

CARGAS ACTUANTES EN TÚNELES DE MOA

(THE ACTING LOADS ON THE TUNNELS OF MOA)

OSMANY MONDÉJAR OQUENDO

Profesor instructor del Departamento de Minería. Facultad de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

ROBERTO BLANCO TORRENS

Profesor titular del Departamento de Minería. Facultad de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

RESUMEN: Para la confección del presente trabajo se realizó un estudio que abarcó 2 km de túneles del municipio Moa a los que se les hizo un análisis detallado del macizo rocoso que los circunda, y se determinaron las propiedades físico-mecánica de las rocas, agrietamiento, afluencia de agua y sus consecuencias, etc. Se valoró la estabilidad por varias metodologías (Barton, Bieniawsky, Bulichev y otras) y fueron usados, por sus resultados, los valores obtenidos del empleo de la de Barton. Se estableció el mecanismo de acción de la presión minera y se caracterizó en dos casos típicos, a partir de los cuales se determinan los valores de las cargas estáticas que se pueden producir. Se consideró el macizo como un cuerpo

elástico, homogéneo e isotrópico para establecer el estado tensional inicial y así calcular las cargas dinámicas que pueden actuar. Además se puntualizan los valores de las cargas considerados como críticos.

Palabras claves: estabilidad, sismos, cargas estáticas, cargas dinámicas.

ABSTRACT: To sketch out this work, a research work that covers area of two kilometres of the tunnels of Moa municipality, was realised. This work was done based on the detailed analysis concerning the massive rock, which surrounds the tunnels and also taking into consideration the affluence of water, and the physic-mechanic properties of the rocks. The stability of the tunnels was measured by using various methodologies

(Barton, Bieniawsky, Bulichev, etc). In this case by using the results obtained, Barton's methodology was used. The mechanism of the action the earth's crust pressure (mining pressure) was stabilised characterising it with typical which can help to the values of the static burden or stress which can be produced. The elastic, homogeneous and isotropic massive rock was taken into consideration in order to determine the state of the initial tensile stress so as to be able to calculate the dynamic loads that can exert upon then. The values loads, which are considered critical, are punctuated.

Key Words: stability, earthquakes, dynamic loads, static loads.

INTRODUCCIÓN

Los túneles que se analizan se encuentran laboreados a través de serpentinitas con un mayor o menor grado de alteración, con fortaleza de 5-7 en la escala de Protodionov, masa volumétrica aproximadamente de 2 300 kg/m³, la resistencia a la compresión y a la tracción oscilan de 50–70 Mpa y 17–24 Mpa, respectivamente. Las rocas suprayacentes (techo) están compuestas de varias capas de serpentinas y lateritas con un espesor que varía desde 8 a 15 m.

Los túneles, en dependencia del grado de alteración de la serpentina, se laborean con martillos rompedores o con el uso de perforación y explosivos, y tienen paredes rectas con techos abovedados; el ancho es de 2.50 m, la altura de las paredes rectas es de 1,30 m y la de la bóveda de 1,20 m.

La estabilidad de estas excavaciones se puede considerar de media o regular según los resultados obtenidos con el empleo de la metodología de Barton, Lien, Lunde (Q= 60-70) (Blanco Torrens, R. y otros, 1995).

En su contorno, además de aparecer las tensiones estáticas, a causa del rompimiento del equilibrio natural del macizo al laborearse una excavación, se pueden manifestar cargas dinámicas como consecuencia de la acción sísmica ya que éstas se encuentran en una zona de riesgo II (según Normas 1998) enmarcada dentro de las siguientes zonas sismo generadoras (ZSG):

- I. (ZSG) Oriente: Asociada a la falla transcurrente Betiltt-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, un ancho de 150 km aproximadamente y una profundidad de más de 50

km, buzamiento de 60-80° y acimut de buzamiento de 180°; predominó en esta zona generadora la más alta sismicidad de Cuba.

- II. (ZSG) Cauto-Nipe: Asociada a una zona de fractura de dirección S-W, N-E, 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: 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 y se presenta en forma de bloque dislocado por fallas internas del territorio cubano con dirección S-W, N-E.
- IV. (ZSG). Purial: Asociada a una falla profunda de carácter crocica y desplazamiento de dirección lateral, a esta zona se asocian manifestaciones de actividad sísmica con contribución lineal y epicentro de baja energía. Se valora según su potencia generadora como una zona de tercera categoría.
- V. (ZSG). Santiago-Moa: Asociada a una fractura de dirección N-E, S-W, con extensión aproximada de 150 km, un ancho de 7-15 km y una profundidad de 20-30 km con movimiento lateral vertical.

