

FIGURA 3. Diagrama de tensión deformación.

Modelo rígido-plástico: En este caso las deformaciones plásticas son mucho mayores que las elásticas y estas últimas se pueden despreciar. En el macizo estudiado este modelo está presente en diferentes situaciones, donde se forman zonas de rocas destruidas que actúan sobre la excavación. El modelo puede producirse directamente (formación de una zona o bóveda de roca destruida) al variarse el campo tensional o con el transcurso del tiempo como un desarrollo excesivo de las deformaciones plásticas de un modelo elástico-plástico. Para este modelo es válida la condición de estado límite dada por Coulomb-Mohr.

$$\tau_c = \sigma_n \cdot T_p \rho + C$$

Modelos discretos: Se presentan diferentes variantes de estos modelos, los más comunes son la presencia de sectores de bloques de formas más o menos regulares que yacen con alguna inclinación respecto al sector de la excavación (Figura 4). También en ocasiones se presenta la acción de bloques acunados que tienden a deslizarse hacia la excavación.

BIBLIOGRAFÍA

BLANCO, T.R.: *Estudio de estabilidad y la presión minera en las excavaciones subterráneas*, Unión Nacional de Loja, Ecuador, 1993.

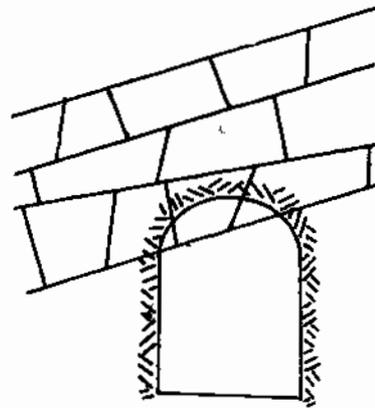


FIGURA 4. Modelo discreto más común, con presencia de bloques inclinados respecto al techo de la excavación.

BLANCO T.R. y E. RODRIGUEZ: «Características de formación de las rocas destruidas en el techo de las excavaciones», en *Minería y Geología* (Moa) 1(2): 20 - 30, 1988.

BORISOV, A.A.: *Mecánica de rocas y del macizo*, Nedra, Moscú, 1986.

BULISHEV, N.S.: *Mecánica de obras subterráneas*, Nedra, Moscú, 1986.

CARRATER, T.G. y OTROS: *Crow-pillar Risk Assessment Planning Aird for Costeffective Mine Closure Remediation*, Golder Associates, Canadá, 1995.

CARTAYA P., MADAY: «Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la mina Merceditas», Tesis de maestría, ISMM (Moa), Departamento de Minería, 1996, 77h.

GONZÁLEZ, N.: «Caracterización del agrietamiento en la mina Merceditas», Trabajo de diploma, ISMM (Moa), 1995, 60h.

GUTIERREZ G.L.: «Caracterización del agrietamiento en la mina Merceditas», Trabajo de diploma ISMM (Moa), 1996, 60h.

HARUTOSH, KANDR, S.M. TIMOSHENKO: «Beams on Liner Viscoelastic Foundations», en *Journal of Geotechnical Engineering*, 109 (6) jun, 1993.

HOEK, E. and E.T. BROWN: *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980, 527p.

Informe geológico de la mina Merceditas, Empresa Minera de Cromo, Punta Gorda, Moa, 1996.

JOZSEF, A.; K. MIKLÓS y Y. RÍOS: «Caracterización general de la asociación ofiolítica de la zona Holguín-Moa y el papel de las ofiolitas en el desarrollo estructural de Cuba», *Minería y Geología* (Moa) 1(1): 27 - 30, 1989. □

Acción de la presión minera en la mina Merceditas, Moa

Osmany Mondéjar Oquendo¹
Roberto Blanco Torrens²
Armando Cuesta Recio³

¹ MSc. Profesor del Departamento de Minería. ISMM
² Dr.C. Profesor titular del Departamento de Minas. ISMM
³ MSc. Profesor del Departamento de Minería. ISMM

INTRODUCCIÓN

Actualmente en las minas de cromo del nordeste de Holguín, para la determinación de la presión minera, se utilizan diferentes expresiones de cálculo sin fundamentar su empleo, teniendo en cuenta las condiciones reales que presenta el macizo rocoso y sin establecer el mecanismo de acción del campo tensional actuante.

En el presente trabajo se planteó como objetivo principal establecer el mecanismo de acción de la presión minera para las diferentes formas en que se manifiesta el comportamiento mecánico estructural de distintos sectores del macizo rocoso, lo cual permitirá una adecuada selección y proyección de las medidas a tomar para contrarrestar la acción de la presión minera.

