



Parámetros para el diseño de la voladura de contorno en el laboreo de túneles*

David Arias Fuentes

Carrera: Ingeniería en Minas.

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: La presente investigación se realizó en el túnel Buenaventura–Sabanilla del Trasvase Este–Oeste perteneciente a la provincia de Holguín. El objetivo del trabajo consiste en establecer los parámetros para el diseño de la voladura de contorno durante el laboreo de túneles, a partir de determinar el campo tenso-deformacional que se produce en el macizo de rocas, una vez que se realiza la explosión de las cargas de cordón detonante de 40 g/m. El cálculo se efectuó para una distribución con espacio anular de aire entre la sustancia explosiva y la cámara de carga. Con los resultados obtenidos de la modelación se determinaron los radios de trituración, agrietamiento y descostramiento para un macizo monolítico y agrietado, lo cual permitió calcular la línea de menor resistencia para ambos casos y definir los parámetros de la voladura de contorno, los cuales fueron comparados con los diseños que se realizan en la actualidad, arrojando que la propuesta efectuada es más racional al obtener resultados satisfactorios con menos recursos.

Palabras clave: Trasvase Este-Oeste; túneles; voladura de contorno.

Parameters for the design of contour blasting during the execution of tunnel works

Abstract: The present investigation was conducted to the tunnel Buenaventura Sabanilla from the Este-Oeste transfer pipeline in the province of Holguín. The objective of this investigation was to establish the parameters for the design of contour blasting during the execution of tunnel works based on the stress-deformation field occurring in the rock mass when using detonating cordon charges of 40g/m. The calculation was carried out based on the distribution of the annular air space between the explosive and the charge chamber. The physical-mechanical properties of the rocks were analyzed and a study was conducted to identify the presence of cracking at the front of the tunnel in order to model the stress field resulted from the excavations by using a computer program prepared by the author. The modeling results allowed determining crushing, cracking and descaling radius of a monolithic and cracked mass and therefore calculating the low stress line in both cases as well as defining the parameters for contour blasting which were compared with current designs. The new proposal was found to be more rational based on the satisfactory results obtained using fewer resources.

Key words: Este-Oeste transfer pipeline; tunnels; contour blasting

Introducción

El diseño de voladuras en el laboreo de excavaciones subterráneas se realiza en la actualidad por analogía, tomando como referencia los resultados prácticos obtenidos por métodos empíricos que han dado resultado en diferentes condiciones.

Actualmente en los túneles hidrotécnicos del Trasvase Este-Oeste se realiza el arranque de las rocas con el empleo de la perforación y explosión. Para el cálculo y diseño de los patrones de voladura no se tiene en cuenta el comportamiento del macizo ante la acción de una sustancia explosiva como un sistema; esto implica que los resultados para las diferentes litologías por las que atraviesa la excavación no se comporten de la misma forma, lo que trae consigo en muchos casos inestabilidad y gasto excesivo de recursos.

Al establecer los parámetros para realizar un diseño racional de la voladura de contorno, con el empleo de cordón detonante, es necesario obtener el campo tenso-deformacional que se produce en el conjunto de barrenos de contorno al efectuar la modelación físico-matemática de la explosión sobre el macizo circundante.

Investigación teórica

El primer paso para establecer los parámetros de la voladura de contorno es determinar el campo tenso-deformacional, para lo cual hay que elegir el modelo de comportamiento del macizo de rocas en investigación, el cual está constituido en este caso por las argilitas.

El estudio del mecanismo de rotura de las rocas no es posible sin la modelación de este campo tenso-deformacional que se produce en la cercanía de la cámara de carga por la detonación de una sustancia explosiva, la cual tiene un comportamiento ondulatorio y un carácter dinámico. Este campo no es uniforme, ni en el espacio, ni en el tiempo, y cerca de la cámara de carga es una onda de presión, que se transforma en onda elástico-plástica con un frente relativamente más suave que la primera, y luego pasa a una onda elástica. La determinación de la onda refractada se realiza a partir del principio de refracción de ondas y depende del acople de la impedancia de la sustancia explosiva con la rigidez acústica de la roca.