Esta zona en los últimos tiempos ha tenido una elevada actividad sísmica y se registraron desde el mes de diciembre hasta julio de 1999 más de 1 000 eventos sísmicos.

El presente trabajo tiene como principal objetivo establecer el mecanismo de acción y determinar la magnitud de las cargas actuantes en el contorno de los túneles populares del municipio Moa.

CARGAS ACTUANTES

Al laborear una excavación se rompe el equilibrio que hasta ese entonces existía en el macizo rocoso, lo cual provoca la aparición de tensiones en el contorno de las excavaciones (cargas estáticas) y si por añadidura éstas se ejecutaran en una zona sísmica, en el momento en que se produzca la acción sísmica se le suman a estas las tensiones producidas por los sismos (cargas dinámicas). Estas dos, son las principales cargas que hay que tener en cuenta al ejecutar una excavación en la zona de estudio.

Cálculo de las cargas estáticas

Según el comportamiento mecánico estructural del macizo rocoso y el mecanismo de acción de la presión minera, existen dos casos típicos que caracterizan estos macizos (Mondéjar Oquendo, O., 1996).

Caso A: El macizo se encuentra fracturado formando bloques, los que se comportan como vigas empotradas en los extremos y unidas entre sí (soldadas en las juntas), lo que no les permite ningún grado de libertad, por lo que a la hora de analizar la carga que ellas provocan

se hace necesario realizar un balance de todas aquellas fuerzas que actúan en las zonas de posibles fracturas (juntas y empotramientos) para determinar si el bloque autosoporta la carga o se fractura.

Al ocurrir el colapso, la viga que hasta ese momento estaba empotrada pasa a comportarse como dos vigas en voladizo o libremente apoyadas, las cuales en dependencia del lugar de la fractura y la luz de la excavación estarán solamente empotradas y/o soldadas en sus secciones. De ser continuas (sin juntas) éstas se desplomarán si la carga actuante es mayor que la resistencia a tracción de las rocas en el sector de empotramiento de la viga. Si por el contrario la viga presenta varias juntas se requiere un análisis por separado para cada una.

El cálculo de las cargas, para este caso, se recomienda realizar por la siguiente expresión:

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{V_{bi} * \gamma * g}{2a} * K, \quad \text{Pa.} \quad (1)$$

donde:

V_{bi} - Volumen del bloque i, m³

γ - Densidad de la roca, kg/m³.

TABLA NO. I. NÚMERO Y VOLUMEN DE LOS BLOQUES Y RESULTADO DE LAS CARGAS ESTÁTICAS

Vol. promedio; m3	No. de bloques	Presión estática (Mpa)
0,78	2	0,0199
0,81	2	0,0206
0,62	3	0,0201
0,60	4	0,0306
0,74	3	0,0283
0,75	3	0,0337
0,66	4	0,0186
0,73	2	0,0194
0,76	2	0,0237
0,62	3	0,0316
0,02	4	0,0352
0,69	2	0,0241
0,63	3	0,0199
0,78	2	0,0178
0,70	2	0,0249
0,65	3	0,0249
0,62	2	0,0182
0,68	3	0,0260
0,79	2	0,0201
0,62	3	0,0237

a - Semiancho de la excavación, m.
 g - Aceleración de la fuerza de gravedad, m/s².
 K - Coeficiente que tiene en cuenta las cargas producidas por los bloques superiores (se toma de 1,15 a 1,25 según criterios de la práctica).

El número y volumen de bloques se determina mediante el análisis cinemático y proyecciones estereográficas (Hoek y Brown, 1982). El volumen y número de bloques para los tramos analizados así como los resultados del cálculo de la presión minera obtenidos de la expresión (1) se muestran en la Tabla No. I.

