Litologías presentes: Serpentinitas de textura brechosa y brechas tectónicas con clastos de serpentinitas y a veces gabrodiabasas bien cementadas. Conglomerado brecha sedimentario con clastos de caliza, gabrodiabasas y serpentina con cemento calcáreo. Serpentinitas de harzburgitas, lixiviadas, argilitizadas, ocretizadas. Calizas de color blanco crema, blanco lechoso, organodetríticas, carsificadas y microcristalinas aporcelanadas, que varía desde muy meteorizadas a frescas o poco meteorizadas. Gabrodiabasas duras, agrietadas de color gris a negruzco en forma de diques y fragmentos de diques.

Esperanza - Enmedio: litologías presente: Conglomerado brecha. Brecha de serpentinita meteorizada. Serpentinita. Gabrodiabasas.

Túnel Enmedio – Guayabo: Litologías presente: Calizas de color blanco cremoso, carsificadas. Conglomerado – brecha sedimentario con clastos de serpentinitas, caliza, gabrodiabasas y cemento carbonatado. Serpentinitas de textura brechosa y brechas tectónicas con clastos de serpentinitas y a veces gabrodiabasas. Serpentinitas de harzburgitas, en ocasiones lixiviadas, agrietadas, de diferentes grados de dureza. Gabrodiabasas en forma de diques.

Túnel Guayabo – Pontezuelo: En este macizo encontramos las siguientes litologías: Brechas de serpentinitas meteorizadas. Brechas de serpentinitas sanas o poco meteorizadas. Serpentinitas meteorizadas. Serpentinitas sanas o poco meteorizadas. Gabrodiabasas. Conglomerado polimíctico meteorizado. Conglomerado polimíctico sano o poco meteorizado.

Túnel Guaro – Manacal: Litologías presentes. Serpentinitas alteradas. Serpentinitas conservadas. Peridotitas conservadas.

Túnel Melones – Levisa: El corte litológico es bastante simple y está compuesto en su totalidad por las rocas del complejo ultramáfico, representado por serpentinitas y gabrodiabasas.

Las serpentinitas presentes van desde el color verde claro al verde oscuro casi negro. Primeramente se encuentran las serpentinitas lixiviadas de color verde claro, se encuentran en la superficie y hasta profundidades de 14,5 m, debajo aparecen las serpentinitas masivas de color verde oscuro.

Túnel Yagrumal – Guaro.: El macizo está compuesto por las siguientes secuencias de rocas: Calizas arcillosas (formación Bitirí), que se encuentran meteorizadas en dependencia del grado de meteorización e inalteradas o sanas. Calizas masivas fosilíferas, carsificadas (formación Camazán): que varían desde Muy meteorizadas. Medianamente meteorizadas hasta encontrar roca inalterada o sana, Aleuolitas calcáreas: medianamente meteorizadas y fresca. Brechas calcáreas Gabrodiabasas: Poco meteorizadas y frescas.

Propiedades físico mecánicas de las rocas.

Las propiedades físico mecánicas de las rocas de la Mina subterráneas El cobre fueron determinadas en el centro de Investigaciones para la industria minero metalúrgica de La Habana (CIPIMM), en los laboratorios de la Universidad de Oriente, y en los laboratorios de mecánica de las rocas del ISMMM. Para el complejo Minero El Cobre, se trabajó con un volumen de más de 2700 datos en total. Las propiedades físico – mecánicas de las rocas de las minas de cromo Merceditas, Amores y túneles populares del municipio Moa, fueron determinadas en los Laboratorios de Mecánica de Rocas del Departamento de Minería del ISMMM, con un volumen alrededor de los 1300 datos. En las obras estudiadas de los Tránsito Este – oeste Melones - Sabanilla y Caney Gilbert fueron determinadas en los Laboratorios del Centro de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín del INRH y en los laboratorios de mecánica de las rocas del ISMMM con el empleo de más de 6000 datos para el análisis de las propiedades del Tránsito Este – oeste Melones – Sabanilla y 1600 para el Caney - Gilbert. Las propiedades de los túneles del municipio Holguín fueron determinadas en los laboratorios de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA-MICONS) y en los laboratorios antes mencionados del INRH.

Los métodos usados para la determinación de las propiedades físico - mecánicas de las rocas fueron los convencionales. tales como:

Peso específico (G): Para su determinación se usó en todos los casos el Método Picnométrico.

Peso volumétrico (γ_v): El ensayo se realizó siempre por el Método de la Pesada Hidrostática:

Humedad (W): Se determina por la diferencia de pesos entre la muestra en condiciones naturales y la muestra seca.

Porosidad (η): En función de los pesos específicos y volumétricos, En los ensayos en ocasiones se determinó la porosidad abierta de las rocas, para lo cual habitualmente se empleó el Método de Saturación:

Resistencia a la compresión(σ_c): Generalmente, se determinó para un estado uniaxial, o sea, sometiendo las muestras de rocas a cargas uniaxiales, empleando muestras regulares. En ocasiones la resistencia a compresión se determinó también usando muestras irregulares.

Resistencia a la tracción (σ_t): Es uno de los índices principales utilizados en la evaluación de la resistencia de las rocas. Este índice se determinó con el empleo del Método Braziliano.

Modulo de elasticidad (E): en algunos casos se determinó en el CIPIMM y otros en los laboratorios del ISMMM y del INRH de Holguín, utilizando el método que se basa en la medición de las deformaciones con indicadores de tipo reloj o con el empleo del método dinámico.

En el macizo del Trasvase Este – Oeste Melones Sabanilla se empleo en algunos túneles, además de los métodos anteriormente señalados, métodos geofísicos, tales como: sísmica y Sondeo Eléctrico Vertical.

Características mecánico – estructurales del macizo rocoso en las obras subterráneas estudiadas.

Para la evaluación y determinación de las características estructurales de los macizos rocosos de las obras estudiadas se efectuó el análisis de la tectónica, el estudio y evaluación integral del agrietamiento y de las principales formas de pérdidas de estabilidad que se manifiestan en los mismos. Se prestó especial atención a aquellos tramos de excavación inestables, afectados por el agua, el intenso agrietamiento u otros factores. De forma resumida se pueden plantear para las obras estudiadas las siguientes características.

Mina El Cobre

La zona esta afectada por sistemas de fallas divididas de acuerdo al rumbo de las mismas: sistemas de fallas sublatitudinales, sistemas de fallas noreste o transversal. Al primer sistema de fallas, pertenecen las más antiguas entre ellas: La falla el Cobre, la misma presenta un buzamiento abrupto aproximadamente de 85°, con inclinación al sur. En el sector Gitanilla a lo largo de esta falla, se desarrolla una zona de trituración. Las rocas vulcanógenas que afloran en la superficie presentan

fuertes alteraciones, están muy trituradas y oxidadas. Al oeste, la zona de falla El Cobre intercepta otro sistema de fallas submeridionales que tienen un orden secundario. El sistema de fallas noreste o transversales están muy bien localizadas al este del sector Gitanilla que afecta la estructura de los cuerpos minerales.

Durante los recorridos realizados en las excavaciones se observaron irregularidades en el contorno de estas, dado por un alto coeficiente de sobre excavación según las dimensiones de diseño, debido a los trabajos de perforación y explosivos y producto al agrietamiento del macizo. También, se aprecian zonas de fallas rellenas de material caolinizado y arcilla que han originado desprendimientos de fragmentos de rocas produciéndose, en estos sectores un gran sobreexcavación, como es el caso de la galería principal y las del nivel + 15, las que para su sostenimiento se encuentran fortificados actualmente.

De las mediciones realizadas en el macizo rocoso de esta Mina se obtuvo que las grietas se agrupan fundamentalmente en dos a tres sistemas, mayormente rellenas de material milonítico, arcilloso, entre otros. Ligeramente onduladas y rugosas, predominando aberturas menores de 1 mm, son por lo general continuas, con paredes sanas, poca afluencia de agua, con un espaciamiento promedio de 0,2 – 0,6 m. Esto se comprobó al observar los histogramas de distribución porcentual de las características de las grietas, que fueron confeccionados para todos tipos de rocas de las obras subterráneas estudiadas y a partir de ellos se determinaron las características predominantes en las grietas.