En la investigación realizada se determina el estado tenso-deformacional alrededor de la cámara de carga en barrenos de 42 mm de diámetro al explosionar cargas desacopladas con cordón detonante de 40 g/m.

Descripción del modelo matemático

La descripción cualitativa y cuantitativa del modelo matemático se realiza a partir de los campos tensional y deformacional.

Descripción del campo tensional

Parámetros de la onda de choque para cargas desacopladas con espacio anular con aire

Cuando ocurre la explosión de la carga, en el interior del barreno, se produce el proceso de expansión adiabática de los productos de esta, según la isentrópica:

$$P = P_{max} \left[\frac{V_0}{V} \right]^n, \text{ Pa} \quad (1)$$

Donde: n- Índice de la adiabática de los productos de la explosión;

P- Presión media a lo largo del barreno;

V_0 -Volumen ocupado por los productos de la explosión en el momento de la detonación completa de la sustancia explosiva.

V-Volumen de los productos de la explosión en el momento correspondiente a la presión P.

P_{max} -presión máxima en los productos de la explosión en el momento de la detonación completa de la carga en el barreno, que se calcula por la siguiente expresión:

$$P_{max} = \frac{\rho_{se} (vd)^2}{n + 1}, \text{ Pa} \quad (2)$$

Donde: ρ_{se} – Densidad de la sustancia explosiva, Kg/m³

Vd – Velocidad de detonación de la SE, m/s

$n = f(\rho_{SE})$

Se determina interpolando en la tabla.

Tabla 1. Índice de la adiabática de los productos de la explosión

ρSE g/cm³	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,75
n	1,3	1,6	2,2	2,8	3,0	3,2	3,4

De modo que la presión media en el barreno, en el volumen ocupado por la carga de sustancia explosiva, será:

$$P = Pmax \left[\frac{V_{SE}^n}{V_b} \right], \text{ Pa} \tag{3}$$

Se determina la presión máxima (Pr) en el frente de las ondas refractadas en la pared del barreno (Gogoliev *et al.*, 1965).

Se calcula en dependencia de la relación entre la resistencia de onda de la sustancia explosiva ρSEVd y la resistencia de onda de la roca ρoVL

$$\left(\frac{Pr}{\rho o} \left[1 - \frac{1}{\frac{A}{\rho o V_L^2} Pr} + 1 \right] \right)^{1/2} = v - \frac{\sqrt{2K}Pr - P}{|\rho se||k+1||Pr||k+1||-p||k-1||1/2|} \tag{4}$$

Si PoVL < Pse Vd

$$\left(\frac{Pr}{\rho o} \left[1 - \frac{1}{\frac{A}{\rho o V_L^2} Pr} + 1 \right] \right)^{1/2} = v + \frac{2kv_d}{K^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{Pr}{p} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \tag{5}$$

Donde: V – velocidad de los productos de la explosión, m/s;

Vd - velocidad de detonación de la sustancia explosiva, m/s;

K - índice de la isentrópica de la detonación de la sustancia explosiva;

p – presión de los productos de la explosión, Pa;

ρse - densidad de la sustancia explosiva, kg/m³.

Los coeficientes empíricos A y m se determinan de la siguiente forma (Gogoliev, 1968).

$$Si \frac{Pr^{11}}{\rho o |V_L|^2} < 0,1 \text{ entonces } A = 3 \text{ m} = 3 \tag{6}$$

$$Si 0,1 \leq \frac{Pr^{11}}{\rho o |V_L|^2} < 35 \text{ entonces } A = 5,5 \text{ y } m = 5. \tag{7}$$

Pr se puede determinar por uno de los métodos de aproximación o grafoanalíticamente.