Geología y tectónica

En la zona de estudio predominan rocas ultramáficas como peridotitas harzburgitas, y en menor cantidad wherlitas que unidas al gabro y las diabasas forman la asociación ofiolítica. Las rocas ultramáficas aparecen serpentinizadas en mayor o menor grado; asociadas a ellas aparecen rocas de composición básica las que se encuentran en menor cantidad. La composición de las rocas es heterogénea. El complejo de diabasas en la zona estudiada no aparece como se define clásicamente en forma de bloques, posiblemente debido a la complejidad tectónica de la zona.

La tectónica de la región es compleja, y pone de manifiesto la superposición de fenómenos tectónicos originados en condiciones geodinámicas constantes en diferentes periodos, así el sistema de mantos tectónicos que caracteriza la estructura geológica de las secuencias más antiguas surgió en un ambiente de compresión máxima. Los eventos tectónicos más jóvenes surgieron, en lo fundamental, bajo esfuerzos de tracción de la corteza terrestre, y desarrollaron diferentes sistemas de fallas. La dirección predominante de plegamiento de las secuencias más antiguas es: NE-SE y NW.

La tectónica disyuntiva es igualmente compleja y puede dividirse por su dirección submeridional y NE.

Los planos de deslizamiento se caracterizan por presentar ángulos abruptos de buzamiento, asociados a ellos aparecen estructuras secundarias como grandes grietas, pliegues y espejos de fricción y cizallamiento.

La región de estudio se ubica dentro del contacto sismotectónico de Cuba oriental donde las principales zonas sismogeneradoras (ZSG) a tener en cuenta en la región son:

1. **ZSG Oriente:** Asociada a la falla transcurrente Bartlett-Caimán ubicada al sur de Cuba oriental, con dirección predominante E-W. Se considera una falla transcortical con extensión de más de 1 660 km, ancho de 150 km aproximadamente y una profundidad de más de 50 km, buzamiento

de 60-80° y acimut de buzamiento de 180° predominando en esta zona generadora la más alta sismicidad de Cuba.

II. ZSG Cauto-Nipe: Esta asociada a una zona de fractura de dirección SW-NE, que parte desde las inmediaciones de la localidad de Niquero-Cabo Cruz por el borde norte de la Sierra Maestra hasta la Bahía de Nipe, conocida también como falla Cauto; se presenta como falla normal con ángulo de buzamiento de 60-80°, una extensión de 270 km y una profundidad promedio de 30 km, de carácter cortical según datos geofísicos.

III. ZSG Sabana: Esta asociada a la falla Sabana también conocida con el nombre de Norte Cubana. Tiene una extensión de más de 1.000 km con desplazamiento de hasta 300 m de salto vertical presentándose en forma de bloques dislocados por fallas internas del territorio cubano con dirección SW-NE.

IV. ZSG Purlal: Asociada a una falla profunda con desplazamiento lateral. A esta zona se asocian manifestaciones de actividad sísmica con contribución lineal y epicentros de baja energía, se valora según su potencia generadora como una zona de tercera categoría.

V. ZSG Santiago-Moa: Esta asociada a una fractura de dirección NE-SW con extensión aproximada de 150 km y un ancho de 7-15 km y una profundidad de 20-30 km con movimiento lateral vertical.

Propiedades físico-mecánicas de las rocas

Para el estudio de las propiedades físico mecánicas de las rocas se tomaron muestras en los sectores más representativos de la mina. Los resultados de las determinaciones efectuadas se ofrecen en las tablas 1 y 2.

TABLA 1. Resumen de las propiedades mecánicas de las rocas

Tipo de roca	R _c MPa	Variación, %	R _t MPa	Variación, %
Cromita	90,26	23,63	8,36	26,82
Dunita	39,45	27,25	5,44	24,20
Gabro	38,09	29,73	10,82	28,56
Peridotita	40,19	26,76	7,01	23,41

TABLA 2. Resumen de las propiedades físicas de las rocas

Tipo de roca	Masa volumétrica, t/m ³	Variación %	Densidad t/m ³	Variación %	Humedad %	Variación %
Härburgulita	2,55	11,59	2,66	10,71	0,46	2,21
Peridotita	2,83	10,95	2,66	10,71	0,73	7,98
Cromita	2,92	11,02	3,98	11,02	0,36	6,09
Qunita	2,66	14,70	2,77	10,39	0,6	4,97

En los valores de las propiedades de las rocas existe una gran variación, lo que no permite utilizar el valor promedio pues introduciría un error más allá de lo permisible por lo que se hace necesario determinar la correlación existente entre la variación lineal de cada una de estas propiedades y realizar la zonificación en función de esta variación.