Caso B: El macizo se encuentra agrietado en forma de cuñas que se unen entre sí por el cemento de las juntas y por la presión que ofrece una sobre otra, por lo que es necesario un análisis de cada cuña para, posteriormente, establecer la jerarquía de movimiento y sus volúmenes promedio, así como el número de cuñas que se desplazarán según el orden de jerarquía de movimiento. Con estos parámetros se determina la magnitud de la carga actuante:

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ci} * \gamma * g}{2a} * k, \quad \text{Pa} \quad (2)$$

donde:

V_{ci} - Volumen de la cuña i, m³.

$$V_{ci} = \frac{1}{3} A_b * h$$

K- Porcentaje de cuñas propensas al colapso a partir del orden correspondiente. Para su obtención es necesario establecer el número de cuñas según el orden de jerarquía y según resultados de la práctica: se toma el 100% del 1^{er} orden, el 30% del 2^{do} orden y el 5% del 3^{er} orden.
 h - Altura de la cuña i, m.

A_b - Área de la base de cuña i, m².

Los resultados del cálculo de los volúmenes y número de las cuñas y la magnitud de la presión minera obtenida de la expresión (2) se muestran en la Tabla No. II.

2.2 Cálculo de las cargas dinámicas

Un sismo es en esencia un fenómeno de liberación de energía producida por la ruptura o choque de estructuras rocosas. Dicha energía se propaga por el medio rocoso como un campo de esfuerzos transitorios. Los esfuerzos normales dan origen a la denominada onda primaria o longitudinal (P), bajo la cual el medio trabaja alternativamente a compresión y tracción. En este caso el volumen del medio cambia, pero su forma permanece constante.

La onda longitudinal se propaga a una velocidad V_p. Los esfuerzos cortantes dan origen a la denominada onda secundaria o transversal (S), bajo la cual el medio es distorsionado, primero en una dirección luego en otra, manteniéndose constante el volumen. La onda transversal se propaga a una velocidad V_s, la cual es de un orden de 60% de la V_p.

TABLA NO. II. NÚMERO Y VOLUMEN DE LAS CUÑAS Y RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LAS CARGAS ESTÁTICAS

Volumen de las cuñas por orden; m ³			Número de cuñas por orden			Cargas estáticas; MPa
1ro	2do	3ro	1ro	2do	3ro	
0,46	0,28	0,54	2	4	5	0,0281
0,32	0,20	0,41	2	4	5	0,0234
0,29	0,19	0,36	3	4	4	0,0095
0,41	0,31	0,62	4	3	5	0,0109
0,39	0,18	0,38	2	2	6	0,0126
0,68	0,12	0,49	3	4	7	0,0145
0,32	0,19	0,37	2	6	4	0,0190
0,19	0,23	0,23	4	5	3	0,0135
0,51	0,27	0,71	3	4	3	0,0086
0,46	0,24	0,43	2	3	4	0,0107
0,32	0,33	0,46	5	2	4	0,0200
0,33	0,22	0,70	3	3	3	0,0103
0,47	0,23	0,68	2	3	5	0,0105
0,62	0,31	0,49	4	2	5	0,0238
0,33	0,17	0,52	4	2	5	0,0238
0,47	0,30	0,55	3	4	7	0,0112
0,47	0,31	0,57	4	5	6	0,0181
0,28	0,25	0,48	2	6	4	0,0093
0,39	0,22	0,47	4	5	9	0,0136
0,40	0,18	0,21	3	5	3	0,0101
0,41	0,23	0,60	2	6	4	0,0093
0,27	0,27	0,49	4	4	4	0,0101
0,62	0,13	0,41	4	3	5	0,0205
0,65	0,31	0,42	4	4	6	0,0149
0,41	0,19	0,52	3	5	6	0,0320
0,42	0,18	0,57	2	5	7	0,0137
0,41	0,31	0,41	3	4	6	0,0231
0,27	0,24	0,38	4	3	5	0,0150
0,31	0,13	0,12	2	5	4	0,0131
0,32	0,30	0,29	3	6	6	0,0359
0,29	0,18	0,39	2	3	6	0,0067
0,38	0,19	0,41	3	6	7	0,0146
0,30	0,22	0,38	3	4	4	0,0204
0,52	0,27	0,31	2	5	3	0,0092
0,46	0,19	0,53	4	5	3	0,0191
0,51	0,18	0,55	4	4	4	0,0148
0,57	0,22	0,47	3	5	7	0,0109
			4	4	3	0,0276
			2	4	5	0,0135

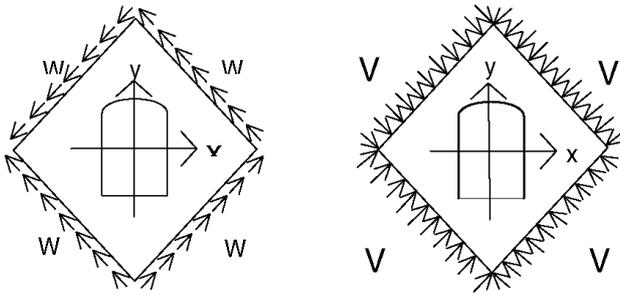


Figura No.1. Campo cuasi estático de componentes normales (σ) y cortantes (τ)

Como el ancho, B, de las excavaciones subterráneas analizadas es varias veces más pequeño que la longitud de onda, λ (λ>8B), se puede considerar, para el análisis del campo de esfuerzos inducidos alrededor de un túnel, que este es cuasi estático.