Se determina la densidad de la roca en el frente de la onda ρ_r , la velocidad de las partículas V_R y la velocidad del frente de la onda refractada V_f (Borovikov y Vaniagin, 1974).

$$\rho_R = \rho_o \left[1 + \frac{APr}{\rho_o V_L^2} \right], \text{ Kg/m}^3 \tag{8}$$

$$V_{R=} = \sqrt{Pr \left[\frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_R} \right]}, \text{ m/s} \tag{9}$$

$$V_f = \left[\frac{Pr}{\rho_o} \left(\frac{1}{1 - \frac{\rho_o}{\rho_R}} \right) \right]^{1/2}, \text{ m/s} \tag{10}$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos del cálculo de los parámetros de las ondas de choque para cargas desacopladas de cordón detonante con espacio anular con aire.

Tabla 2. Parámetros de las ondas de choque para cargas desacopladas con espacio anular con aire

P(MPa)	V (m/s)	Kr	Pr ¹ (MPa)	A	m	Pr (MPa)	ρ_R (Kg/m ³)	VR (m/s)	Vf(m/s)
0,25	1494,94	0,52	0,13	3	3	14139,78	5707,04	1652,39	3151,79

Parámetros de la onda de tensiones con cargas desacopladas

Se determina la máxima amplitud de las tensiones en la componente radial de las ondas al difundirse por el macizo alrededor de la carga (Borovikov y Vaniagin, 1974).

$$\sigma_{r \text{ max}} = \frac{Pr}{\bar{r}^{108}} \tag{11}$$

Donde: \bar{r} -Distancia relativa del punto considerado del macizo al centro de la carga.

$$\bar{r} = \frac{r}{R_c^e} \tag{12}$$

Donde: r-Distancia del punto considerado del macizo al centro de la carga, m.

R_c^e -Radio de carga equivalente.

$$R_c^e = R_c \left(\frac{\rho_{se} Q_{se}}{\rho_p Q_p} \right)^2 \tag{13}$$

Donde: R_c - radio de la carga de SE utilizada;

ρ_{se} y ρ_p -densidad de la sustancia explosiva utilizada y patrón respectivamente ($\rho_p = 1500 \text{ Kg/m}^3$);

Q_{SE} y Q_P - calor de la explosión de la sustancia explosiva utilizada y patrón respectivamente ($Q_P= 5950$ kJ/Kg)
 $\Lambda= 1/2$ para cargas cilíndricas.

Se determina la máxima amplitud de la componente tangencial de estas ondas (Borovikov y Vaniagin, 1985).

$$\sigma_{t \max} = (C_1 + C_2 \bar{r}) \sigma_{r \max} \tag{14}$$

Donde: C_1 y C_2 - son magnitudes adimensionales que dependen de la dureza acústica de las rocas.

$$C_1 = 0,09 + 0,228 * 10^{-7} \rho_o v_L \tag{15}$$

$$C_2 = (0,07 - 0,224 * 10^{-7} \rho_o v_L) * 10^{-2} \tag{16}$$

Máxima amplitud de las tensiones a cortante con cargas desacopladas con espacio anular de aire.

$$\sigma_{cor \max} = \frac{\sigma_{r \max} - \sigma_{t \max}}{2} \tag{17}$$

Mediante los gráficos de extinción de las tensiones al cortante, radiales y tangenciales y los límites de resistencia al cortante dinámico y tracción dinámica, se determinan los radios relativos de trituración (\bar{R}_t) agrietamiento (\bar{R}_g) y descostramiento (\bar{R}_d) respectivamente (Otaño, 1998).

Con estos radios relativos se determinan los radios de trituración (R_t), agrietamiento (R_g) y descostramiento (R_d).

$$R_t = \bar{R}_t * R_c^e \tag{18}$$

$$R_g = \bar{R}_g * R_c^e \tag{19}$$

$$R_d = \bar{R}_d * R_c^e \tag{20}$$

Los radios calculados con anterioridad se determinaron para un macizo monolítico, es necesario introducir la influencia del agrietamiento en el debilitamiento de las tensiones.