Análisis del agrietamiento

Es este el factor más importante y a la vez el más difícil de evaluar en el estudio geomecánico de los macizos serpentiniticos, debido a que las grietas se presentan con irregularidades notables tanto por su litología, tipología y génesis como por sus características y manifestaciones. Aparecen grietas de origen tectónico y grietas de origen no tectónico.

Dentro de las grietas no tectónicas están aquellas microestructuras primarias relacionadas con el proceso de serpentinización de las rocas ultrabásicas. Tanto estas grietas como las no tectónicas son muy propensas a deformarse por procesos de erosión y meteorización que las ensanchan, profundizan y multiplican.

Los fenómenos gravitacionales y la dilatación, debido a fuerzas tensionales por el propio peso de estas rocas, son también factores que contribuyen al agrietamiento.

Al originarse fenómenos tensionales en la superficie de los bloques preexistentes con propiedades similares, tienden a fracturarse en otros más pequeños con dimensiones similares y un número constante de sistemas de grietas. Cuando las propiedades de los bloques o pseudocapas son diferentes ocurren saltos bruscos en la dirección y números de sistemas de grietas así como en los elementos de ganancia y espaciamiento de las grietas.

El laboreo de cámaras y excavaciones y la recuperación de los pilares provoca cambios tensionales en los contornos de las excavaciones, lo que a su vez trae consigo la variación de las magnitudes y direcciones de las tensiones en el macizo, origina nuevas grietas y modifica las existentes.

Asociado a los procesos de formación de grietas tiene lugar la aparición de un fenómeno típico conocido como estructuras budinas, lo cual ocurre cuando en un paquete de rocas plásticas se encuentran rocas duras y

frágiles en posición horizontal, que al partirse en pedruzcos, aparecen grietas aisladas de separación por tracción, que en ocasiones se confunden con aquellas grietas no tectónicas producidas por fenómenos gravitacionales, por la acción del laboreo u otras actividades propias de la minería.

Por lo anteriormente expuesto no es posible realizar el análisis del agrietamiento de forma general y se hace necesario entonces una zonificación, para lo cual tomamos como base la tipificación de las zonas agrietadas desarrollada en 1996 por Rogelio Rosales Antunes en macizos de Holguín.

Según las características del agrietamiento, el macizo estudiado se dividió en tres casos o tipos:

Caso A: La estructura predominante es en bloques bastante perfectos o regulares, de tamaño considerable. El agrietamiento es planal bien definido, con matriz rocosa fuerte y de poca alteración. Estas características son afectadas por la formación de grietas secundarias producto del sistema de laboreo, lo que no permite establecer el tamaño original de los bloques. La fracturación secundaria provoca la formación y caída de fragmentos de roca hasta que aparece una superficie en forma de bloques grandes y bien pulidos, y se evidencia la preexistencia de una zona de bloques de dimensiones más pequeñas, formada generalmente por dos sistemas de grietas.

Caso B: La estructura predominante es en forma de cuñas o pirámides con tamaños y volúmenes irregulares, un mayor número de sistemas de grietas y menor espaciamiento que en el caso anterior. La matriz rocosa es de fuerte a media con una alteración visible, y es este el caso más frecuente. El caso más inestable es cuando se asocia a la aparición de una falla o sistema de grietas en la misma dirección del eje de la galería. Se caracteriza por la ocurrencia de desprendimientos asociados a la

variación del estado tensional en el contorno y la disminución de la cohesión de las sustancias cementantes que unen partículas y pedruzcos de rocas que provocan la aparición de una sobreexcavación en forma de cuña en el techo de las excavaciones.

Caso C: Estructura de aspecto breñoso o triturado con pequeños fragmentos regulares hasta redondos, el agrietamiento es caótico en todos sus sentidos. La matriz rocosa tiene valores de resistencia más bajos, mayor alteración y humedad que en los casos anteriores. Se asocia o no, a fallas con sentido desfavorable. El orden caótico de este agrupamiento, que si bien es intenso no es profundo, conforma un sistema macizo-excavación estable, independientemente de que ocurran cambios tensionales bruscos en los contornos. La aparición de este caso trae aparejado la disminución de la sección transversal de las excavaciones.