Se realizaron, como promedio, de 500 a 1000 mediciones de los elementos de yacencia de las rocas en las paredes de las excavaciones. Los valores promedios, obtenidos del procesamiento estadístico de estos datos, se representaron, con la ayuda del programa profesional **DIP**, de procedencia española (1999). A continuación en la figura 3, se muestra el diagrama de círculos máximos, de las rocas de la mina El Cobre, para las demás excavaciones se muestran en el anexo 3, figuras de la 1 a la 15, de la memoria del trabajo.

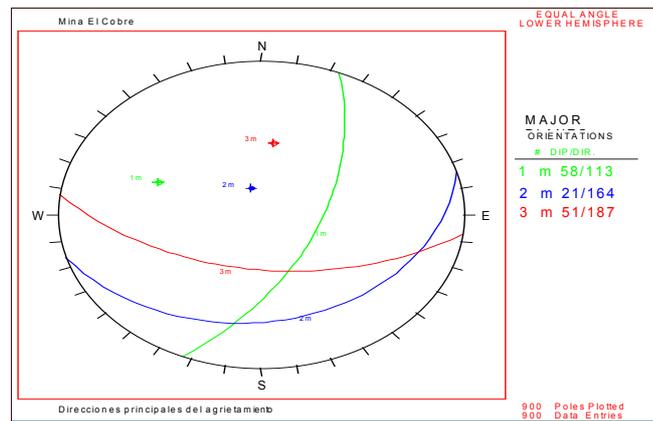


Figura. 3. Direcciones principales del agrietamiento en el macizo rocoso de la mina El Cobre

Trasvase Caney - Gilbert

El área tiene un alto grado de complejidad y actividad tectónica, al estar comprendida dentro del megabloque Sierra Maestra. Las fallas se caracterizan por un incremento del agrietamiento y el deterioro de las propiedades físico mecánicas en su zona de influencia, en muchos de los casos sirven de vía de conducción del agua al interior de las obras. Respecto a las características de las grietas se aprecia que en los aglomerados predominan las grietas onduladas – rugosas, con ligera alteración, con un espaciamiento promedio entre grietas de 0,2 a 0,6 m, generalmente abiertas, mientras que en las tobas predominan las grietas onduladas – lisas, con ligera alteración y en ocasiones con alteración arcillosa. La afluencia de agua varía de media con lavado de algunas grietas a afluencia importante por grietas limpias. En el macizo existen tres sistemas principales de grietas (sistema I: $10^{\circ}/15^{\circ}$, sistema II: $75^{\circ}/180^{\circ}$, sistema III: $52^{\circ}/260^{\circ}$).

Las Principales formas de pérdidas de estabilidad que se manifiestan en los macizos rocosos de las obras estudiadas de este Trasvase, son esencialmente los desprendimientos y los posibles deslizamientos de estratos. Éstos se producen en los tramos de tobas que forman estratos finos, debido a su yacencia casi horizontal y al efecto provocado por las grietas, éstas se desprenden con facilidad. La presencia de zonas de goteo intenso, es otro factor que influye significativamente en las inestabilidades de macizo, fundamentalmente en las tobas, que pierden con facilidad su capacidad portadora en presencia de agua, el agua actúa además, como material lubricante en los planos de grietas y fallas, provocando desprendimientos de techo y hastiales y origina la sobreexcavación de la obra subterránea, la realización de

voladuras con explosivos ha afectado las zonas de estratificación fina y de alto coeficiente de agrietamiento.

Mina Merceditas.

El macizo rocoso en la mina Merceditas, se encuentra en bloques agrietados. Los tramos más débiles de la mina se corresponden con la presencia de dunita, que a pesar de ser una roca resistente y dura se encuentra muy agrietada. Se observó la presencia media de agua por las grietas, haciéndose más intensa en los períodos de lluvias. Las zonas de mayor estabilidad se corresponden con la presencia de peridotitas.

Se pudo comprobar que el macizo presenta un alto grado de fracturación, destacándose la existencia de grietas prácticamente en todas las direcciones, no obstante se definen tres sistemas principales (sistema I: $32^{\circ}/202^{\circ}$, sistema II: $55^{\circ}/38^{\circ}$, sistema III: $85^{\circ}/302^{\circ}$), lo que provoca la formación de bloques en ángulos de varios tamaños. Las grietas presentes en las peridotitas alteradas aparecen con ligera alteración, y con paredes sanas en las cromitas, dunitas, peridotitas, peridotitas serpentinizadas y gabros. Con superficies onduladas – lisas en las peridotitas, peridotitas alteradas y gabros; y planas – rugosas en las peridotitas serpentinizadas, dunitas y cromitas. El espaciamiento promedio entre grietas en las peridotitas es de 0,6 – 2 m y en las peridotitas serpentinizadas, peridotitas alteradas, cromitas, dunitas y gabros de 0,2 – 0,6 m.

Las principales formas de pérdidas de estabilidad que se manifiestan en el macizo de la mina Merceditas son los desprendimientos y derrumbes, ocasionados principalmente por el estado tensional generado por el peso del cuerpo mineral en las galerías que poseen poca potencia de rocas respecto a este, por la pérdida de estabilidad de pilares, por el contacto tectónico y muy alterado entre litologías y por el efecto causado por las voladuras.

Mina Amores

En el yacimiento Amores es notable el alto grado de deformación tectónica, existiendo un claro predominio de los contactos tectónicos entre las diferentes litologías. Los cuerpos minerales y su roca encajante se encuentran muy agrietados. En el macizo existen generalmente de dos a tres sistemas de grietas (sistema I: $68^{\circ}/296^{\circ}$, sistema II: $40^{\circ}/233^{\circ}$, sistema III: $74^{\circ}/329^{\circ}$), con espejos de falla algunas y con relleno menor de 5 mm otras, las grietas en las peridotitas y dunitas son

onduladas - lisas, con un espaciamento promedio de 0,6 a 2 m, con ligera alteración en las peridotitas; y alteración arcillosa en las dunitas. En las cromitas aparecen como promedio las grietas onduladas – rugosas, con ligera alteración y espaciamento promedio de 0,2 – 0,6 m. Las principales formas de pérdidas de estabilidad que existen en el macizo son desprendimientos aislados de pedazos rocas en los sectores de alto agrietamiento y formación de cuñas, así como en aquellos sectores donde la dunita forma estratos de poca potencia.

Trasvase Este – Oeste Melones – Sabanilla.

Túnel Seboruquito – Esperanza.

En el macizo se presentan tres sistemas de grietas principales (sistema I: $85^{\circ}/121^{\circ}$, sistema II: $45^{\circ}/320^{\circ}$, $25^{\circ}/26^{\circ}$). Por sus condiciones predominan en primer lugar las grietas onduladas – rugosas, en segundo lugar las planas - lisas y en tercer lugar las planas – rugosas. Las grietas se encuentran abiertas, rellenas con carbonato de calcio, con abertura de 2 – 5 mm. En las zonas de fallas las rocas forman una red irregular debido a su alto grado de agrietamiento. La acción del intemperismo se observa a profundidades de hasta los 60 – 70 m a partir de la superficie. De aquí en adelante generalmente la roca se encuentra poco alterada y los valores de las propiedades físico – mecánicas son superiores. La principal forma de pérdida de estabilidad que se observa son los desprendimientos, que se aprecian, además, en casi toda el área, fundamentalmente en las cotas más bajas y hacia la parte oeste a partir de los 300 m de la entrada del túnel, el agrietamiento del macizo es el principal factor que provoca desprendimientos.

Túnel Esperanza – Enmedio.