El coeficiente de debilitamiento de la amplitud de las tensiones con el agrietamiento en las direcciones de la línea de menor resistencia, de la línea de cargas y de la dirección

de los barrenos depende de la resistencia acústica de las rocas $\rho_o V_L$ y del material de relleno de las grietas $\rho_{re} V_{re}$, así como del valor suma de la abertura de las grietas en el sector considerado $\sum \delta_g$.

$$K_{db} = \left\{ 1 - 0,2 \left(\sum \bar{\delta}_g \right) - 0,12 \left(\sum \delta_g \right)^2 \right\} \gamma_r \quad (21)$$

Donde: δ_g -abertura de las grietas, m;

$$\sum \bar{\delta}_g = \frac{\sum \delta_g}{R_c^e} \quad (22)$$

γ_r -Coeficiente que depende del material que rellena las grietas

$$\gamma_r = 0,81 * \rho_o V_L * 10^{-7} \frac{(12,1 * 10^6 + \rho_{re} V_{re})^3 (\rho_o V_L - \rho_{re} V_{re})}{(\rho_o V_L + \rho_{re} V_{re})^3 (12,1 * 10^6 - \rho_{re} V_{re})} \quad (23)$$

Con los radios de agrietamiento y descostramiento se determina la línea de menor resistencia (W), indicador sobre el cual se establecen los parámetros de la voladura. Más adelante se muestran los resultados obtenidos del cálculo expuesto en la metodología anterior.

Descripción del campo deformacional

A consecuencia de la acción del campo tensional y del efecto de la burbuja de gases se producen deformaciones en el macizo de rocas que rodea a la carga, tanto en la zona cercana, como en la media y la lejana.

En esta investigación solo son objeto de estudio las deformaciones destructivas, es decir, aquellas que están relacionadas directamente con la fragmentación de las rocas, las deformaciones que solo producen deformaciones elásticas o plásticas no destructivas no se analizan en esta investigación. La modelación de las deformaciones destructivas se realiza a partir de los valores obtenidos del campo tensional.

Criterios de fragmentación para cargas aisladas

En la zona cercana a la cámara de carga, en el caso de cargas aisladas, debido a las elevadas presiones refractadas a la roca se produce la trituración en dependencia del modelo de comportamiento del macizo rocoso.

En macizos con modelos de comportamiento elástico-rígido o frágil prevalece la trituración de las rocas, mientras que en modelos elástico-plásticos lo hace tanto la trituración como el aplastamiento. Esta zona surge a consecuencia de los esfuerzos al cortante (Figura 1), y se determina a partir del siguiente criterio de trituración:

$$\sigma_{cirt\max} = \frac{\sigma_{r\max} - \sigma_{\tau\max}}{2} \geq [\sigma_{cort}^d] \tag{24}$$

Donde: $[\sigma_{cort}^d]$ - es el límite de resistencia al cortante dinámico, MPa

En la zona media se extiende la zona de agrietamiento cuyo límite se puede determinar a partir del criterio o condición de resistencia siguiente:

Criterio agrietamiento para una carga aislada

$$\sigma_{\tau\max} \geq [\sigma_{tracción}^d] \tag{25}$$

A partir de esta condición se determina el radio de agrietamiento.