Evaluación de la estabilidad

Para el estudio de la estabilidad se usaron clasificaciones geomecánicas conocidas (Hook and Brow, 1982):

- Rock Quality Designation (RQD), (Deere, 1963).
- Método del Instituto Noruego de Geotécnica (Barton, 1963).
- Rock Structure Rating (RSR) (Wickhan, Tiedemann y Skinner, 1972).
- Clasificación geomecánica (RMR) (Bieniawski, 1973).

Los parámetros evaluados por cada clasificación presentan, de forma integral, una elevada variación en el macizo, aparejado a una dispersión elevada de los resultados de estabilidad obtenidos para una misma galería. Para obtener resultados más confiables y menos dispersos se hace necesaria una zonificación de macizo rocoso (Tabla 3).

TABLA 3. Resultados de la evaluación geomecánica del macizo por varias metodologías

Clasificación	Parámetros	Rango de Valores			
		General	Caso A	Caso B	Caso C
Deere	RQD	73,12-7,78	73,12	30,60	7,78
Barton	Jn	6-20	6-12	12-15	15-20
	Jr	1,5-4	1,5-2	1,5-2	1-4
	Ja	1,5-4	2-4	2-4	1,5-4
	Jw	0,66-1	0,66-1	0,66-1	0,66-1
	SRF	2,5-10	2,5-5	2,5-5	5-10
Wickhan	Q	0,75-0,01	0,75	0,39	0,01-0,17
	A	26-15	26	15	15
	B	12-30	26-30	16	12
	C	13-18	15-18	12	12
	RSR	74-39	67-34	43	39
Bieniawski	Cof. de resistencia	3-17	16	6	3
	Calidad del RQD	5-10	7-10	6-7	5-7
	Esp. entre grietas	26-6	20-23	5-10	5
	Caract. de las grietas	25-0	20-25	10-12	6-12
	Cof. del agua	4-7	4-7	4-7	4-7
	Orient. de las grietas	(-2)-(-2)	(-2)-(-5)	(-5)-(-10)	(-5)-(-12)
	RMR	78-5	66-79	36-52	5-16

Mediante un análisis de correlación se determinó el grado de confiabilidad que permite la aplicación de cada una de estas clasificaciones y se obtiene un 22 % de confiabilidad, por Deere, un 58 % por Barton, un 12,21 % por Wickhan y un 79,29 % por Bieniawski, siendo este último el que mejor resultado ofrece.

Mecanismo de acción de la presión minera

Para obtener un criterio adecuado de la forma que actúa la presión minera se analiza el comportamiento del macizo para cada caso por separado.

Caso A:

El macizo se encuentra agrietado en forma de bloques, los que se comportan como vigas empotradas en los extremos y unidos entre sí, soldados en las puntas (Figura 1a) y no le permite ningún grado de libertad; por

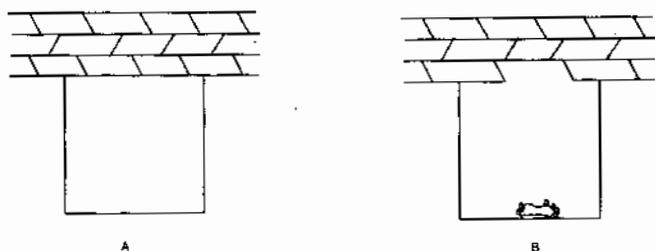


FIGURA 1. Comportamiento de las vigas en el techo. a) Empotradas; b) Libremente apoyadas.

A medida que la viga que queda sobre el techo de la excavación se fracture, la inmediata superior pasa a ser el portante y esto se repite hasta que el macizo alcance su autoestabilidad (Figura 2).

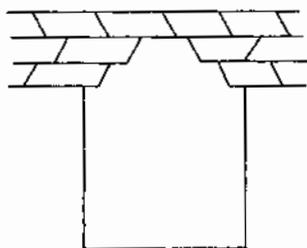


FIGURA 2. Comportamiento del techo al ceder varias vigas

Si se conoce este mecanismo de acción, se puede pronosticar o determinar la luz del techo, con que se

lo tanto, en el momento de analizar la presión minera se hace necesario realizar un balance de todas aquellas fuerzas que actúan en la zona de posible fractura (juntas y empotramientos), para determinar si el bloque autoporta la carga o se destruye.