El macizo se encuentra agrietado en todas las direcciones pero existen cuatro sistemas principales (Sistema I: $75^{\circ}/132^{\circ}$, sistema II: $45^{\circ}/140^{\circ}$, sistema III: $40^{\circ}/25^{\circ}$, sistema IV: $29^{\circ}/240^{\circ}$). La mayoría de las grietas en todo el macizo son abiertas, con una abertura entre 1-5 mm, rellenas fundamentalmente con carbonato de calcio. En las partes más meteorizadas predominan las grietas con iguales aberturas pero vacías, esto se debe a la alteración y posterior lixiviación del material de relleno. el espaciamento entre grietas varía de 0,06 – 0,3 m, con un promedio de 0,20 m. En segundo lugar predominan las mayores de 0,06 m para los sectores más alterados, ya que las rocas se encuentran muy fracturadas o trituradas. De acuerdo a las condiciones de las grietas, predominan las onduladas – rugosas y en segundo lugar las planas – rugosas. Esto no es válido para las gabrodiabasas, donde predominan

las planas - lisas y en segundo lugar las planas – rugosas. La alteración más frecuente en las paredes es la presencia de óxido y manchas, que indican la circulación de agua entre las mismas, pero no ha llegado a alterar la roca significativamente. Los desprendimientos son escasos ocasionados fundamentalmente por el intenso agrietamiento, que provoca la fracturación de estas rocas en bloques.

Túnel Enmedio - Guayabo.

El macizo en esta área se encuentra agrietado en todas las direcciones. Pero existen tres sistemas de grietas fundamentales (sistema I: 40°/50°, sistema II: 60°/258°, sistema III: 80°/260°). En todo el macizo las grietas son medio abiertas y su abertura oscila entre 1-5 mm. La distancia entre grietas oscila entre 0,06-0,3 m, exceptuando las zonas más meteorizadas y alteradas por las fallas, donde la distancia entre grietas predominantes es menor de 0,06 m, en esta zona la roca se obtiene en fragmentos y completamente triturada. Existen además grietas lisas con espejos de fricción, las que ocasionan pérdidas de estabilidad de las rocas de la excavación, el mayor porcentaje se observa en las serpentinitas. En las calizas predominan las grietas con ligera alteración y en segundo lugar las sanas y limpias. En las serpentinitas las paredes de las grietas son alteradas. Según las condiciones de las grietas en el macizo predominan las onduladas – rugosas, en segundo lugar las planas – rugosas y en tercer lugar las planas – lisas. No siendo así para las gabrodiabasas, en las que aparecen con la misma frecuencia las onduladas - rugosas y las planas - lisas y en tercer lugar las planas - rugosas. Las rocas frescas aparecen a profundidades de 50 – 60 m. Los desprendimientos son provocados por el intenso agrietamiento, que es la principal pérdida de estabilidad que se manifiesta.

Túnel Guayabo – Pontezuelo.

El macizo está agrietado en todas las direcciones, con cuatro sistemas principales, (sistema I: 39°/150°, sistema II: 79°/64°, sistema III: 41°/83°, sistema IV: 64°/111°) las mismas se encuentran medio abiertas y su abertura oscila entre 1 y 5 mm, rellenas generalmente de material serpentinitico de alteración y carbonato de calcio, la distancia entre grietas promedio es de 0,06 m y en segundo lugar varía de 0,06 – 0,3 m. Según las condiciones de fracturación, en las brechas predominan las onduladas – rugosas, en las serpentinitas las planas – lisas y en los gabros las planas – rugosas. Es necesario destacar la existencia de grietas lisas con espejos de fricción,

la mayoría de ellas se observan en las serpentinitas. En el macizo en general predominan las grietas con paredes ligeramente alteradas (oxidadas y manchadas).

Existen algunos desprendimientos asociados al intenso agrietamiento. Las serpentinitas están meteorizadas en diferentes grados según su profundidad, observándose procesos de lixiviación, carbonatización, ocretización, etcétera. Los gabros están menos afectados debido a su gran dureza, solo aparecen agrietados y en pocas ocasiones debilitados.

Túnel Guaro – Manacal.

El macizo se encuentra muy agrietado, las direcciones promedios de las grietas son: sistema I: $54^{\circ}/274^{\circ}$, sistema II: $6^{\circ}/84^{\circ}$, sistema III: $85^{\circ}/233^{\circ}$, sistema IV: $52^{\circ}/126^{\circ}$, sistema V: $64^{\circ}/72^{\circ}$. Lo que nos indica que este agrietamiento está asociado a las fallas detectadas en el área que presentan aproximadamente estas mismas direcciones. Las grietas en las serpentinitas alteradas se encuentran mayormente rellenas de material carbonatado, aunque se puede encontrar material arcilloso y en ocasiones vacías, la abertura predominante es menor de 1 mm, y el espaciamiento promedio es de 0,06 a 0,3 m, con paredes planas – rugosas, que varían de ligeramente alteradas a alteradas. En las serpentinitas pardo verdosas y en las peridotitas conservadas, predominan las grietas onduladas – rugosas, generalmente son sanas o limpias, si aparece relleno es de material calcáreo principalmente la distancia promedio entre grietas varía de 0,30 – 1m y una abertura de 1 – 5 mm, como promedio. La meteorización es el principal fenómeno físico – geológico que afecta la parte superior del macizo destruyendo las rocas hasta el grado de eluvio y roca muy alterada. Este fenómeno no tendrá mucha importancia en la obra ya que como se plantea anteriormente su mayor afectación es en la parte superior de las elevaciones, solo se corta estas capas alteradas en la entrada de la obra.

Túnel Melones – Levisa.

El macizo está agrietado en todas las direcciones, Existen cuatro familias de grietas fundamentales (sistema I: $72^{\circ}/64^{\circ}$, sistema II: $52^{\circ}/126^{\circ}$, sistema III: $82^{\circ}/6^{\circ}$, sistema IV: $54^{\circ}/274^{\circ}$). En el macizo en general las distancias entre grietas oscilan de 0,06 – 0,3 m, fundamentalmente, en segundo lugar predominan las menores de 0,06 m. En las zonas más meteorizadas y en zonas alteradas por las fallas, la distancia entre grietas predominantes es menor de 0,06 m. Las condiciones de las grietas van desde onduladas – rugosas a planas – rugosas en los afloramientos, así como en subterráneo. Las grietas son medio abiertas y su abertura oscila entre 1 – 5 mm, el

relleno predominante es serpentínico. Las paredes de las grietas poseen ligera alteración. Las serpentinitas presentan mayor grado de meteorización debido a que los minerales que la componen son inestables en las condiciones ambientales, está presente la lixiviación, ocretización, talquitización. Las gabrodiabasas son menos meteorizadas por su fortaleza

Túnel Yagrimal – Guaro

El tramo se encuentra altamente tectonizado, este tectonismo se asocia fundamentalmente al cuerpo intrusivo de gabrodiabasas. El macizo de roca carbonatada tiene forma tabular en su primera parte formación Bitirí y masivo en la segunda formación Camazán. El macizo de gabrodiabasas, es masivo, formado por un conjunto de diques paralelos. Las rocas más difundidas son las calizas y las gabrodiabasas. De acuerdo a la abertura las grietas se clasifican como medio abiertas (1 – 5 mm), con excepción de las calizas, donde predominan las grietas con abertura mayor de 10 mm. El relleno de las grietas se diferencia ampliamente de acuerdo al tipo de roca, en las calizas arcillosas de la formación Bitirí, predomina el cemento carbonatado, generalmente con ligeras alteraciones. En las aleurolitas calcáreas predomina el arenoso carbonatado al igual que en las calizas detríticas y organodetríticas de la Formación. Camazán, en el macizo de gabrodiabasas la mayoría de las grietas tienen cemento carbonatado, y en segundo lugar aparecen las grietas vacías. No obstante debemos señalar que el mayor porcentaje de las grietas vacías aparece en la superficie, predominando en profundidad las rellenas de carbonato y óxido de silicio. La distancia entre grietas predominantes es de 0,06 – 0,3 m en las gabrodiabasas y de 0,10 m en las calizas Bitirí y aleurolitas estratificadas. En las calizas Camazán el promedio es de 0,20 m, y en las brechas de calizas y gabros, la distancia varía entre 0,3 – 1m. En cuanto a condiciones de las fracturas, predominan las planas – rugosas, en las calizas arcillosas Bitirí, aleurolitas calcáreas y gabrodiabasas. Mientras que en las calizas Camazán, y brechas de calizas y gabro predominan las onduladas – rugosas. Las alteraciones en las paredes son en su mayoría ligeras (manchas de óxido, señales de meteorización débil), excepto en las aleurolitas calcáreas, en las que predominan las paredes sanas o limpias.