El campo deformacional destructivo para la onda directa se extiende hasta el límite de esta zona, pero cuando la onda directa encuentra una superficie libre tiene lugar la refracción-reflexión de la misma; la onda directa de compresión se transforma en onda reflejada de tracción y se pueden producir fenómenos de descostramiento. Este criterio es posible enunciarlo de la forma siguiente:

Criterio de descostramiento

$$\sigma_{r\max} \geq [\sigma_{tracción}^d] \tag{26}$$

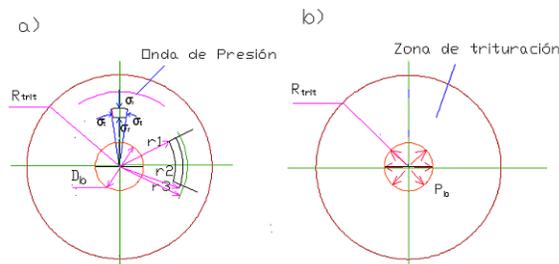


Figura 1. Esfuerzos al cortante en la zona cercana a la cámara de carga que determinan la zona de trituración.

En la investigación realizada se efectúa la valoración del estado tenso-deformacional al explosionar cargas con cordón detonante, como se había explicado con anterioridad. El

estado deformacional se determina teniendo en cuenta los siguientes criterios de fragmentación (Sargentón, 2008).

Criterios de fragmentación para las cargas que se explosionan al unísono

Criterio de trituración

$$\frac{\sigma_{r \max} - \sigma_{t \max}}{2} \geq [\sigma_{cort}^d] \quad (27)$$

Este criterio permite determinar el radio de trituración R_{trit} y con él la distancia entre las cargas.

Criterio agrietamiento

$$\sigma_{\tau \max} \geq \frac{[\sigma_{tracción}^d]}{2} \quad (28)$$

A partir de este criterio se determina el radio de agrietamiento y la distancia entre los barrenos de contorno.

Se considera la acción cooperada de las cargas que se explosionan al unísono, razón por la cual la tensión tangencial en la distancia media entre las cargas es igual a la suma de las magnitudes de estas tensiones.

Criterio de descostramiento

$$\sigma_{r \max} \geq [\sigma_{tracción}^d] \quad (29)$$

Este criterio se plantea a partir de la acción de la onda reflejada en la superficie libre, en la que la onda directa de compresión se transforma en onda reflejada de tracción.

En este caso el radio de descostramiento representa el radio de la carga virtual el cual sería igual a:

$$Rg + Rd = 2W_{\max}$$

Donde: W_{\max} - línea de menor resistencia para el macizo monolítico. Por lo que:

$$W_{\max} = \frac{Rg + Rd}{2} \quad (30)$$

Considerando el agrietamiento del macizo de rocas se determina la línea de menor resistencia por la siguiente expresión.

$$W = K_{db} * W_{\max} \quad (31)$$

Donde: W - línea de menor resistencia para el macizo con un agrietamiento dado.

A partir de estos criterios de resistencia se realiza la proyección de los trabajos de perforación y voladura en la excavación de obras subterráneas. En los cálculos se emplean las características de resistencia dinámica de las rocas, es decir, $[\sigma_{\text{tracción}}^d]$ y $[\sigma_{\text{cort}}^d]$

Para la determinación de la presión de las ondas de choque con cargas con espacio anular de aire y del campo tenso-deformacional producido, así como de los restantes parámetros de esta onda en la litología estudiada, fueron empleados los programas informáticos en Excel sobre Windows XP Professional elaborados por Diéguez (2012).

En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran las tensiones en el macizo provocadas por la detonación de una carga de cordón detonante

Tabla 3. Tensiones al cortante en el macizo provocadas por la detonación de una carga de cordón detonante de 40 g/m

R_c^e	No	r, m	\bar{r}, m	$\sigma_{\text{cor max}}, \text{MPa}$
0,00299965	1	0,1	33,3372042	63,1986776
	2	0,2	66,6744083	132,883303
	3	0,3	100,011613	41,0078267
	4	0,4	133,348817	30,2174442
	5	0,5	166,686021	23,8730192
	6	0,6	200,023225	19,7102343
	7	0,7	233,360429	16,7755714
	8	0,8	266,697633	14,5989659
	9	0,9	300,034838	12,9223523
	10	1,0	333,372042	11,5924693
	11	1,5	500,058063	7,67516545
	12	2,0	666,744083	5,76724091
	13	2,5	833,430104	4,64362041

Tabla 4. Tensiones tangenciales en el macizo provocadas por la detonación de una carga de cordón detonante de 40 g/m.