Para el caso estudiado, el campo dinámico de esfuerzos que actúa sobre una excavación subterránea se puede sustituir por un campo de esfuerzos normales (onda P) y cortantes (onda S) aplicados, respecto a la excavación, en el infinito considerando que en un campo dinámico oscilatorio los esfuerzos varían desde un valor mínimo a un valor máximo. Para efectos de los cálculos se asumen los valores extremos de los esfuerzos normales y cortantes.

Se puede asumir que el campo inicial de esfuerzos en un macizo rocoso afectado por sismos, está constituido por el campo estático (gravitacional o tectónico) y el campo dinámico producido por éstos.

Si consideramos un campo estático puramente gravitatorio, a partir de la Ley de Hook generalizada se puede demostrar que el esfuerzo principal mayor σ₁ es vertical (en un macizo rocoso isotrópico o con un grado de anisotropía bajo), e igual a γH, mientras que los esfuerzos horizontales σ₂=σ₃ son proporcionales e inferior a σ₁.

El campo inicial dinámico se puede analizar como un campo estático de componentes normales y cortantes (Figura No. 1).

El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión vertical, y las horizontales se conoce como coeficiente de presión lateral, y se calcula como:

$$\lambda = \frac{\mu}{\mu - 1}$$

donde: μ - Coeficiente de deformación transversal..

El esfuerzo σ_p, normal, es originado por el desplazamiento de la onda longitudinal. Los valores extremos de estos esfuerzos son +σ_p (compresión) y -σ_p (tracción). Los valores extremos del esfuerzo cortante, en un sentido estrictamente gráfico, pueden ser +τ_s y -τ_s, aunque el valor absoluto del cortante es τ_s. Los valores extremos de σ_p y τ_s, se pueden determinar según las expresiones:

$$\sigma_{min}^{max} = \pm \frac{1}{2\pi} A * k_1 * \gamma * Vp * To * K_h \quad (3)$$

$$\tau_{min}^{max} = \pm \frac{1}{2\pi} A * K_1 * \gamma * Vs * To * K_h \quad (4)$$

Donde:

A - Aceleración de partículas provocadas por el sismo. Se da como una porción de la gravedad.

K₁ - Coeficiente de daños permisibles en túneles, de datos de la práctica se puede asumir 0,25.

To - Periodo de oscilación de las partículas del macizo rocoso. Se puede asumir 0,5 seg.

Vs y Vp - Velocidades de ondas S y P, m/s².

K_h - Coeficiente de profundidad: K_h= (1-0,005)H para H≤100m y Kh=0,5H para H >100m.

H - Profundidad de ubicación de la excavación, m

La velocidad de las ondas P y S depende fundamentalmente del módulo de deformación E y del coeficiente de deformación transversal μ del macizo rocoso, y se pueden determinar de las expresiones que se muestran a continuación:

$$Vp = \left[\frac{E}{\gamma} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$Vs = \left[\frac{E}{2\gamma(1 + \mu)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)} \right]^{\frac{1}{2}} Vp \quad (6)$$

Según la norma técnica del CENAI (1998), los valores de V_p y V_s para estas rocas se pueden asumir de 1 200 m/s y 750 m/s respectivamente, por lo que::

$$\sigma_{MIN}^{MAX} = \pm 0,11 MP_a$$

$$\tau_{MIN}^{MAX} = \pm 0,067 MP_a$$

Cálculo de los esfuerzos principales iniciales σ₁ y σ₃ que pueden generar diferentes situaciones críticas al analizar tres casos

Campo dinámico compresivo: La excavación resulta influenciada únicamente por la onda longitudinal.