En las calizas de la Formación Bitirí, predominan tres sistemas de grietas (sistema I: $5^{\circ}/23^{\circ}$, sistema II: $15^{\circ}/159^{\circ}$, sistema III: $19^{\circ}/190^{\circ}$), En las calizas de Formación Camazán, existen también, tres sistemas principales (sistema I: $0^{\circ}/82^{\circ}$, sistema II:

50°/30°, sistema III: 29°/80°), incluyendo la estratificación. En el macizo de gabrodiabasas existen cuatro familias de grietas principales (sistema I: 47°/35°, sistema II: 5°/67°, sistema III: 61°/215°, sistema IV: 65°/316°), las aleurolitas calcáreas se diferencian de las calizas arcillosas por su composición, pero su orientación es similar a la de estas.

La meteorización afecta todas las litologías, fundamentalmente en superficie. No obstante en la profundidad a lo largo del trazado se observan sus manifestaciones en mayor o menor grado, de acuerdo a la litología, condicionado fundamentalmente por el alto grado de tectonismo de la zona. La mayor potencia de las rocas meteorizadas la poseen las gabrodiabasas, en las que aparecen espesores de hasta 30 o 40 m. No obstante la meteorización en estas rocas se manifiesta fundamentalmente a través de las grietas, en la superficie los bloques se conservan bastante frescos, compactos y resistentes al golpe del martillo en casi toda su potencia. Incluso en las zonas más intemperizadas hasta el grado de eluvio, aparecen bloques de rocas bien conservados. El carso aparece fundamentalmente en las calizas de la formación Bitirí en forma de oquedades de 3 y 5 cm de diámetro aproximadamente.

El tramo se encuentra altamente tectonizado, este tectonismo se asocia fundamentalmente al cuerpo intrusivo de gabrodiabasas, donde se desarrollan los principales desprendimientos.

Evaluación de la estabilidad de las rocas.

La evaluación de la estabilidad de las rocas de los macizos estudiados fue realizada por varios criterios tales como:

- Criterio de evaluación de la estabilidad de Deere (1963), (**RQD** – Rock Quality Designation). (Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. Colectivo, 1998. Moreno, 1998, Palmström, 1998).
- Criterio de evaluación de la estabilidad de Wikham, Tiedeman y Skinner (1972) del U. S. Bureau of Mines de Norteamérica . (**RSR** – Rock Structure Rating). (Colectivo, 1998. Moreno, 1998).
- Criterio de evaluación de la estabilidad de Barton (1974) (**Q** – Quality index). (Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. Colectivo, 1998. Moreno, 1998) .
- Criterio de evaluación de la estabilidad de Beniaowski (1979), (**RMR** – Rock Mass Rating). (Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. Colectivo, 1998. Moreno, 1998) .

- Criterio de evaluación de la estabilidad Bulichev (1975) (**S**). (Blanco, 1998. Martínez, 2000).

Después de realizar un análisis de los resultados obtenidos por estos criterios, y teniendo en cuenta la calidad real de estos macizos, derivada de la observación visual, y analizando cada parámetro evaluado, se propone que los criterios de Deere, Barton y Bieniawski, son los que más se adecuan a las condiciones reales de las obras estudiadas. De aproximadamente 940 tramos ingeniero geológicos de excavación evaluados, por las cinco metodologías anteriormente señaladas, el 86,7% de los resultados obtenidos por estos tres criterios se corresponde con las condiciones reales observadas en los macizos; de estas tres metodologías, la que mejor resultado arrojó, fue la metodología de Bieniawski; aspecto este que se corrobora, al analizar los parámetros que más inciden en los resultados obtenidos por estas metodologías.

Al considerar la metodología de Deere, (empleando la expresión de Palmström, 1974) esta expresa que el número de fracturas por metro cúbico es el factor que define la calidad de las rocas. En la metodología de Barton, (en la que intervienen otros parámetros), el tamaño del bloque ($\frac{RQD}{J_n}$) es el que más influye en los resultados obtenidos. Estos aspectos inciden sin lugar a dudas en la calidad de las rocas, pero la práctica ha demostrado, que existen otros parámetros que de igual forma influyen significativamente sobre la calidad y estabilidad de los macizos rocosos, como por ejemplo, la resistencia de la roca, el estado de las grietas, la dirección de la excavación respecto al agrietamiento; la afluencia de agua, entre otros que son muy representativos en los macizos estudiados. La metodología de Bieniawski, evalúa todos estos parámetros, de forma integral, lo que fundamenta los resultados alcanzados con su empleo. Como se ha dicho anteriormente la evaluación de las rocas se efectuó por sectores de excavación, entre los que se encontraron aquellos influenciados por las fallas, por el intenso agrietamiento, por la afluencia de agua, por las características específicas de método de explotación (minas) así como para los sectores más sanos y secos.

Al analizar los resultados llegamos a la conclusión de que los tramos altamente agrietados, en zona de fallas, etcétera, se comportaban, como promedio, similar a los tramos afectados por la afluencia de agua; es por esta razón que en las tablas de evaluación de estabilidad se muestran los resultados promedios para las rocas en

estado seco y saturado. Estos resultados muestran que la calidad de los macizos rocosos de las obras de estudio varían considerablemente, pudiendo encontrarse en una misma obra, rocas desde muy buenas hasta extremadamente malas, influyendo en esto el estado de los mismos, es por ello la significativa importancia de estudiarlos y tratarlos de forma diferenciada.

En la tabla 1, que aparece a continuación se muestran los valores promedios de los resultados obtenidos con el empleo de la metodología de Bieniawski, para las litologías más características de los macizos rocosos de las obras de estudio. Igualmente se realizó, por la metodología Barton para todas las litologías estudiadas y por la metodología de Bieniawski para las restantes.

Tabla No. 1. Valores promedios de la clasificación de los macizo rocoso más representativos de las obras estudiadas con el empleo del criterio de Beniaowski 1979

Obras	Rocas	RQD (%)	Valor según Rc	Valor del túnel para el RQD	Espacio entre fracturas	Condiciones de las fracturas	agua subterránea	Efecto de la orientación de las fracturas	Ajuste	RMR	RMR por fórmula*	Clase	Clasificación
Mina El Cobre	Tobas andesíticas de color gris verdoso de granos medios	90,99	7	17	10	20	15	Favorable	-2	67	60	II	Buena
	Porfiritas	92,5	4	20	10	20	15	Favorable	-2	67	60	II	Buena
Trasvase Caney - Gilbert	Tobas estratificadas agrietadas formando bandas inestables	54,51	4	13	8	5	7	Muy desfavorable	-12	25	39	IV	Mala
	Aglomerado de grano grueso	90,25	4	20	10	10	10	Favorable	-2	52	64	III	Media
	Aglomerado de grano fino a medio de color pardo verdoso de aspecto masivo	89,15	7	17	10	20	15	Favorable	-2	67	67	II	Buena
Mina	Dunitas	90,77	7	20	10	20	7	Regular	-5	58	62	III	Media

Merceditas	Peridotita alterada	78,93	4	13	10	10	7	Regular	-5	39	45	IV	Mala
Mia Amores	Cromita	92,00	7	20	10	15	15	Regular	-5	62	60	II	Buena

Trasvase este oeste Melones - Sabanilla	Calizas agrietada en zona de falla	10,00	2	3	8	10	10	Favorable	-2	31	30	IV	Mala
	Conglomerado brecha en zona de predominio de gabra en estado saturado	18,00	2	3	8	20	15	Favorable	-2	46	42	III	Media
	Serpentinita brechosa en estado seco	92,00	4	20	10	20	15	Favorable	-2	67	60	II	Buena
	Serpentinita brechosa en estado saturado	92,00	7	20	8	20	15	Favorable	-2	68	57	II	Buena
	Brecha de serpentinita meteorizada en estado saturado	33,00	2	8	8	20	4	Favorable	-2	40	38	IV	Mala
	Gabrodiabasa en estado seco	60,00	7	13	10	20	10	Favorable	-2	58	59	III	Media
	Gabrodiabasa en estado saturado	52,00	4	13	10	20	7	Favorable	-2	52	54	III	Media
	Calizas estratificadas Fm. Bitirí en estado saturado	40,00	2	8	10	20	7	Desfavorable	-10	37	40	IV	Mala