	No	r,m	\bar{r}, m	$\sigma_{cor \max}$, MPa
0,00299965	1	0,4	133,348817	11,25442377
	2	0,8	266,697633	4,71317931
	3	1,2	400,04645	2,647831426
	4	1,6	533,395267	1,651913275
	5	2,0	666,744083	1,071213607
	6	2,4	800,0929	0,693377927
	7	2,8	933,441717	0,429248318
	8	3,2	1066,79053	0,235000955
	9	3,6	1200,13935	0,08664685

Tabla 5. Tensiones radiales en el macizo provocadas por la detonación de una carga de cordón detonante de 40 g/m

R_c^e	No	r,m	\bar{r}, m	$\sigma_{cor \max}$, MPa
0,00299965	1	1,5	500,058063	17,198899
	2	2	666,744083	12,6056954
	3	3	1000,11613	8,13557493
	4	4	1333,48817	5,96285727
	5	5	1666,86021	4,68588472
	6	6	2000,23225	3,84836144
	7	7	2333,60429	3,25816686
	8	8	2666,97633	2,82060336
	9	9	3000,34838	2,48368946
	10	10	3333,72042	2,21655854
	11	11	3667,09246	1,99974723
	12	12	4000,4645	1,82038588
	13	13	4333,83654	1,66963056
	14	14	4667,20858	1,54120683
	15	15	5000,58063	1,43054211
	16	16	5333,95267	1,33422669
	17	17	5667,32471	1,2496672
	18	18	6000,69675	1,1748567

Tabla 6. Radios para un macizo monolítico

R_t, m	R_g, m	R_d, m
0,89	1,79	17,99

Teniendo en cuenta que el macizo en el cual se realiza el estudio no es homogéneo, debemos considerar el agrietamiento para establecer los radios de trituración (R_t), agrietamiento (R_g) y descostramiento (R_d). En las Tablas 7 y 8 se muestran los resultados de estos parámetros.

Tabla 7. Resultados de los coeficientes de debilitamiento de las tensiones de las ondas debido al agrietamiento del macizo

ρ_{re} (kg/m ³)	V_{re} (m/s)	γ_r	$\sum \delta_g$ (m)	$\sum \bar{\delta}_g$	K_{db}
650	1 100	0,88	0,01	3,33	0,29

Tabla 8. Radios de trituración, agrietamiento, descostramiento, considerando el agrietamiento del macizo

Rt , m	Rg , m	Rd , m
0,25	0,52	5,32

Parámetros para el diseño de la voladura de contorno

Una vez que se establece el estado tenso-deformacional y se determinan los radios de trituración, agrietamiento y descostramiento en el macizo estudiado, es posible calcular los parámetros de la voladura de contorno al explosionar cargas con cordón detonante.

En este caso los principales parámetros son: distancia entre los barrenos de contorno a , línea de menor resistencia (LMR), distancia del eje del barreno al contorno proyectado de la excavación y el coeficiente de aproximación de las cargas, m .

Para hallar las distancias entre los barrenos se tiene en cuenta el principio de que los esfuerzos de tracción producidos por el campo tensional favorecen el corte por la línea de unión de los barrenos, por esto el parámetro a se calcula por la siguiente expresión:

$$a_{contorno} = 2r_g k_g k_{och} \tag{32}$$

Donde: r_g - radio de agrietamiento que se produce entre dos cargas que explotan al unísono

k_g - coeficiente de agrietamiento que tiene en cuenta el grado de agrietamiento de las rocas

k_{och} - coeficiente que tiene en cuenta la orientación de las grietas respecto a la dirección de la onda de tensiones.