Al ocurrir la fractura del bloque o viga (Figura 1b), —hasta ese momento empotrada— pasa a comportarse como dos vigas libremente apoyadas, las que en dependencia de la fractura y la luz de la excavación, se desplomarán si la carga actuante sobre ellas es mayor que la fuerza de fricción entre los bloques o mayor que la fuerza de cementación de las juntas o fracturas, lo cual requiere un análisis de cada junta o viga. Si la viga se puede considerar continua debido a que la resistencia entre bloques es similar a la cohesión entre partículas, entonces se desplomarán si las cargas actuantes son mayores que la resistencia a tracción de la roca en la zona de empotramiento.

logra un comportamiento estable y las medidas adecuadas de sostenimiento.

La magnitud de la presión minera se puede determinar a partir de:

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ci} \cdot \gamma \cdot g}{2a} \cdot K, \text{ Pa}$$

Donde:

- g : aceleración de la fuerza de gravedad, m/s^2
- V_{ci} : volumen del bloque i , m^3
- γ : densidad de la roca, kg/m^3
- a : semiancho de la excavación, m
- K : coeficiente que tiene en cuenta la presión ejercida por los bloques superiores (según datos de la práctica se toma de 1,1 a 1,25).

Caso B:

El macizo se encuentra en forma de cuñas unidas por sustancias cementantes y por la presión que ejercen unas sobre otras, por lo que se hace necesario un análisis

cinemático para establecer la jerarquía de movimiento de las cuñas, volumen promedio y número posible a gravitar. El volumen y número de las cuñas se determina por separado para cada grupo, según el orden de jerarquía para el movimiento (Figura 3).

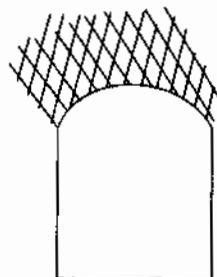


FIGURA 3. Comportamiento de las cuñas por el techo.

La presión minera ejercida por las cuñas se puede determinar a partir de:

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ci} \cdot \gamma \cdot g}{2a}, \text{ pa}$$

donde:

V_{ci} : Volumen de la cuña i , m^3

$$V_{ci} = \frac{1}{3} A_b \cdot x \cdot h,$$

Donde:

A_b : Área de la base de la cuña i , m^2

h : altura de la cuña i , m

Las dimensiones de las cuñas se determinan a partir de proyecciones estereográficas.

Caso C:

En este caso el macizo se encuentra en un estado caótico de agrietamiento por lo que no es posible establecer un ordenamiento ni la magnitud de los pedazos de roca, lo que impide determinar el comportamiento cinemático de estos elementos, haciéndose necesario

aceptar el criterio de la formación de una zona de roca fracturada, de forma irregular sobre el techo de la excavación.

CONCLUSIONES

1. Las características geomecánicas del macizo rocoso de la mina Mercedesitas permiten distinguir tres casos tipos.
2. Se logra un análisis más integral del comportamiento de la estabilidad del macizo si se evalúa cada caso tipo por separado.
3. La acción de la presión minera en la mina Mercedesitas se manifiesta según los tres casos tipos: techo en forma de bloques, techo en forma de cuña y techo fracturado de forma irregular.
4. La metodología empleada para evaluar la acción de la presión minera es aplicable a cualquier obra subterránea.

BIBLIOGRAFÍA

- AZAHARES M., LISBET: «Proyecto de prospección y exploración detallada de cromo, nivel +3 85 del yacimiento Mercedesitas», Trabajo de diploma, ISMM (Moa), Departamento de Geología, 1992.
- BLANCO, R. y G. SARGENTON: «Estabilidad de excavaciones sin fortificación», en revista *Minería y Geología* (3) 1988, :29-34.
- FALERO, S.R.: «Geometría del agrietamiento del macizo rocoso de mina Mercedesitas y su estabilidad», Tesis de maestría, ISMM (Moa), Departamento de Minería, 1996.
- HOOKE, E. y E.T. BROW: *Underground Excavation in Rocks*, MMI, London, 1982, pp.527.
- MONDEJAR OQUENDO, O.: «Evaluación de la estabilidad de un sector de la mina Mercedesitas», IX Forum de Ciencia y Técnica, Moa, noviembre 1995.
- : «Propuesta de métodos de sostenimiento para las minas de cromo del nordeste de Holguín, Moa», Tesis de maestría, ISMM (Moa), Departamento de Minería, 1996.
- RAMÍREZ, A.P. y R. LAÍN HUERTA: «Presente y futuro de las clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos», en *Boletín Geólogo Minero*, 106 (60), 1994 :44-57.
- ROSALLES ANTUNES, R.: «Caracterización geomecánica de los macizos serpentínicos de Holguín», Tesis de maestría, ISMM (Moa), Departamento de Minería, 1996. □