	Calizas masivas Fm. Camazán, en estado saturado	36,00	2	8	10	25	4	Regular	-5,00	44	41	III	Media
	Aleurolitas calcareas en estado saturado	30,00	1	8	5	10	7	Desfavorable	-10,00	21	25	IV	Mala
	Brechas calcareas en estado saturado	10,00	2	3	5	10	4	Regular	-5,00	19	17	V	Muy mala

Capítulo III - Caracterización geomecánica de los macizos rocosos en las obras estudiadas

La cuantificación de los parámetros de resistencia y deformacionales, que gobiernan el comportamiento tenso – deformacional de cualquier excavación, es uno de los principales problemas que enfrenta la mecánica de rocas, el modelo geomecánico del macizo, constituye, una herramienta para estimar este comportamiento, sobre la base de que el mismo, parte de los aspectos netamente geológicos, incorporando todos los parámetros físicos, resistentes y deformacionales del macizo rocoso involucrado. Cuanto más parámetros se logren incorporar, más representativo será el modelo geomecánico, del comportamiento real del macizo.

Es conveniente aclarar que el modelo geomecánico no es una propiedad del macizo rocoso como tal, sino una representación de su estado y comportamiento en un momento dado. Que facilita el estudio del macizo para determinadas condiciones.

A partir del análisis de las propiedades ingeniero geológicas y de las características mecánico – estructurales del macizo; teniendo en cuenta las características e intensidad de agrietamiento, el grado de bloquesidad del macizo, las formas de pérdidas de estabilidad que se manifiestan y el mecanismo con que se producen; el comportamiento, estado actual y grado de deterioro del macizo o sectores de él, se puede estimar cuales son los modelos geomecánicos más representativos en los macizos rocosos estudiados.

En la tabla 2 (que aparece al final del documento) se resumen los resultados obtenidos para las litologías más representativas de los macizos rocosos en las obras subterráneas estudiadas. De igual forma se obtuvo para las demás litologías en las diferentes obras.

Se debe significar que las observaciones visuales del macizo en las obras estudiadas con la realización de diferentes mediciones en las excavaciones, en algunos casos, complementaron los criterios para la estimación de estos modelos geomecánicos y en otras posibilitaron la confirmación de la diferenciación hecha.

Capitulo IV. Criterios geomecánicos – estructurales para el diseño de excavaciones y obras subterráneas.

A partir del conocimiento de las propiedades de los macizos rocosos y de su caracterización geomecánica es posible analizar particularmente en cada situación que se presenta las formas de su comportamiento mecánico – estructural, lo que sin lugar a dudas reviste gran importancia para garantizar un diseño más seguro y económico de la obra subterránea.

A continuación se analizan criterios geomecánicos – estructurales empleados para el diseño de excavaciones y obras subterráneas en los que se utiliza en forma diferenciada los parámetros geomecánicos obtenidos en los macizos rocosos estudiados

Propuesta del método del “Bloque Clave” para el análisis de la estabilidad del macizo rocoso.

El método del “Bloque Clave”, de Goodman y Shi dado a conocer en 1985 (Goodman et al, 1985), constituye una de las contribuciones más importantes para analizar la estabilidad de los macizos rocosos. Uno de los aspectos más importantes del método es que una vez determinados los bloques claves, estos se definen de tal manera que pueden ser identificados durante los trabajos de laboreo lo que permite aplicar las medidas de sostenimiento necesarias en cada caso con una reducción apreciable de los costos.

El método puede aplicarse con éxito en aquellos sectores del macizo estudiado donde las estructuras predominantes sean cuñas o bloques con morfología irregular. Tal es el caso de tramos de excavaciones de la Mina Merceditas, Mina Amores y algunos tramos del Tránsito este oeste Melones – Sabanilla, donde la litología predominante son las serpentinitas, ya que debido a la distancia entre grietas y a la luz de estas excavaciones, es posible identificar los bloques críticos.

Valoración de las posibles direcciones de esfuerzo principal (σ_1 , σ_2 y σ_3) por el método de de F.C. Phillips .

En el estudio de las relaciones estructurales de grupos de grietas o fallas complementarias, uno de los objetivos inmediatos es efectuar una correlación entre

la orientación de las fracturas y los esfuerzos a los que la roca ha estado sometida. A esta correlación se le denomina orientación del elipsoide de deformaciones. Pasando por cualquier punto de un cuerpo sometido a esfuerzos, siempre hay tres planos perpendiculares entre sí a través de los cuales sólo hay presión normal (o tangencial), las normales a estos tres planos son las tres “direcciones de esfuerzo principal”, en el caso general, los valores de los tres esfuerzos principales serán desiguales dando ejes de máximo, intermedio y de mínimo esfuerzo principal.

Los intentos para correlacionar las deformaciones observadas y las tensiones inferidas, nos llevan a un campo en el que aún reina una gran controversia. Tal es el caso del método de Bucher (1920), que representa las direcciones de los esfuerzos principales de las diaclasas, con el empleo de hemisferios superior, o el F.C. Phillips (1975), que utiliza el hemisferio inferior, siendo este último es el que emplearemos para el análisis.

Este método fue aplicado en algunos de los macizos estudiados. Así tenemos que en la mina Merceditas las posibles direcciones de los esfuerzos principales son: σ_1 (162°/25°), σ_2 (25°/55°) y σ_3 (268°/20°).

Para la mina El Cobre las posibles direcciones de esfuerzo principal son: σ_1 (325°/42°), σ_2 (160°/45°) y σ_3 (62°/8°), como se muestra en la figura 4, la que se realizó con el empleo del programa de computación **DIP**, de igual modo se representaron para las demás obras estudiadas, obteniendo los siguientes resultados.

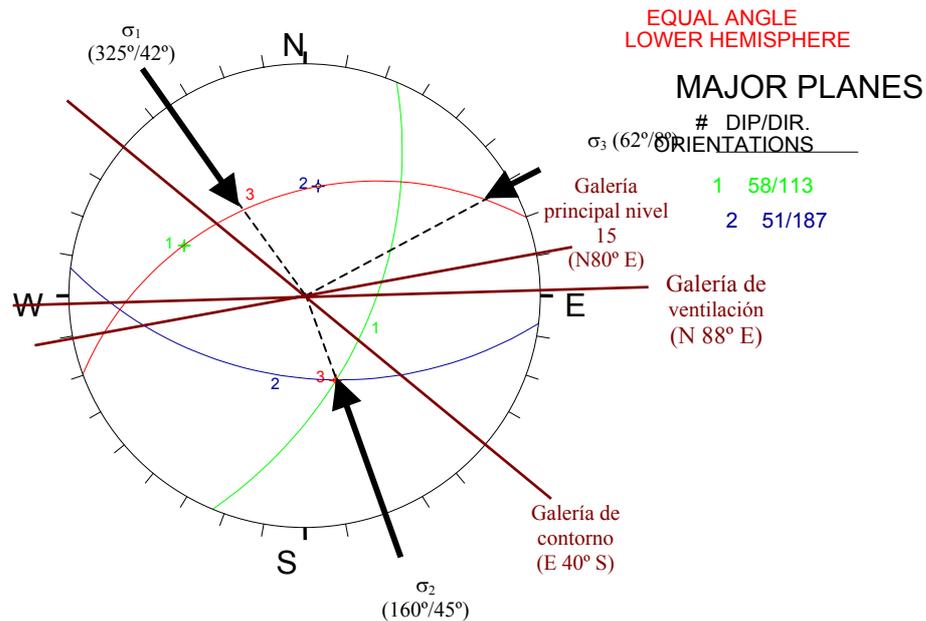


Figura 4. Posibles direcciones de los esfuerzos principales en las estructuras existentes en el macizo rocoso de la mina El Cobre

En las obras del Tránsito Caney Gilbert las direcciones de los esfuerzos principales son: σ_1 (34°/30°), σ_2 (250°/50°) y σ_3 (139°/16°).