Tabla 9. Coeficiente de agrietamiento relativo del macizo Kg

No.	Clasificación	Espaciamiento, m	kg
1	Muy poco agrietado	1-1,0	1,5
2	Poco agrietado	0,8-1,0	0,95
3	Agrietamiento medio	0,6-0,8	0,90
4	Muy agrietado	0,4-0,6	0,85
5	Fuertemente agrietado	0,2-0,4	0,80
6	Extraordinariamente agrietado	0,1-0,2	0,70

Tabla 10. Coeficiente de influencia de la orientación del sistema de agrietamiento principal respecto a la superficie libre y a la dirección de la onda de choque (Koch).

No	Ángulo	Koch
1	0-10	0,45
2	10-25	0,55
3	25-50	0,70
4	50-75	0,85
5	75-90	1,00

Línea de menor resistencia

Se determina a partir del coeficiente de aproximación de las cargas (m) mediante la relación $m = \frac{a}{W} = (0,8 \div 1,2)$. Aunque Wolf (1999) propone un rango de variación de este coeficiente más estrecho pero cercano al anterior, en las condiciones de la investigación el valor más adecuado es:

$$W = \frac{a_{\text{contorno}}}{m} = \frac{a}{(0,8 \div 1,2)} \quad (33)$$

Distancia del barreno al contorno proyectado

La distancia del eje del barreno al contorno proyectado de la excavación se determina por la expresión: $c \geq R_t$ (34)

Con estos parámetros se logra un contorno lo más cercano posible al proyectado con una sobreexcavación mínima, pero además, la voladura de contorno permite obtener superficies estables en los lados y el techo de la excavación.

Tabla 11. Resultados de los parámetros de la voladura de contorno

Parámetro	U/M	Valor
a_{contorno}	m	0,85
kg	m	0,95
Koch	m	0,85
W	m	1,06
M	m	0,80
c	m	0,25

Conclusiones

Se determinaron los parámetros para realizar el diseño de la voladura de contorno con cordón detonante durante el laboreo de túneles, a partir de las propiedades de las rocas, las características mecánico-estructurales del macizo, las propiedades de las

sustancias explosivas utilizadas y el campo tenso-deformacional que se produce en el macizo después de la explosión.

Con la propuesta de diseño del patrón de voladura realizado se obtiene un ahorro considerable de medios y recursos.

Referencias bibliográficas

BOROVNIKOV, V. A. & BIEZMATERNIJ, V. A. 1970: Influencia del área de contacto de la carga de SE sobre la efectividad de la fragmentación de los pedazos fuera de tamaño. En: VIII Sesión de la utilización de la energía de la explosión en la economía nacional (Parte 2). Kiev.

DIÉGUEZ, Y. 2012: Principios de diseño de las voladuras de contorno fundamentadas en la acción de la explosión sobre el medio mediante cordón detonante en túneles labreados por rocas plásticas. En: XXXIII Convención Panamericana de Ingenierías UPADI. ISBN: 978-959-247-094-1.

GOGOLIEV, V. M. *ET AL.* 1968: Ecuaciones de estado aproximadas de los cuerpos sólidos. PMTF, Nº 5.

OTAÑO, J. 1998: *Fragmentación de rocas con explosivos*. Editorial Félix Varela, La Habana.

SARGENTÓN, R. 2008: *Criterios para el diseño de voladuras en el laboreo de excavaciones subterráneas*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

WOLF, M. 1999: Blasting technology. Going with a bang. *World Mining Equipment* 2(2): 12-14.

*Trabajo tutorado por el Ing. Yoandro Diéguez García y el Dr. C José Otaño Noguel.

La imagen de cabecera fue tomada del sitio <http://www.google.com.cu/imgres?imgurl=http://prensacubana.e-datalink.net/wp-content/uploads/2012/12/trasvase-este-oeste-una-obra-para-enorgullecernos>.