En este caso los componentes de los esfuerzos se determinan a partir de:

$$\sigma_1 = \left| \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right| \quad (7)$$

y considerando τ_{xy}²=0, se obtiene

$$\sigma_1 = 0,11 MPa; \quad \sigma_3 = \lambda * \sigma_1$$

donde

λ - coeficiente de empuje lateral. Teniendo en cuenta que para este análisis se consideró el macizo como un medio isotrópico, para los cálculos se emplean dos valores de este coeficiente: λ=0,33 y λ=1.

Para λ=0,33 σ₃=0,036 Mpa; para λ=1 σ₁=0,11MP

Campo dinámico cortante puro: se presenta en el caso de que una excavación quede sometida a la acción de la onda transversal por lo que el contorno de la misma se ve sometido a un esfuerzo al cortante puro. De la expresión (4) se obtiene que:

$$\sigma_1 = \tau_{max} = 0,067 MPa$$

$$\sigma_3 = -\tau_{max} = -0,067 MPa$$

TABLA NO. III RESULTADO DEL EFECTO DE LOS CAMPOS DE ESFUERZOS DINÁMICOS

Campo	λ=33		λ=1	
	σ _θ _{MAX} Mpa	σ _θ _{MIN} Mpa	σ _θ _{MAX} Mpa	σ _θ _{MIN} Mpa
Compresivo	0,148	0,002	0,220	0,220
Cortante	0,268	-0,268	0,268	-0,268
Combinado	0,591	-0,473	0,4266	-0,33

Campo dinámico combinado: cuando la excavación se vea sometida, al mismo tiempo, a la onda longitudinal y la onda transversal, de la expresión (7) se obtiene:

Para λ=0,33	para λ=1
σ ₁ =0,28 Mpa	σ ₁ =0,177 Mpa
σ ₃ =-0,25 Mpa	σ ₃ =-0,105 Mpa

Análisis del efecto de los campos de esfuerzos dinámicos

Debido a que es prácticamente imposible conocer a priori el hipocentro del sismo no se puede establecer la orientación con que se propagan las ondas, por lo que se hace necesario el análisis de diferentes situaciones en el techo y lado de las excavaciones que se pueden catalogar de críticas. De las ecuaciones de Kirsch se puede demostrar que el esfuerzo tangencial σ_θ en el contorno de la excavación, si se conocen los esfuerzos principales σ₁ y σ₃, se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_1 + \sigma_3) + 2(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta \tag{8}$$

Donde θ es el ángulo que forma el radio de la excava-

ción respecto a la dirección de σ₃. Los valores máximos y mínimos σ_θ se pueden calcular por la expresión:

$$\sigma_{\theta \text{ MAX / MIN}} = (\sigma_1 + \sigma_3) \pm 2(\sigma_1 - \sigma_3) \tag{9}$$

Los valores obtenidos para los casos críticos aparecen en la Tabla No. III.

CONCLUSIONES

- El análisis de las cargas estáticas se realiza a partir de considerar dos casos típicos: caso A: Macizo agrietado en forma de bloques; caso B: macizo agrietado en forma de cuñas.
- El cálculo de las cargas dinámicas se realiza a partir de considerar el campo dinámico como un campo cuasi estático de componentes normales y cortantes
- El máximo valor de las cargas que actuarán en las excavaciones estudiadas se produce para un campo dinámico combinado y tendrá una magnitud de 0,63 Mpa.

BIBLIOGRAFÍA

Blanco Torrens *et al.* (1995): "Criterios para el cálculo de la fortificación ante la acción sísmica IX FORUM de Ciencia y Técnica" (Inédito).
 Blanco Torrens *et al.* (1997): *Proyecto para la ampliación de los túneles del municipio Moa*. EMM, Moa.
 Gómez Hernández, I. (1997): "Influencia de los sismos en la estabilidad de excavaciones subterráneas. Sogamoso" en *Ingeniería de minas IX* (9), p. 33-38.
 Hoek, E. y E. T. Brown (1982). *Underground excavation in rock*. London, MMI.
 Mondéjar Oquendo, O., Roberto Blanco y Armando Cuesta (1998): "Mecanismo de acción de la presión minera en mina Mercedes" en *Memorias III Congreso de Minería y Geología*. La Habana.
 Mondéjar Oquendo, O. (1996): "Propuesta de métodos de sostenimiento para las minas de cromo del nordeste de Holguín". Tesis de Maestría, CICT-ISMM, Moa.
 CENAI (1998): *Norma técnica para la caracterización sísmica*. Santiago de Cuba.