En los túneles del tránsito Este Oeste Melones sabanilla las posibles direcciones de esfuerzo principal son:

Túnel Seboruquito – Esperanza: σ_1 (352°/20°), σ_2 (254°/30°) y σ_3 (112°/60°).

Túnel Enmedio – Guayabo: σ_1 (28°/20°), σ_2 (225°/70°) y σ_3 (120°/8°).

Túnel Guayabo – Pontezuelo σ_1 (278°/38°), σ_2 (145°/40°) y σ_3 (25°/18°).

Túnel Guaro – Manacal: σ_1 (9°/33°), σ_2 (150°/50°) y σ_3 (265°/20°).

Túnel Melones - Levisa: σ_1 (268°/30°), σ_2 (130°/50°), σ_3 (15°/15°).

Túnel Esperanza – Enmedio, σ_1 (268°/60°), σ_2 (75°/30°) y σ_3 (170°/12°).

Túnel Yagrumal - Guaro: Gabrodiabasas: σ_1 (87°/40°), σ_2 (260°/50°) y σ_3 (354°/3°).

Calizas Camazán σ_1 (227°/50°), σ_2 (92°/25°) y σ_3 (350°/20°).

Al analizar las condiciones existentes en el macizo en las excavaciones estudiadas, se puede observar que las principales formas de pérdidas de estabilidad, en la mayoría de los casos, se manifiestan por el techo y hastiales de las excavaciones, aspecto este que se corrobora al observar, que los esfuerzos principales máximo y medio inciden generalmente con ángulos y direcciones que afectan estas dos partes de las excavaciones.

En la mina Amores, el macizo se comporta muy estable, las principales formas de pérdidas de estabilidad que se manifiestan están condicionadas esencialmente, a sectores de intenso agrietamiento o debido al contacto muy tectonizado entre las litologías existentes, que provoca la caída de pedazos de rocas aislados. Al analizar la dirección de esfuerzos principales observamos que el esfuerzo principal máximo actúa en dirección N 25° W y un ángulo de 20°, este rumbo coincide con la dirección en que está construido el socavón (N 25° W), por lo que esta excavación no será prácticamente afectadas por σ_1 . las direcciones de los esfuerzos principales medio y mínimo son, σ_2 (225°/40°) y σ_3 (87°/40°).

.Estimación de la resistencia del macizo rocoso.

Para obtener criterios de la resistencia de los macizos rocosos se puede usar diferentes clasificaciones geomecánicas (índice RMR de Bieniawski, índice Q de Barton, índice RSR de Wickham, índice RMI de Palmström y otros), también algunos investigadores emplean criterios como el de Fairhurst (para rocas no alteradas) o el de **Ladanyi y Archambault** (para macizos muy agrietados). (Hoek, 1994. Hoek, 1995. Hoek, 1999)

En la actualidad se emplea mucho las propuestas de Hoek y Brown (Hoek, 1994. Hoek, 1995. Hoek, 1999). Fundamentadas a partir del gran volumen de ensayos y de un sistema de relaciones matemáticas que permiten obtener criterios sobre la resistencia del macizo.

Para la estimación de la resistencia de los macizos rocosos de Cuba Oriental estudiados, (Blanco et al, 2000. Cartaya, 1996. Falero, 1996. Guillerme, 1998) se plantea la expresión dada por Hoek y Brown en 1994. (Hoek, 1994. Hoek, 1995. Hoek, 1999).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[m_b \frac{\sigma_3}{R_c} + S \right]^a \quad (1)$$

Donde:

σ_1 y σ_3 – tensiones principales efectivas.

m_b – valor de la constante m de Hoek y Brown para el macizo rocoso estudiado.

R_c – resistencia a compresión lineal de la roca intacta.

S y a – constantes que dependen de las características del macizo estudiado. En algunos de los macizos estudiados (macizos de rocas fuerte o medianamente fuerte y poco fuerte) que presentan una alta cohesión, como por ejemplo, el macizo de la mina El Cobre, Amores, Merceditas, se puede considerar $a = \frac{1}{2}$; (Hoek, 1994. Hoek,

1999) por lo que la expresión anterior se transforma en:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m_b \frac{\sigma_3}{R_c} + S} \quad (2)$$

En otros macizos de baja calidad, por ejemplo el caso de las rocas meteorizadas del Tránsito este oeste Melones – Sabanilla, en los que la fuerza de enlace se ve afectada y la resistencia a tracción se hace débil, se emplea el criterio de resistencia modificado, o sea haciendo $S = 0$. (Hoek, 1994. Hoek, 1999)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[m_b \frac{\sigma_3}{R_c} \right]^a \quad (3)$$

De las investigaciones realizadas en los macizos rocosos estudiados se obtiene los siguientes resultados en las tablas 3 y 4.

TABLA 3. Parámetros de cálculos obtenidos.

Obra	Tipos de rocas	Parámetros de cálculo					
		RQD	RMR	GSI	$\frac{m_b}{m_i}^*$	S	a
Mina Merceditas	Peridotita meteorizada	65 - 75	50 - 55	65 - 70	0,094	0,001 **	0,60
	Peridotita	85 - 90	70 - 75	85	0,297	0,017	0,5
	Cromita	85	70	80	0,243	0,026	0,5
	Dunita	75 - 85	60	60 - 70	0,202	0,04	0,5
Mina Amores	Peridotita	85 - 90	45 - 60	60 - 70	0,197	0,018	0,5
	Dunita	80 - 85	45 - 60	60 - 70	0,189	0,019	0,5
	Cromita	90 - 95	60	65 - 70	0,208	0,020	0,5
Mina El Cobre	Tobas andesíticas	90	70	80 - 85	0,274	0,028	0,5
	Porfiritas	95	75	85 - 90	0,306	0,036	0,5
Otros túneles	Serpentinita meteorizada	45 - 50	40	55	0,092	0,0006**	0,6
	Serpentinita no alterada	60 - 75	55 - 60	60 - 65	0,116	0,008	0,5
	Laterita ferroniquelífera	< 45	35 - 40	45 - 50	0,062	0,0007**	0,65

Donde: m_i * - valor de la constante m_b de Hoek y Brown para roca intacta.

** - Se recomienda en estos casos tomar el valor de $S = 0$, ya que son macizos muy afectados y de muy baja calidad.

TABLA 4. Expresiones para la estimación de la resistencia de las rocas.

Obra	Tipo de roca	Criterio para la estimación de la resistencia.
Mina Merceditas	Peridotita meteorizada	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((0,5 \div 0,7) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,001 \right)^{0,6}$
	Peridotita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((5,5 \div 6,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,017 \right)^{0,5}$
	Cromita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((3,7 \div 4,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,026 \right)^{0,5}$
	Dunita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((2,0 \div 3,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,036 \right)^{0,5}$
Mina Amores	Peridotita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((4,5 \div 5,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,018 \right)^{0,5}$
	Cromita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((4,0 \div 4,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,020 \right)^{0,5}$
	Dunita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((5,0 \div 5,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,019 \right)^{0,5}$
Mina El Cobre	Tobas andesíticas	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((4,3 \div 4,8) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,028 \right)^{0,5}$
	Porfíritas	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((6,5 \div 7,0) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,036 \right)^{0,5}$
Otros túnel	Serpentinita meteorizada	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((0,2 \div 0,4) \frac{\sigma_3}{R_c} \right)^{0,6}$
	Serpentinita poco alterada	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((2,0 \div 2,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,008 \right)^{0,5}$
	Laterita ferroníquelífera	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left((0,2 \div 0,3) \frac{\sigma_3}{R_c} \right)^{0,65}$

*- podría emplearse también la expresión (4):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left(0,6 \frac{\sigma_3}{R_c} \right)^{0,6} \dots\dots\dots(4)$$

Esquemas de interacción macizo – fortificación más frecuentes en las zonas de estudio.

La interacción del macizo con la fortificación, depende de un gran número de factores tanto inherentes al macizo, como al tipo de fortificación que se utilice, donde esta última debe estar diseñada para garantizar el “trabajo conjunto” con el macizo circundante. Estos esquemas, posibilitan establecer el esquema de cálculo que permite determinar cuantitativamente los parámetros que intervienen en cada caso, en este proceso de interacción.

La denominación de estos esquemas es convencional por lo que, antes de continuar, es necesario hacer la siguiente aclaración. El *esquema de interacción macizo fortificación* no tiene que coincidir necesariamente con el modelo geomecánico del macizo rocoso, a pesar de que las propiedades geomecánicas del macizo es uno de los elementos principales a tener en cuenta a la hora de elegir el esquema de interacción que se va a utilizar. Esto se debe a que un mismo macizo puede ser representado por distintos esquemas de interacción, en dependencia de las relaciones existentes entre sus características mecánicas y las del campo tensional actuante, y que sobre el carácter de interacción también influye el tipo de fortificación. Por último sobre la caracterización del esquema ofrece también influencia, el tiempo de servicio de la excavación y la tarea de investigación que se realiza.

En este acápite se hace a un breve análisis de los *esquemas de interacción macizo – fortificación* más representativos para las condiciones estudiadas. Dándose en cada caso por lo menos una expresión para el cálculo de la presión en las rocas acorde a la caracterización que se hace del proceso. (Blanco, 1998. Cartaya, 1996).

Esquema elástico de interacción macizo – fortificación: Se recomienda utilizar para el análisis de la presión actuante sobre excavaciones horizontales situadas a una profundidad (H) tal que se cumpla $H \gg R_L$, siendo R_L el radio de laboreo de la excavación. Este esquema de interacción se puede presentar en sectores del macizo rocoso de la mina Merceditas, El Cobre y en el trasvase Caney - Gilbert.

Esquema rígido - plástico de interacción macizo fortificación: Los resultados obtenidos muestran que para este caso el volumen de roca fracturada o destruida no depende de la profundidad de la excavación, sino de las características de resistencia de las rocas y de los parámetros geométricos de la zona de deformación

o de destrucción. Esta variante que considera la presión que produce una zona de rocas destruidas en el contorno de la excavación, está difundida y se presenta en sectores del macizo rocoso de la mina El cobre, del trasvase Caney – Gilbert, del túnel seboruquito – Esperanza, del túnel Melones – Levisa, en algunos sectores del túnel Enmedio – Guayabo y Yagrupal – Guaro, donde la litología más común son las calizas, conglomerados brechosos y brechas calcáreas. En sectores formados por cromitas, gabros y peridotitas alteradas de la mina Merceditas. Y en los sectores de serpentinitas alteradas y muy agrietadas de los túneles populares de Holguín.

La variante que considera la presión que produce una columna de rocas se puede presentar (es la menos difundida) en el túnel Esperanza – Enmedio, Guayabo – Pontezuelo, Guaro – Manacal y En medio – Guayabo. Esta variante que supone la presión debido al peso de las rocas contenido en la bóveda de destrucción es frecuente en los macizos rocosos estudiados, se presenta en muchos de los sectores estudiados de la mina Amores, de los túneles populares de Moa, del túnel Esperanza – En medio, Guayabo – Pontezuelo, Guaro – Manacal, en algunos tramos del túnel Yagrupal – Guaro y en sectores de la mina Merceditas, constituidos por peridotitas, peridotitas serpentinizadas y dunitas, donde se forma la bóveda.

Esquema elástico - plástico homogéneo de interacción macizo fortificación: Se presenta cuando las deformaciones plásticas que ocurren en las partes del macizo rocoso que rodean la excavación, se manifiestan sin una variación visible de las propiedades de la roca, o sea sin destrucción. En este caso, a diferencia del rígido plástico, la parte del macizo rocoso situada fuera de los límites de la zona de deformaciones plásticas interviene también en el proceso de carga a la fortificación

Estudiando el carácter de distribución de las tensiones que se producen alrededor de las excavaciones, según este esquema de interacción se ve que en comparación con el esquema elástico, en el cual las máximas tensiones tangenciales se producen en el contorno, aquí estas tienen lugar en la frontera entre de las zonas de deformaciones plásticas y elásticas. Este esquema se puede presentar en sectores de los macizos rocosos estudiados como un desarrollo de otros esquemas, tal es el caso de sectores de macizo rocoso de la mina El cobre y Amores.

Esquema elástico plástico heterogéneo de interacción macizo fortificación: Debido a que muchas de las rocas en los macizos estudiados no poseen una significativa plasticidad, puede ocurrir que a medida que se aumenta la profundidad de la excavación (o por otras causas), aumente el campo tensional existente y se

comience a desarrollar el proceso de destrucción de la roca. En tales caso el medio que rodea a la excavación se hace heterogéneo, ya que sus propiedades van a ser variables en dependencia de la zona del contorno de la excavación.

Algunos autores analizan esta situación considerando que la zona de deformaciones plásticas que se forma alrededor de la excavación es simultáneamente la zona de destrucción y que la frontera de ella con el resto del macizo, es a la vez frontera entre dos medios que poseen diferentes propiedades. Según este criterio la roca en realidad se estudia como un material frágil coincidiendo en este caso el límite de elasticidad de dicho material con el de resistencia.

Este esquema es representativo de algunos de los macizos rocoso estudiados, y en ocasiones se puede presentar como un desarrollo del esquema elástico – plástico homogéneo o del elástico particularmente en aquellos sectores muy fracturados y meteorizados, donde las rocas se encuentran muy afectadas con comportamientos mecánicos predominantemente frágiles

Esquemas de interacción que consideran el macizo rocoso como un medio discreto.

En los macizos estudiados se presentan situaciones en que ellos se comportan como un medio discreto, las más comunes son: la presencia de sectores del macizo fracturado en bloques de formas más o menos regulares que yacen con alguna inclinación respecto al eje de la excavación; también en ocasiones se presentan situaciones con bloques acuñaos que tienden a deslizarse hacia la excavación y en no pocos casos sectores triturados del macizo.

Macizo fracturado en bloque: Para macizos agrietados con la formación de capas de rocas regulares o irregulares por el techo de la excavación, se considera que la zona de destrucción en general no es simétrica respecto al techo,

Macizos con la presencia de bloques acuñaos: Cuando el macizo presenta la acción de bloques acuñaos (cuñas) que tienden a deslizarse hacia la excavación.

Macizo triturado: Cuando el agrietamiento es caótico (desordenado), se forma en el techo y en ocasiones en los hastiales una zona de roca muy fracturada.

Estos esquemas que consideran el macizo como un medio discreto son muy característicos de los macizos del complejo ofiolítico.

Conclusiones

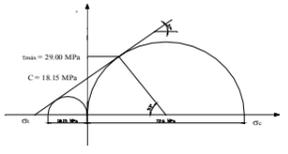
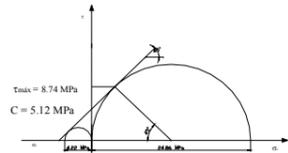
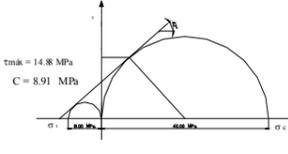
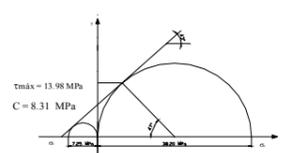
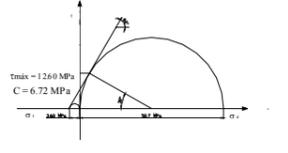
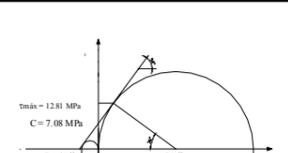
Como resultado del presente trabajo se plantean las siguientes conclusiones.

1. Se establecen las principales características geomecánicas de los macizos rocosos estudiados y se proponen los modelos geomecánicos más representativos para cada caso.
2. La metodología de investigación desarrollada constituye un aporte científico y brinda elementos novedosos, además es aplicable a cualquier tipo de macizo tanto en obras subterráneas como de superficie.
3. Los resultados del estudio del agrietamiento de los macizos rocosos muestran que un gran porcentaje de ellos se presentan agrietados, lo que se relaciona a las formas preponderantes en que se manifiesta la pérdida de su estabilidad y el mecanismo de actuación de la presión.
4. Como resultado de la evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos según su calidad y estabilidad se obtiene que predominan los macizos de calidad regular, aunque en diferentes sectores y obras se presentan macizos en mal estado, lo que es condicionado además, de por los problemas estructurales, por el deterioro que ellos han sufrido por efectos del agua, la erosión y la atmósfera subterránea.
5. Se obtienen un grupo de criterios geomecánicos – estructurales que pueden ser aplicados para el diseño de excavaciones y obras subterráneas, fundamentando su empleo.

Recomendaciones.

1. Generalizar el empleo de la metodología desarrollada en la caracterización geomecánica de macizos rocosos en otras obras, tanto subterráneas como de superficie, en otras regiones del país.
2. La implementación y utilización de los resultados obtenidos por las diferentes empresas e instituciones a que pertenecen las obras estudiadas.
3. Evaluar las características geomecánicas con el empleo de otras tecnologías y técnicas de investigación.
4. Desarrollar otros criterios mecánico – estructurales que puedan ser empleados en el diseño de excavaciones y obras subterráneas.

Tabla 2. Características geomecánicas de las litologías más representativas de los macizos rocosos estudiados

Obras	Sectores	Características mecánico estructurales										Estabilidad				Modelo Geomecánico más representativo
		σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (MPa)	C (MPa)	ϕ (°)	σ_t / σ_c	Jv (grietas/m ³)	Volumen del bloque (Vb - m ³)	Circulo de Mohr	Modelo mecánico	RQD	Q	RMR	principales forma de pérdida de estabilidad	
El Cobre	Tobas andesíticas de color gris verdoso	72,6	18,15	5918	18,16	37	0,25	7,27	0,2 - 10		Elástico - Plástico	Excelente	Media	Buena	Formación de zonas que experimentan poca deformación	Preponderantemente Elástico - plástico, lo que puede llegar a ser rígido - plástico, cuando la roca del contorno es afectada produciéndose su fracturación
	Porfíritas	24,86	4,22	6387	5,12	45	0,17	6,81	0,2 - 10		Elástico	Excelente	Media	Media	formación de una zona de roca afectada, sin desprendimiento o desplazamiento	Generalmente con características elásticas, puede llegar a Elástico - plástica, bajo determinados condiciones hidrogeológicas
Trasvase Caney - Gilbert	Tobas estratificadas agrietadas formando bandas inestables	40	8		8,91	42	0,20	18,33	0,0002 - 0,01		Elástico - Frágil	Media	Muy mala	Mala	Desprendimientos, al superar la resistencia al corte de las rocas de estratos finos de muy poca inclinación	Elástico, predomina la fragilidad llegando a ser Frágil, bajo determinados condiciones mecánico - estructurales
	Aglomerado de grano grueso	38,2	7,25		8,31	43	0,19	7,5	0,01- 0,20		Elástico - Plástico	Excelente	Media	Media	Formación de zona de destrucción, con desprendimientos de la roca	Con características elástico - plástica, aunque en determinadas condiciones se transforma en rígido - plástico
	Aglomerado de grano grueso a medio de color gris verdoso de aspecto masivo	50,7	3,6		6,72	60	0,07	7,83	0,01- 0,20		Elástico - Frágil	Buena	Buena	Buena	Formación de zona de destrucción, con algunos desprendimientos súbitos.	Predominantemente las características elástico - frágiles-puede en ocasiones presentarse como un medio elástico - plástico homogéneo y heterogéneo
Mina Merceditas	Dunita	43,33	4,65		7,08	54	0,11	7,34	0,2 - 10		Elástico - Frágil	Excelente	Media	Media	Desprendimientos aislados hasta derrumbes, formación de bóveda de equilibrio.	Predominantemente las características elásticas con marcada fragilidad, aunque puede presentarse como un material elástico con deformaciones remanentes

Continuación Mina Merceditas	Peridotita alterada	47,09	5,19		7,8	53	0,11	10,93	0,01 - 0,20		Elástico - Plástico	Buena	Mala	Mala	formación de zona de destrucción, con desprendimientos.	En sectores se presenta como elástico - plástico heterogéneo, pudiendo llegar a Rígido - plástico, con tendencia a perder su capacidad portadora
Mina Amores	Cromita	67,23	22,07		19,26	30	0,33	6,9	0,2 - 10		Elástico	Excelente.	Media	Buena	formación de bóveda de equilibrio	Generalmente Rígido - Plástico, puede llegar a Frágil, bajo determinados condiciones mecánico - estructurales
Trasvase Este - Oeste Melones Sabanilla	Calizas agrietada en zona de falla	52,00	10,4	2402	11,6	42	0,20	31,81	0,0002 - 0,01		Elástico - Frágil	Muy mala	Muy mala	Mala	Formación de zona de roca detruída, con abundantes desprendimientos	Predominantemente características elástico - frágiles, puede en ocasiones presenarse como elástico - plástico heterogéneo
	Conglomerado brecha en zona de predominio de gabro en estado saturado	16,00	0,43	1423	1,3	71	0,03	6	0,0002 - 0,01		Rígido- Plástico	Muy mala	Muy mala	Media	Formación de zona de roca detruída, con abundantes desprendimientos	Predominantemente características rígido - plasticas, puede en ocasiones presenarse su forma inicial como elástico - plástico heterogeneo
	Serpentinita brechosa en estado saturado	27,00	7,83	9600	7,26	33	0,29	6,9	0,2 - 10		Elástico - Plástico	Excelente.	Media	Buena	Formación de bóveda de equilibrio, con algunos deprendimientos	Con características principalmente rígido - plástica y elástico - plástica
	Serpentinita brechosa en estado seco	56,00	15,12	1000	14,54	35	0,27	6,9	0,2 - 10		Elástico	Excelente.	Buena	Buena	Formación de una zona de roca afectada, sin desprendimiento o desplazamiento	principalmente con características Elástico - Plástico, con tendencia , en ocasiones a manifestarse como elástico - plástico

Continuación Trasvase	Brecha de serpentinita meteorizada en estado saturado	17,05	2,17	1015	3,04	51	0,13	31,80	0,0002 - 0,01		Elástico - Plástico	Mala	Muy mala	Mala	formación de bóveda de equilibrio, con algunos deprendimientos	Elástico - Plástico heterogéneo, con tendencia a pródigo plástico
	Gabrodiabasa en estado seco	76,44	5,09		9,86	61	0,07	16,60	0,01 - 0,20		Elástico - Plástico	Media	Media	Media	formación de bóveda de equilibrio, con algunos deprendimientos	Elástico - plastico, que puede llegar a presentarse como rígido - plástico
	Gabrodiabasa en estado saturado	45,6	2,60	1033,63	5,44	63	0,06	19,00	0,01 - 0,20		Elástico - frágil	Media	Mala	Media	Formación de bóveda de equilibrio, con algunos deprendimientos	Predominantemente características elásticas, puede en ocasiones presentarse como elástico - frágil
	Calizas arcillosas Fm. Bitirí en estado saturado	23,90	0,95	8700	2,38	67	0,04	22,7	0,2 - 10		Elástico - frágil	Media	Mala	Mala	Formación de zona de roca destruida, con desprendimiento	Predominantemente características elástico - plasticas, puede en ocasiones presentarse con rotura frágil
	Calizas masivas Fm. Camazán, en estado saturado.	16,40	1,76	1099	2,68	54	0,11	23,9	0,0002 - 0,01		Elástico - Plástico	Mala	Media	Media	Formación de bóveda de equilibrio, con algunos deprendimientos	Elástico - plastico, que puede llegar a presentarse como rígido - plástico
	Aleurolitas calcareas en estado saturado	4,21	0,55	7025	0,76	50	0,13	25,7	0,01 - 0,20		Elástico - Plástico	Mala	Muy mala	Mala	Formación de zona de roca destruida, con desprendimiento	Elástico - plastico, que puede llegar a presentarse como rígido - plástico
	Brechas calcareas en estado saturado	5,50	1,65	6170	1,50	33	0,30	31,8	0,0002 - 0,01		Elástico - Plástico	Muy mala	Ext. Mala	Muy mala	Formación de zona de roca destruida, con desprendimiento	Elástico - plastico, que puede llegar a presentarse como rígido - plástico